

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ
WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES**

Научная статья

УДК 621.791.048

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-41-49

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАРГАНЦА ПРИ
ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФЛЮСА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ШЛАКА
ПРОИЗВОДСТВА СИЛИКОМАРГАНЦА****Михно Алексей Романович*,
Крюков Роман Евгеньевич,
Бендре Юлия Владимировна**

Сибирский государственный индустриальный университет

* для корреспонденции: mikno-mm131@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

21 февраля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 июня 2025 г.

Принята к публикации:

30 июня 2025 г.

Опубликована:

28 августа 2025 г.

Ключевые слова:Шлак силикомарганца,
наплавка, сварка, флюс,
энергия Гиббса.**Аннотация.**

Процессы сварки и наплавки под флюсом широко используются для ремонта металлоконструкций, а также для придания различных свойств поверхностям изделий перед вводом их в эксплуатацию. Особую роль среди флюсов занимают марганецкремнесодержащие флюсы. Немаловажную роль при производстве таких флюсов играет применение при их изготовлении различных добавок, в том числе металлургических техногенных отходов производства. С другой стороны, необходимо изучение эффективности применения данных флюсов с различными присадочными проволоками. Для оценки вероятности протекания окислительно-восстановительных реакций между компонентами флюсов и присадочных проволок проведен расчет термодинамических характеристик – энтальпии, энтропии и энергии Гиббса реакций в стандартных условиях по табличным данным. На основании анализа полученных данных можно сделать вывод, что наибольшей окислительной способностью марганец в оксиде флюса обладает в сочетании с кальцием, затем магнием, титаном и алюминием в порошковой проволоке. При этом стоит отметить, что с увеличением температуры увеличивается окислительная способность оксида марганца в реакции с кремнием при образовании газа SiO , а во всех остальных случаях восстановители по мере увеличения температуры утрачивают свою восстановительную активность. Согласно полученным расчетным данным, можно утверждать, что восстановление марганца железом невозможно в данном случае. Полученные результаты химического анализа подтверждают восстановление марганца в сварных швах. Результаты проведенного СЭМ анализа подтверждают наличие марганца в сварном шве, который, возможно, переходит в неметаллические включения за счет наличия в сварочном флюсе MnO_2 . Необходимо также отметить некоторую закономерность: чем больше содержится марганца в сварочном флюсе, тем крупнее неметаллические включения.

Для цитирования: Михно А.Р., Крюков Р.Е., Бендре Ю.В. Термодинамические аспекты восстановления марганца при использовании флюса, изготовленного из шлака производства силикомарганца // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4 (170). С. 41-49. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-41-49, EDN: DDTNDZ

Благодарность

Авторы выражают признательность коллегам за помощь в проведении исследований. Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401

Введение

Математические модели на современном этапе развития науки и техники широко используются для познания сложных явлений, к которым можно отнести физико-механические процессы дуговой сварки. Моделирование позволяет составить рациональный технологический процесс и оптимизировать производство; сократить объем экспериментальных работ при составлении технологических процессов и исследованиях; раскрыть сущность исследуемых явлений с высокой достоверностью [1].

В настоящее время создан ряд моделей, применяемых в сварочном производстве. Исходя из условий сварки, по моделям рассчитывается состав многокомпонентных материалов, используемых в сварочном производстве [2]. При составлении технологий сварки рассчитывают параметры и свойства шва, режим сварки, подбирают электродные материалы и сварочные флюсы. При разработке и изготовлении сварочных материалов рассчитывают оптимальный состав исходной шихты [3-4].

Математическая модель, основанная на физико-химических процессах сварки, может служить достоверным экспериментальным подтверждением гипотез. В модели математическое описание гипотезы проверяется не опытами, а работой самого объекта. Проверка осуществляется в широком диапазоне входных параметров при достаточном числе измерений выходных параметров. Гипотеза подтверждается тогда, когда погрешности расчета и измерений входных и выходных параметров объекта близки между собой [5-7].

В условиях санкционного давления актуальной задачей является разработка новых сварочных материалов из имеющегося сырья РФ. Разработкой новых сварочных материалов в последнее время активно занимаются российские ученые. Оценкой возможности изготовления сварочных материалов из минерального сырья и техногенных образований Пермского края занимаются ученые данного региона. Ими предложен способ получения плавного сварочного флюса из минерального сырья Уральского региона при помощи высококонцентрированных источников теплоты (плазменная дуга). Полученные результаты проведенных практических и теоретических исследований сварочных материалов из минерального сырья позволяют сделать вывод о

приемлемости данного сырья при изготовлении сварочных материалов [8-10].

Одной из минеральных сырьевых баз для изготовления сварочного флюса может стать Дальневосточный регион [11]. Ученые из Дальневосточного федерального округа активно занимаются разработкой и исследованием плавного-керамического сварочного флюса для наплавки и восстановления изношенных деталей из низколегированных и углеродистых сталей. Проведена оценка, на основе термодинамического расчета, возможных физико-химических процессов в шлаковой системе. Получены результаты, обеспечивающие высокое качество наплавляемых покрытий, полученных путем применения разработанного материала. Проведена апробация наплавочных материалов в целях определения сварочно-технологических свойств и качества наплавленного металла [12-14].

Разработкой сварочных флюс-добавок для повышения физико-механических свойств, снижения загрязненности сварного соединения неметаллическими включениями, снижения газонасыщенности сварного шва занимаются ученые под руководством Н.А. Козырева. Использование разработанного материала позволяет производить сварку нефтяных резервуаров северного исполнения и при этом обеспечивать получение требуемых механических свойств металлоконструкций [15]. Немаловажным является и проведение исследований о влиянии сварочных (наплавочных) материалов на структуру и свойства полученных металлоизделий. Методами современного физического материаловедения исследованы структурно-фазовое состояние, дефектная субструктура и поверхность разрушения сварных швов из низкоуглеродистой легированной стали, полученных с применением углеродсодержащей добавки и без нее [16]. Исследованы и проведены испытания перспективных сварочных материалов и технологий на холоде с целью повышения надежности сварных конструкций ответственного назначения [17]. Выявлено, что при сварке под смесью флюсов окислительного АН-348А и слабоокислительного АН-67Б уменьшается содержание кислорода в сварных швах, и соответственно, снижается загрязненность сварных швов неметаллическими включениями, при этом увеличиваются механические свойства и повышается коррозионная стойкость сварных соединений [18-20].

Целью данной работы являлось проведение оценки возможности восстановления марганца в сварном соединении, изготовленном путем дуговой автоматической сварки под слоем флюса из техногенного сырья металлургического производства (шлака от производства ферросиликомарганца).

Методы

Для оценки вероятности протекания окислительно-восстановительных реакций проведен расчет термодинамических характеристик – энтальпии, энтропии и энергии Гиббса реакций в стандартных условиях по табличным данным.

Для оценки вероятности протекания реакций рассчитывали термодинамические характеристики известными методами:

$$\Delta_r H^\circ(T) = \sum [n_{\Delta_f} H^\circ(T)]_{\text{прод.}} - \sum [n_{\Delta_f} H^\circ(T)]_{\text{исх.}};$$

$$\Delta_r S^\circ(T) = \sum [n S^\circ(T)]_{\text{прод.}} - \sum [n S^\circ(T)]_{\text{исх.}};$$

$$\Delta_r G^\circ(T) = \Delta_r H^\circ(T) - T \Delta_r S^\circ(T).$$

производилось по содержанию оксида марганца в них: флюс, содержащий MnO менее 7%; содержащий от 7 до 11%; содержащий более 11%.

Автоматическая сварка образцов стальных пластин 9MnSi5 производилась под разработанными флюсами и флюсом сравнения (АН-348А) с использованием присадочной проволоки ER70S-6. Режим проведения сварочных работ: скорость сварки – 30 см/мин, напряжение – 30В, сила тока – 500А.

Изучение химического состава сварных соединений осуществлялось на спектрометре ДФС-71 и спектрометре XRF-1800 по стандартным методикам.

Определение химического состава неметаллических включений осуществлялось с использованием сканирующего электронного микроскопа KYKY-EM6900 и программного обеспечения Oxford instruments.

Результаты исследования (Results);

Таблица 1. Химический состав флюса на основе шлака производства силикомарганца

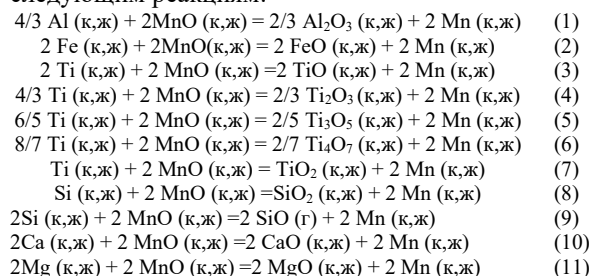
Table 1. Chemical composition of flux based on silicomanganese production slag

Массовая доля элементов, %													
Используемый флюс	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	P	ZnO	C	F	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
содержащий MnO < 7%	0,70	6,69	27,99	35,96	14,96	8,02	0,64	0,021	0,013	0,020	0,14	0,22	0,052
содержащий 7 - 11% MnO	0,41	9,64	35,07	42,57	6,82	1,58	0,21	0,022	0,010	0,016	0,15	0,17	0,057
содержащий MnO > 11%	0,55	16,41	28,34	41,45	6,64	1,50	0,22	0,021	0,013	0,028	0,18	0,15	0,047

Расчет производился в интервале температур 1500 – 3000 К по термодинамическим свойствам реагентов $[H^\circ(T) - H^\circ(298,15 \text{ K})]$, $S^\circ(T)$, $\Delta_f H^\circ(298,15 \text{ K})$.

Для проведения термодинамического анализа выбраны компоненты, которые чаще всего встречаются в применяемых сварочных материалах (присадочных проволоках, свариваемых сталях).

Термодинамический анализ проводился по следующим реакциям:



Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью редактора MS Excel.

С целью подтверждения полученных расчетных данных проведена опытная наплавка под разработанными вариантами флюсов. Химический состав используемых флюсов представлен в Таблице 1. Разделение флюсов

Результаты термодинамических расчетов сведены в Таблицу 2 и построены зависимости стандартных энергий Гиббса реакций от температуры (Рис.1). Результаты расчетов позволили провести экспериментально-исследовательскую часть работы.

После проведения сварочных работ были приведены всесторонние исследования сварных соединений. Некоторые из них представлены в работе [21]. Результаты анализа химического состава приведены в Таблице 3.

Методом СЭМ проведено исследование загрязненности сварных швов неметаллическими включениями. Изучен химический состав выявленных включений. Результаты СЭМ анализа представлены на Рис. 2 и в Таблице 4.

Проведя анализ полученных данных, можно сделать вывод, что наибольшей окислительной способностью марганец в оксиде обладает в сочетании с кальцием, затем магнием, титаном и алюминием. При этом стоит отметить, что с увеличением температуры увеличивается окислительная способность марганца в оксиде с кремнием, если продуктом реакции является газ SiO, а во всех остальных случаях восстановители по мере увеличения температуры утрачивают свою восстановительную активность. Согласно

Таблица 2. Изменения стандартных энергий Гиббса реакций (1) – (11) в зависимости от температуры
Table 2. Changes in standard Gibbs energies of reactions (1) – (11) depending on temperature

T, K	$\Delta_r G^\circ(T)$, кДж/моль					
	1	2	3	4	5	6
1500	-252,240	194,677	-256,690	-196,345	-175,064	-162,874
1800	-239,131	175,109	-257,819	-198,351	-177,968	-164,581
2000	-231,131	161,362	-259,196	-200,025	-180,362	-167,658
2200	-220,435	150,538	-263,320	-200,333	-183,897	-171,863
2500	-203,634	140,964	-264,099	-199,711	-185,242	-171,731
2800	-192,339	131,306	-264,786	-199,083	-186,896	-171,937
3000	-185,603	124,822	-265,196	-198,651	-188,146	-172,236
T, K	7	8	9	10	11	
1500	-128,293	-98,176	90,309	-406,138	-324,892	
1800	-127,581	-96,128	-1,499	-391,743	-307,807	
2000	-127,266	-92,642	-55,284	-382,806	-296,968	
2200	-125,169	-86,652	-105,795	-371,139	-282,209	
2500	-121,655	-71,483	-174,096	-347,126	-250,437	
2800	-118,548	-56,913	-241,638	-321,643	-214,955	
3000	-116,673	-47,497	-286,276	-303,268	-189,130	

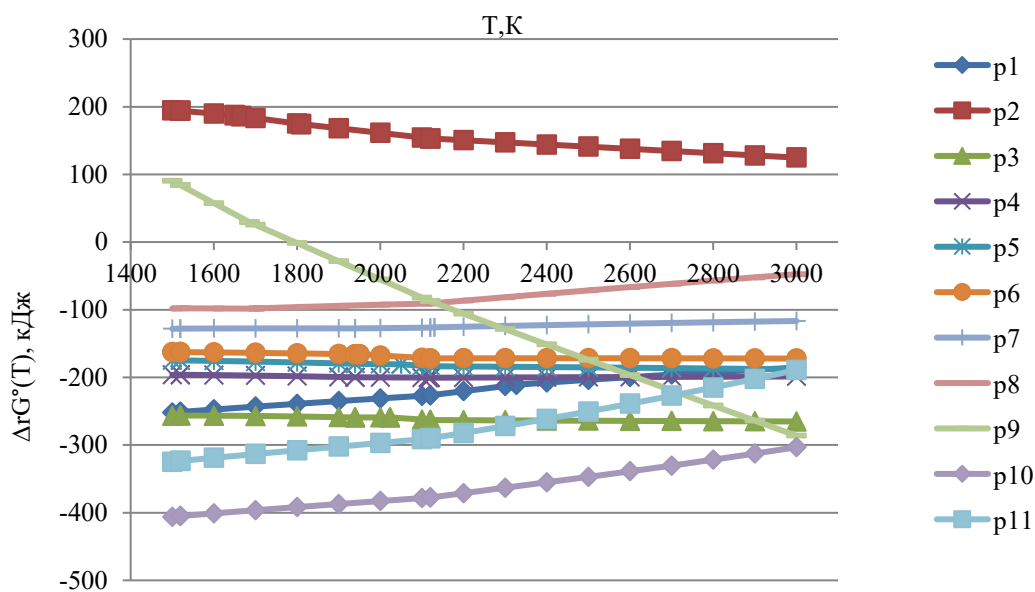


Рис. 1. Изменения стандартных энергий Гиббса реакций (1) – (11) в зависимости от температуры

Fig. 1. Changes in standard Gibbs energies of reactions (1) – (11) depending on temperature

Таблица 3. Химический состав сварного шва

Table 3. Chemical composition of the weld

Используемый флюс	Массовая доля элементов, %											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	S	P
содержащий MnO < 7%	0,06	0,58	1,12	0,06	0,78	0,20	0,001	Отс.	0,29	0,003	0,103	0,015
содержащий 7 - 11% MnO	0,07	0,50	1,15	0,06	0,64	0,21	0,001	0,002	0,22	0,008	0,024	0,015
содержащий MnO > 11%	0,07	0,58	1,20	0,03	0,80	0,16	0,002	0,001	0,30	0,007	0,023	0,010
Флюс АН-348А	0,08	0,50	1,01	0,03	0,85	0,16	0,012	0,005	0,32	0,015	0,006	0,020

Таблица 4. Химический состав неметаллических включений в сварных швах

Table 4. Chemical composition of non-metallic inclusions in welds

Используемый флюс	Масс., %					
	углерод	кислород	алюминий	кремний	марганец	железо
содержащий MnO < 7%	-	24,97	2,69	14,59	27,70	8,72
содержащий 7 - 11% MnO	6,45	37,08	1,00	19,42	27,73	7,55
содержащий MnO > 11%	3,47	34,45	1,54	19,51	29,34	5,84
Флюс АН-348А	-	20,89	9,25	8,93	10,05	49,07

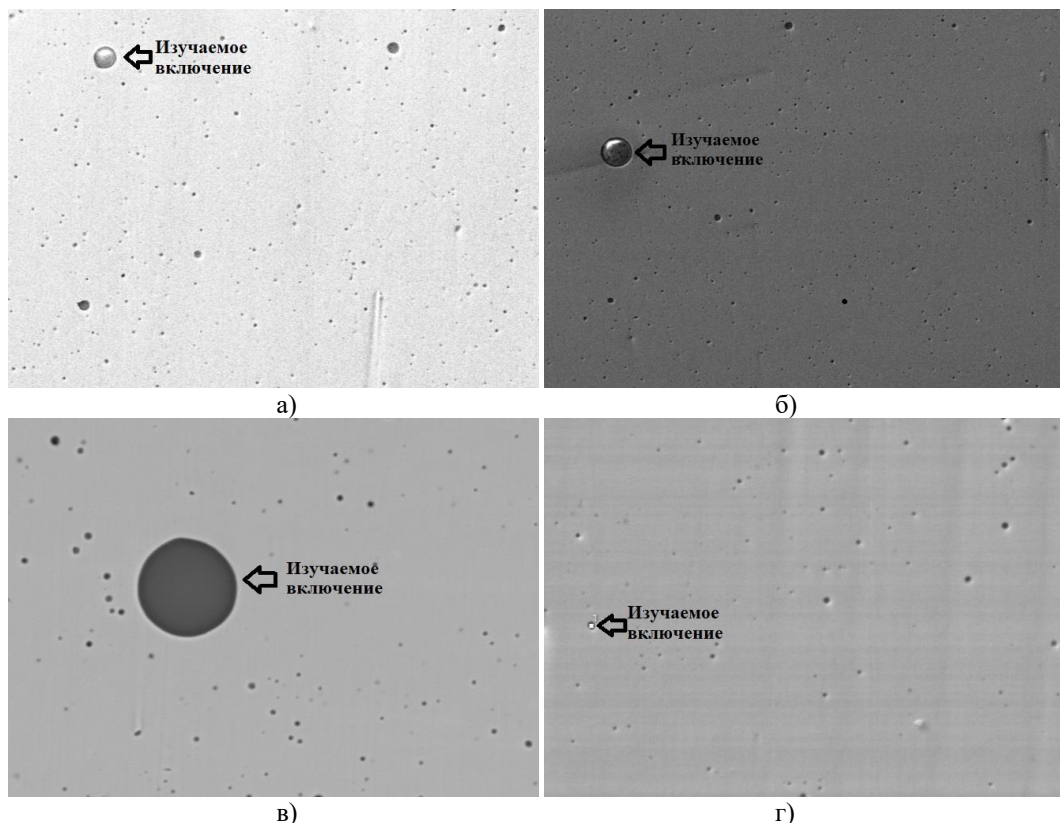


Рис. 2. СЭМ изображение поверхности сварных швов, где а – флюс, содержащий MnO менее 7%; б – содержащий от 7 до 11%; в – содержащий более 11%; г – флюс сравнения АН-348А.

Fig. 1. SEM image of the surface of welds, where a – flux containing MnO less than 7%; b – containing from 7 to 11%; c – containing more than 11%; d – reference flux AN-348A.

полученным расчетным данным, можно утверждать, что восстановление марганца железом в данном случае невозможно.

Полученные результаты химического анализа подтверждают восстановление марганца из MnO и переход его в металл сварного шва, при этом стоит отметить, что чем больше содержится оксида марганца в применяемом флюсе, тем больше его переходит в сварной шов.

Обсуждение

Результаты проведенного СЭМ анализа подтверждают наличие марганца в сварном шве. При проведении изучения химического состава неметаллических включений сварного шва выявлено наличие включений, содержащих достаточно большое количество марганца,

наличие такого количества марганца объясняется возможным присутствием в разработанном сварочном флюсе MnO₂ – пиролюзита, который, возможно, восстанавливается до MnO и переходит в неметаллические включения в сварном шве. Для подтверждения наличия в разработанном сварочном флюсе MnO₂ – пиролюзита планируется дополнительное изучение разработанного флюса методом рентгенофазового анализа. Необходимо также отметить некоторую закономерность: чем больше содержится марганца в сварочном флюсе, тем крупнее по размерам неметаллические включения в сварном соединении.

Выводы

Полученные результаты термодинамических характеристик – энтальпии, энтропии и энергии Гиббса реакций позволяют оценить возможность восстановления марганца при проведении сварочных и наплавочных работ под разрабатываемым флюсом, изготовленным из шлака от производства силикомарганца.

1. Использование флюсов на основе шлака от производства ферросиликомарганца способствует получению требуемых по внешнему виду наплавленных и сварных швов при проведении сварочных работ низкоуглеродистых сталей.

Отдельного обсуждения требует вопрос изучения разработанного флюса методом рентгенофазового анализа, что станет темой исследований следующих работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полищук В. А. Математическое моделирование процессов сварки // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2014. № Т20. С. 356–360.
2. Мосин А. А., Ерофеев В. А., Шолохов М. А. Физико-математическое моделирование особенностей формирования угловых швов мостовых металлоконструкций при дуговой сварке под флюсом // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2020. Т. 20. № 3. С. 259–268. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-259-268.
3. Павлов Н. В., Крюков А. В., Полищук В. А. Применение математических моделей для исследования сварочных процессов // Инновационные технологии и экономика в машиностроении, Юрга, 22–23 мая 2014 года. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Том 1. Юрга : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014. С. 67–71.
4. Смирнов А. Н., Козлов Э. В., Князьков В. Л. [и др.] Влияние режимов сварки углеродистых сталей на амплитуду полей внутренних напряжений и структурно-фазовое состояние в зоне термического влияния // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 6. С. 28–33.
5. Донченко Е. А. Расчет термических циклов точек при автоматической сварке и наплавке с учетом особенностей плавления основного металла // Сварочное производство. 2011. № 9. С. 3–9.
6. Судник В. А., Ерофеев В. А., Масленников А. В. [и др.] Математическая модель процесса сварки под флюсом и явлений в дуговой камере // Сварочное производство. 2012. № 7. С. 3–12.
7. Коробейников С. Н., Бабкин А. С. Алгоритм расчета оптимальных параметров режима сварки низколегированных сталей // Сварочное производство. 2009. № 12. С. 13–16.
8. Artemov A. O., Naumov S. V., Ignatov M. N. Technology and equipment for plasma electric arc granulation of fused welding flux // Materials Science Forum. 2019. Vol. 946. P. 389–394. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.389.
9. Журба А. Г., Наймов С. В., Белинин В. А. [и др.] Ремонт вооружения, военной и специальной техники при помощи сварки под флюсом с использованием сварочных материалов из минерального сырья Уральского региона // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2020. Т. 11. № 1. С. 59–61.
10. Naumov S. V., Artemov A. O., Belousov K. I. Research on plasma electric arc granulation processes of the ural region mineral raw materials to welding materials for submerged arc welding // Materials Science Forum. 2019. Vol. 946. Pp. 945–949. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.945.
11. Макиенко В. М., Атеняев А. В. Разработка шлаковой основы флюсов ильменито-флюоритного типа с использованием минерального сырья Дальневосточного региона // Ползуновский вестник. 2020. № 1. С. 130–139. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.01.026.
12. Ри Х. С., Макиенко В. М., Белоус Т. В. [и др.] Разработка шлаковой основы легирующих флюсов с использованием минерального сырья Дальневосточного региона // Сварка и диагностика. 2021. № 3. С. 39–44. DOI: 10.52177/2071-5234_2021_03_39.
13. Makienko V. M., Baranov E. M., Romanov I. O., Stroitelev D. V. A flux-cored wire for deposition of high-manganese austenitic steel // Welding International. 2009. Vol. 23. № 12. Pp. 944–947. DOI: 10.1080/09507110903291942.
14. Макиенко В. М., Атеняев А. В., Соколов П. В., Соколов В. Б. Разработка комплексно-легированных флюсов на основе минерального сырья Дальневосточного региона для повышения качества и функциональных свойств наплавленного слоя при электротермических процессах // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2021. № 3(28). С. 7–14.
15. Крюков Р. Е., Козырев Н. А. Основы создания углеродсодержащих сварочных и наплавочных материалов. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. 358 с. ISBN 978-5-4387-0869-8.
16. Kryukov R. E., Gromov V. E., Ivanov Yu. F. [et al.] Fine Structure and Fracture Surface of Low-Carbon Steel Welds // Russian Physics Journal. 2022. Vol. 65. № 2. Pp. 332–336. DOI: 10.1007/s11182-022-02640-2.
17. Голиков Н. И., Сидоров М. М., Сараев Ю. Н. Климатические испытания сварочных материалов при отрицательных температурах // Сварочное производство. 2019. № 7. С. 31–37.
18. Михайлицын С. В., Беляев А. И. Сварочные и наплавочные материалы: конспект

лекций. Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2012. 199 с.

19. Sheksheev M. A., Shiriaeva E. N., Mikhailitsyn S. V. Investigation of the influence of ultrafine particles of refractory materials on the formation of the structure and properties of the deposited metal // AIP Conference Proceedings : INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN TRENDS IN MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT 2021. Vol. 2503. Sevastopol : American Institute of Physics Inc., 2022. P. 060007. DOI: 10.1063/5.0099350.

20. Sheksheev M. A., Mikhailitsyn S. V., Sychkov A. B. [et al.] Petrographic Study of Welding Slags // Russian Metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020. № 6. Pp. 659–661. DOI: 10.1134/S0036029520060166.

21. Павлов В. В., Козырев Н. А., Усольцев А. А. [и др.] Изучение влияния энерго-технологических режимов сварки под флюсом, изготовленным из шлака производства силико-марганца, на физико-механические свойства сварного шва // Сварочное производство. 2021. № 5. С. 3–8. DOI: 10.34641/SP.2021.1038.5.020.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Михно Алексей Романович, директор научно-производственного центра «Сварочные процессы и технологии», Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42) ORCID: 0000-0002-7305-6692, e-mail: mikno-mm131@mail.ru

Крюков Роман Евгеньевич, профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42), докт. техн. наук., доцент ORCID: 0000-0002-3394-7941, e-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Бендре Юлия Владимировна, доцент кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42), канд. хим. наук., доцент, e-mail: bendre@list.ru

Заявленный вклад авторов:

Михно Алексей Романович – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Крюков Роман Евгеньевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы.

Бендре Юлия Владимировна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, проведение термодинамических расчетов, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

THERMODYNAMIC ASPECTS OF MANGANESE RESTORATION WHEN USING FLUX MADE FROM SILICOMANGANESE PRODUCTION SLAG

Alexey R. Mikhno*, Roman E. Kryukov,
Yulia V. Bendre

Siberian State Industrial University

* for correspondence: mikno-mm131@mail.ru



Article info

Abstract.

The processes of welding and submerging are widely used to repair metal structures, as well as to give various properties to the surfaces of products before putting them into operation. Manganese-silicon-containing fluxes play a special role among fluxes. An important role in the production of such

Received:
21 February 2025

Accepted for publication:
22 June 2025

Accepted:
30 June 2025

Published:
28 August 2025

Keywords: Silicomanganese slag, surfacing, welding, flux, Gibbs energy.

fluxes is played by the use of various additives in their manufacture, including metallurgical man-made production waste. On the other hand, it is necessary to study the effectiveness of using these fluxes with various filler wires. To estimate the probability of redox reactions between the components of fluxes and filler wires, the thermodynamic characteristics of enthalpy, entropy and Gibbs energy of reactions under standard conditions were calculated according to tabular data. Based on the analysis of the data obtained, it can be concluded that manganese in flux oxide has the greatest oxidizing ability in combination with calcium, followed by magnesium, titanium, and aluminum in powder wire. It should be noted that with increasing temperature, the oxidizing ability of manganese oxide increases in reaction with silicon during the formation of SiO gas, and in all other cases, reducing agents lose their reducing activity as the temperature increases. According to the calculated data obtained, it can be argued that the reduction of manganese with iron is impossible in this case. The obtained results of chemical analysis confirm the reduction of manganese in welds. The results of the SEM analysis confirm the presence of manganese in the weld, which may turn into non-metallic inclusions due to the presence of MnO₂ in the welding flux. It is also necessary to note a certain pattern: the more manganese is contained in the welding flux, the larger the non-metallic inclusions.

For citation: Mikhno A.R., Kryukov R.E., Bendre Yu.V. Thermodynamic aspects of manganese restoration when using flux made from silicomanganese production slag. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 4(170):41-49. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-41-49, EDN: DDTNDZ

REFERENCES

- Polishchuk V. A. Mathematical modeling of welding processes. *Scientific and methodological electronic journal "Concept"*. 2014; T20:356–360.
- Mosin A.A., Erofeev V.A., Sholokhov M.A. Physico-mathematical modeling of the features of the formation of fillet welds of bridge metal structures during submerged arc welding. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020; 20(3):259–268. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-259-268.
- Pavlov N.V., Kryukov A.V., Polishchuk V.A. Application of mathematical models for the study of welding processes. *Innovative technologies and economics in mechanical engineering*. Yurga, May 22–23, 2014. National Research Tomsk Polytechnic University. Volume 1. Yurga: National Research Tomsk Polytechnic University; 2014. Pp. 67–71.
- Smirnov A.N., Kozlov E.V., Knyazkov V.L. [et al.] Influence of welding modes of carbon steels on the amplitude of internal stress fields and the structural-phase state in the heat-affected zone. *Deformation and destruction of materials*. 2017; 6:28–33.
- Donchenko E.A. Calculation of thermal cycles of points during automatic welding and surfacing, taking into account the characteristics of melting of the base metal. *Welding production*. 2011; 9:3–9.
- Sudnik V.A., Erofeev V.A., Maslennikov A.V. Mathematical model of the submerged arc welding process and phenomena in the arc cavity. *Welding production*. 2012; 7:3–12.
- Korobeinikov S.N., Babkin A.S. Algorithm for calculating the optimal parameters of the welding mode for low-alloy steels. *Welding production*. 2009; 12:13–16.
- Artemov A.O., Naumov S.V., Ignatov M.N. Technology and equipment for plasma electric arc granulation of fused welding flux. *Materials Science Forum*. 2019; 946:389–394. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.389.
- Zhurba A.G., Naumov S.V., Belinin V.A. [et al.] Repair of weapons, military and special equipment using submerged arc welding using welding materials from mineral raw materials of the Ural region. *Current problems modern science, technology and education*. 2020; 11(1):59–61.
- Naumov S.V., Artemov A.O., Belousov K.I. Research on plasma electric arc granulation processes of the Ural region mineral raw materials to welding materials for submerged arc welding. *Materials Science Forum*. 2019; 946:945–949. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.945.
- Makienko V.M., Atenyaev A.V. Development of a slag base for ilmenite-fluorite type fluxes using mineral raw materials of the Far Eastern region. *Polzunovskiy Vestnik*. 2020; 1:130–139. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.01.026.
- Ri H.S., Makienko V.M., Belous T.V. [et al.] Development of a slag base for alloying fluxes using mineral raw materials of the Far Eastern region. *Welding and diagnostics*. 2021; 3:39–44. DOI: 10.52177/2071-5234_2021_03_39.
- Makienko V.M., Baranov E.M., Romanov I.O., Stroitelev D.V. A flux-cored wire for deposition of high-manganese austenitic steel. *Welding*

International. 2009; 23(12):944–947. DOI: 10.1080/09507110903291942.

14. Makienko V.M., Atenyaev A.V., Sokolov P.V., Sokolov V.B. Development of complex-alloyed fluxes based on mineral raw materials of the Far Eastern region to improve the quality and functional properties of the deposited layer during electrothermal processes. *Transport of the Asia-Pacific region*. 2021; 3(28):7–14.

15. Kryukov R.E., Kozyrev N.A. Fundamentals of creating carbon-containing welding and surfacing materials. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2019. 358 p. ISBN 978-5-4387-0869-8.

16. Kryukov R.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. [et al.] Fine Structure and Fracture Surface of Low-Carbon Steel Welds. *Russian Physics Journal*. 2022.; 65(2):332–336. DOI: 10.1007/s11182-022-02640-2.

17. Golikov N.I., Sidorov M.M., Saraev Yu.N. Climatic tests of welding materials at negative temperatures. *Welding production*. 2019; 7:31–37.

18. Mikhailitsyn S.V., Belyaev A.I. Welding and surfacing materials: lecture notes. Magnitogorsk:

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova; 2012. 199 p.

19. Shekshchev M.A., Shiriaeva E.N., Mikhailitsyn S.V. Investigation of the influence of ultrafine particles of refractory materials on the formation of the structure and properties of the deposited metal. *AIP Conference Proceedings : International Conference On Modern Trends In Manufacturing Technologies And Equipment 2021*. Sevastopol: American Institute of Physics Inc.; 2022. Vol. 2503. P. 060007. DOI: 10.1063/5.0099350.

20. Shekshchev M.A., Mikhailitsyn S.V., Sychkov A.B. [et al.] Petrographic Study of Welding Slags. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020; 2020(6):659–661. DOI: 10.1134/S0036029520060166.

21. Pavlov V.V., Kozyrev N.A., Usoltsev A.A. [et al.] Study of the influence of energy-technological modes of submerged arc welding made from slag from silicon-manganese production on the physical and mechanical properties of the weld. *Welding production*. 2021; 5:3–8. DOI: 10.34641/SP.2021.1038.5.020.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexey R. Mikhno, Director of the Research and Production Center “Welding Processes and Technologies”, Siberian State Industrial University (Russia, 654007, Kemerovo region - Kuzbass, Novokuznetsk, Kirova St., 42) ORCID: 0000-0002-7305-6692, e-mail: mikno-mm131@mail.ru

Roman E. Kryukov, Professor of the Department of Mechanics and Engineering, Siberian State Industrial University (Russia, 654007, Kemerovo region - Kuzbass, Novokuznetsk, Kirova St., 42), Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor ORCID: 0000-0002-3394-7941, e-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Yulia V. Bendre, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University (Russia, 654007, Kemerovo region - Kuzbass, Novokuznetsk, Kirova St., 42), C. Sc. in Chemistry, Associate Professor, e-mail: bendre@list.ru

Contribution of the authors:

Alexey R. Mikhno – formulation of the research problem, review of relevant literature, collection and analysis of data, review of relevant literature, conclusions, writing the text.

Roman E. Kryukov – formulation of the research problem, scientific management, review of relevant literature.

Yulia V. Bendre – review of relevant literature, collection and analysis of data, thermodynamic calculations, conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

