

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 620.18:620.17

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-2-297-6-12

В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, Р. Н. Богатырев, В. О. Харламов

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛА НИКЕЛЬ НП1 + СТАЛЬ 09Г2С ПОСЛЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ТЕРМООБРАБОТКИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: arisova1954@mail.ru

Приведены результаты исследований структуры в зоне соединения биметалла никель НП1 со сталью 09Г2С после сварки взрывом и последующего отжига при температуре 680 °С и времени выдержки 1 час. Показано формирование оплавов различной конфигурации, изучено распределение химических элементов и микротвердости по сечению биметалла.

Ключевые слова: никеле-стальной биметалл, сварка взрывом, оплавы, отжиг, микроструктура, микротвердость, рентгеноспектральный анализ

V. N. Arisova, L. M. Gurevich, R. N. Bogatyrev, V. O. Kharlamov

STRUCTURE FORMATION OF THE JOINT ZONE OF NICKEL NP1 BIMETAL + 09Mn2Si STEEL AFTER EXPLOSION WELDING AND HEAT TREATMEN

Volgograd State Technical University

The results of studies of the structure in the zone of connection of bimetal nickel NP1 with steel 09Mn2Si after explosion welding and subsequent annealing at a temperature of 680 °C and a holding time of 1 hour are presented. The formation of melts of various configuration, the distribution of chemical elements and microhardness over the cross section of the bimetal was studied.

Keywords: nickel-steel bimetal, explosion welding, melts, annealing, microstructure, microhardness, X-ray spectral analysis

Выбор материалов для изготовления оборудования, используемого при производстве едкого натра и его хранения, – ответственный вопрос из-за высокой агрессивности щелочи. Стойкостью к коррозии при воздействии агрессивных сред обладают многочисленные сплавы цветных и черных металлов [1–3]. Технически чистый никель находит широкое применение в качестве защитных покрытий от коррозии в различных химических средах. При хранении концентрированной (до 99 %) NaOH используется никель и его сплавы с дополнительной катодной защитой сварных соединений [4].

Для экономии дорогостоящего никеля используются биметаллы из стали и никеля (или его сплавов), для получения которых целесо-

образно использовать технологию сварки взрывом (СВ) [5–8]. Свойства сваренного взрывом композита в первую очередь определяются строением околошовной зоны. Достоинством никель-стального композита является наличие при высоких температурах только пластичных неограниченных твердых растворов на диаграмме состояния сплавов системы никель-железо. В богатых никелем сплавах Fe-Ni при комнатной температуре существует три химических соединения: Fe₃Ni, FeNi и FeNi₃, которые образуются в результате упорядочения твердого раствора. В сплавах, содержащих от ~50 до 85 % никеля, при медленном охлаждении формируется сверхструктура FeNi₃ [9].

Целью данной работы являлось исследование зоны соединения сваренного взрывом биметалла никель НП1+сталь 09Г2С после сварки взрывом и последующего отжига.

Материалы и методика проведения исследований

В качестве основы биметалла использовалась конструкционная сталь 09Г2С толщиной 12 мм, на которую с использованием энергии взрыва приваривалась пластина из никеля марки НП1 толщиной 6 мм. Размеры сваренного биметалла в плане 2000×5000 мм. Вид емкости для хранения едкого натра, изготовленной из сваренного взрывом никель-стального биметалла, приведен на рис. 1.



Рис. 1. Емкость для хранения щелочи NaOH из никель-стального биметалла

Для исследований использовались образцы размерами 18×20×12 мм, вырезанные из сваренного взрывом биметалла. Отжиг образцов проводился в печи СНОЛ-1.6,2.5,1/11-ИЗ при температуре 680 °С и времени выдержки 1 час.

Для измерения микротвердости использовался прибор ПМТ-3М. Металлографические исследования выполняли с помощью оптического металлографического микроскопа «Olympus BX61» с фиксацией микроструктур компонентов КМ с помощью цифровой камеры микроскопа DP12 при увеличениях ×50–500. При травлении микрошлифов для выявления микроструктуры использовался раствор хлорного железа.

Исследование распределения химических элементов в околошовной зоне композиционного материала проводили на растровом двухлучевом электронно-ионном микроскопе системы Versa3D DualBeam, который снабжен энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max (Oxford Instruments).

Результаты исследований и их обсуждение

На рисунке 2 приведена микроструктура зоны соединения исследуемого сваренного взрывом биметалла. Дефекты типа непровары, усадочная пористость или кристаллизационные трещины при металлографическом исследовании не обнаружены.

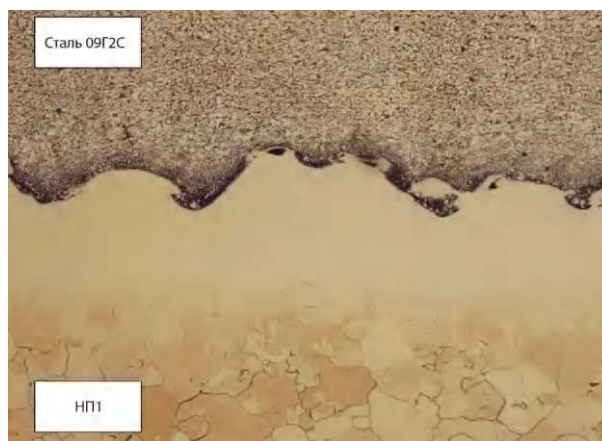


Рис. 2. Микроструктуры зоны соединения сваренного взрывом композита никель НП-1+сталь 09Г2С (×50)

Микроструктура зоны соединения никеля со сталью имеет традиционный для сварки взрывом волновой характер. На гребнях и впадинах волн, рассматриваемых относительно стальной основы, во многих местах образуется химическая неоднородность – участки с литой структурой. Образование расплавленного металла в зоне контакта свариваемых металлов связано с выделением значительного количества теплоты вследствие пластической деформации приграничных слоев и адиабатичности процесса [6]. Перемешивание металлов в жидкой фазе приводит к образованию локальных участков нового сплава, отличного от обоих свариваемых металлов по структуре и химическому составу. В некоторых случаях интенсивная пластическая деформация приводит к отрыву стальных фрагментов разного размера и перемещению их в зону никеля (рис. 2).

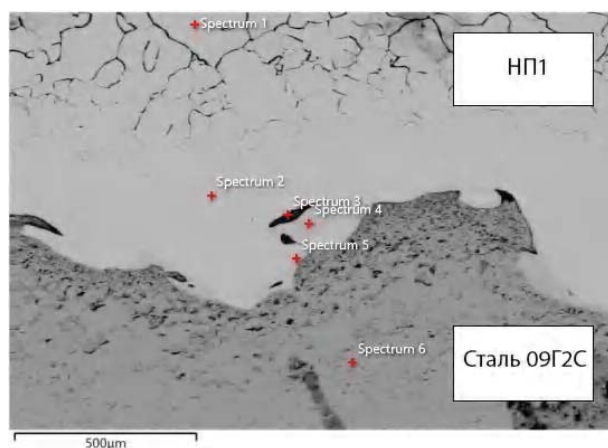


Рис. 3. Микроструктура зоны соединения никель НР1-сталь 09Г2С после СВ (съемка с использованием детектора обратно отраженных электронов BSE) с указанием точек, в которых определялся химический состав: точка Spectrum 3 – стальной фрагмент в никеле, точки Spectrum 4, 5 – локальные участки при взаимодействии компонентов никеля и стали

В таблице 1 представлены данные энергодисперсионного анализа химического состава в отдельных точках, показанных на рис. 3.

Анализ химического состава в точках микроструктуры (рис. 3) показал наличие в никеле отделившегося от стали фрагмента – точка Spectrum 3 и образование локальных участков новых сплавов при взаимодействии компонентов никеля и стали – точки Spectrum 4, 5.

На рисунке 4 приведено распределение химических элементов по сечению биметалла по зонам без диффузионного взаимодействия (а) и при их наличии (б).

При металлографическом исследовании и при анализе спектрограммы распределения химических элементов между слоями никеля и стали (рис. 4, а) наблюдается четкая граница без видимого взаимодействия компонентов биметалла. При наличии фрагментов стали в никеле и зоны оплавок на ширине около 100 мкм имеет место переменная концентрация никеля и стали.

Распределение микротвердости в биметалле после СВ приведено на рис. 5.

Таблица 1

Химический состав в отдельных точках микроструктуры, показанных на рис. 3

Точка	Содержание элемента, ат. %			
	Ni	Fe	Mn	Si
Spectrum 1	100	—	—	—
Spectrum 2	100	—	—	—
Spectrum 3	2,46	93,84	2,43	1,27
Spectrum 4	53,23	45,29	0,82	0,66
Spectrum 5	60,82	37,78	0,70	0,71
Spectrum 6	—	97,26	1,76	0,99

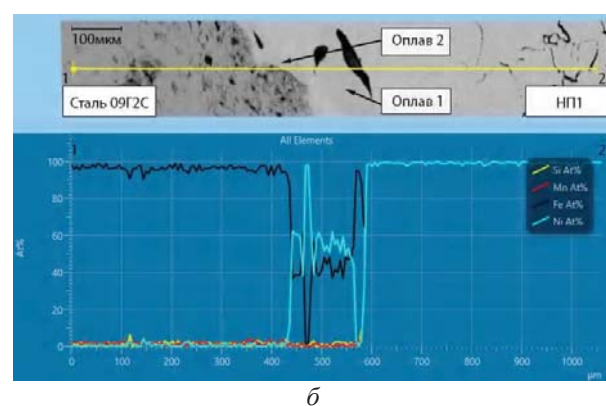
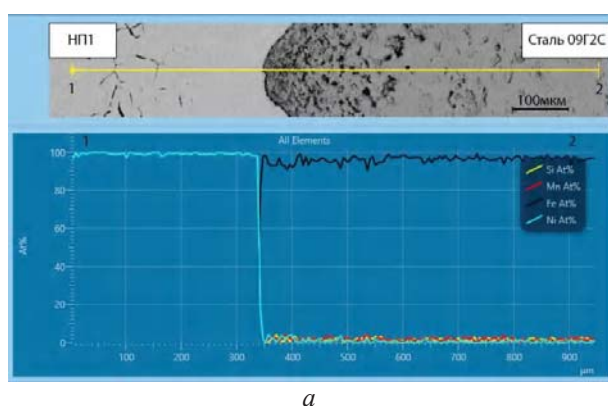


Рис. 4. Распределение химических элементов вблизи волнообразной границы соединения: без локального взаимодействия (а) и при наличии фрагментов стали в никеле и зоны диффузионного взаимодействия (б)

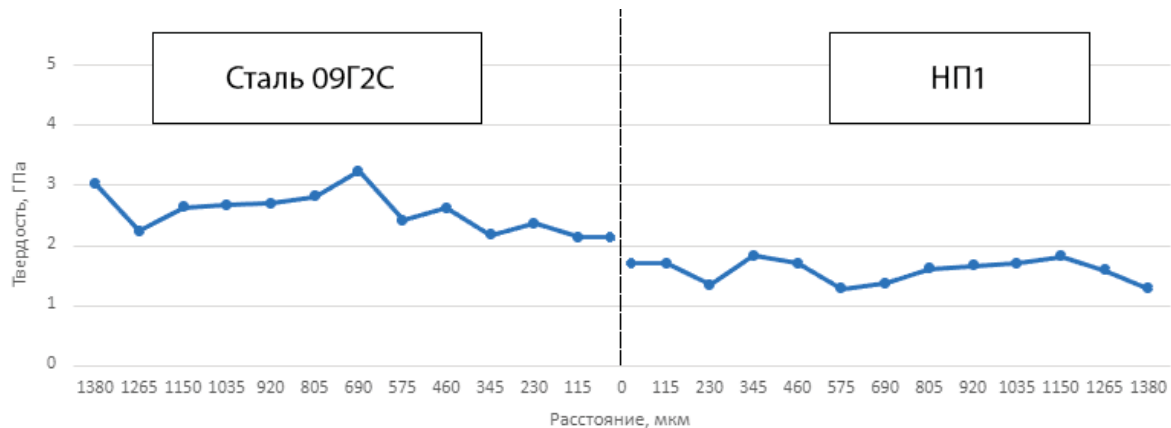


Рис. 5. Распределение микротвердости в зоне соединения КМ никель НП1-сталь 09Г2С после сварки взрывом

Микротвердость никеля составляет около 1,5 ГПа и находится практически на одном уровне по всей длине слоя. В стали 09Г2С микротвердость несколько варьируется от 2,3 до 3,0 ГПа.

После отжига при температуре 680 °С с вы-

держкой 1 ч (рис. 6) микротвердость стали уменьшилась до 1,5–2,2 ГПа, а никеля осталась на уровне 1,5 ГПа. Следует отметить несколько меньшие значения микротвердости возле зоны соединения, связанные с возможными диффузионными процессами.

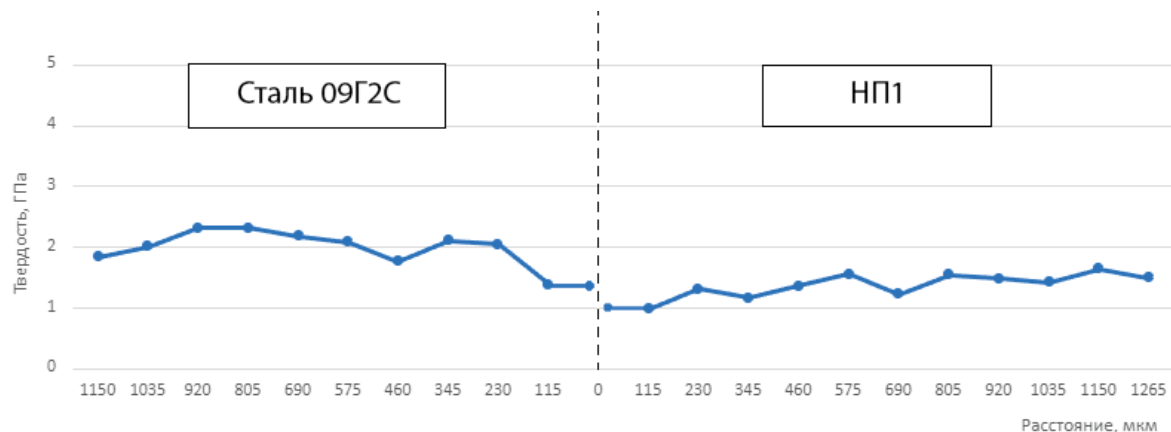


Рис. 6. Микротвердость в зоне соединения биметалла после отжига

Энергодисперсионный анализ материала в зоне соединения без вихревых участков не обнаружил участков взаимодействия компонентов после отжига (также как и после сварки).

Распределение химических элементов в ком-

позите после отжига по линии, на которой присутствуют отделившиеся от основы фрагменты стали и оплавы, приведено на рис. 7, а и только оплавы – на рис. 7, б. Результаты определения состава в характерных точках показано на рис. 8 и в табл. 2.

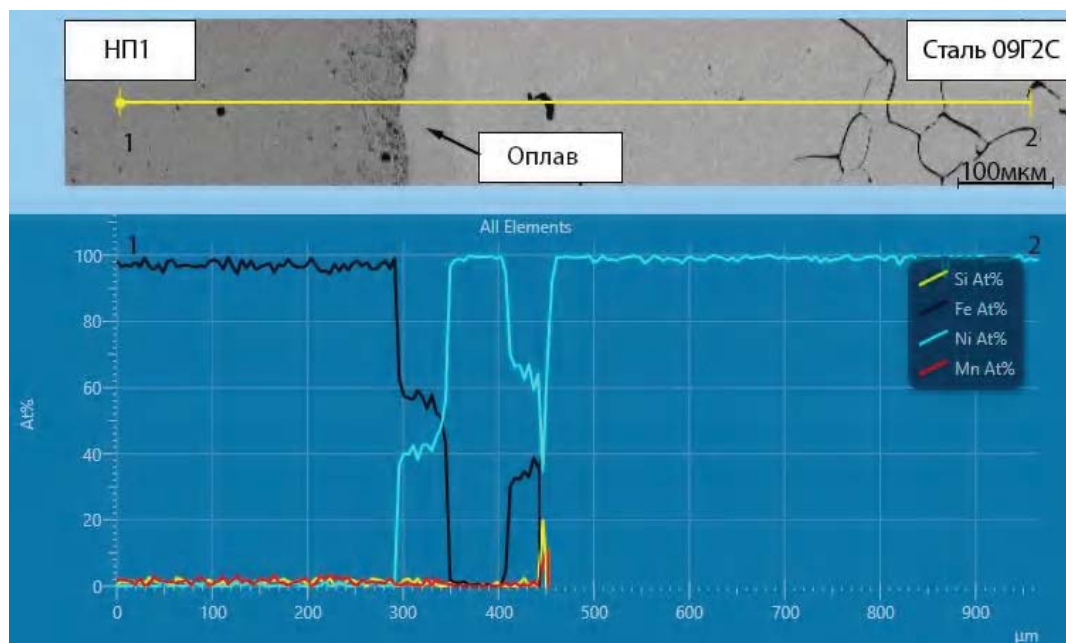
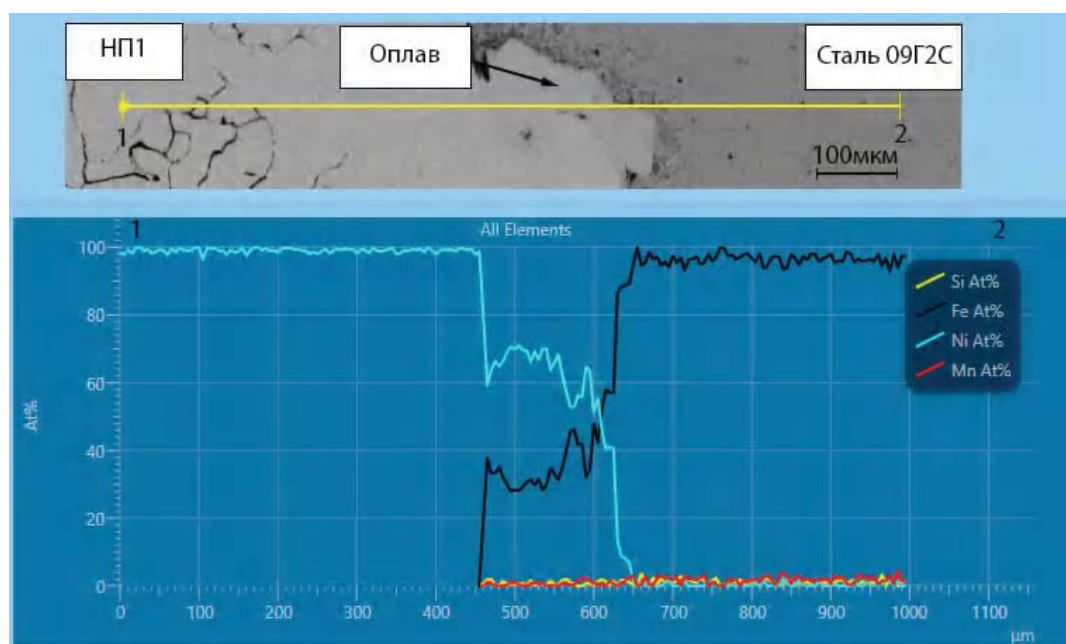
*a**б*

Рис. 7. Изменение распределения химических элементов в околошовной зоне после отжига:
a – в сечении находятся фрагменты стали в никеле и оплав; *б* – в сечении только оплав

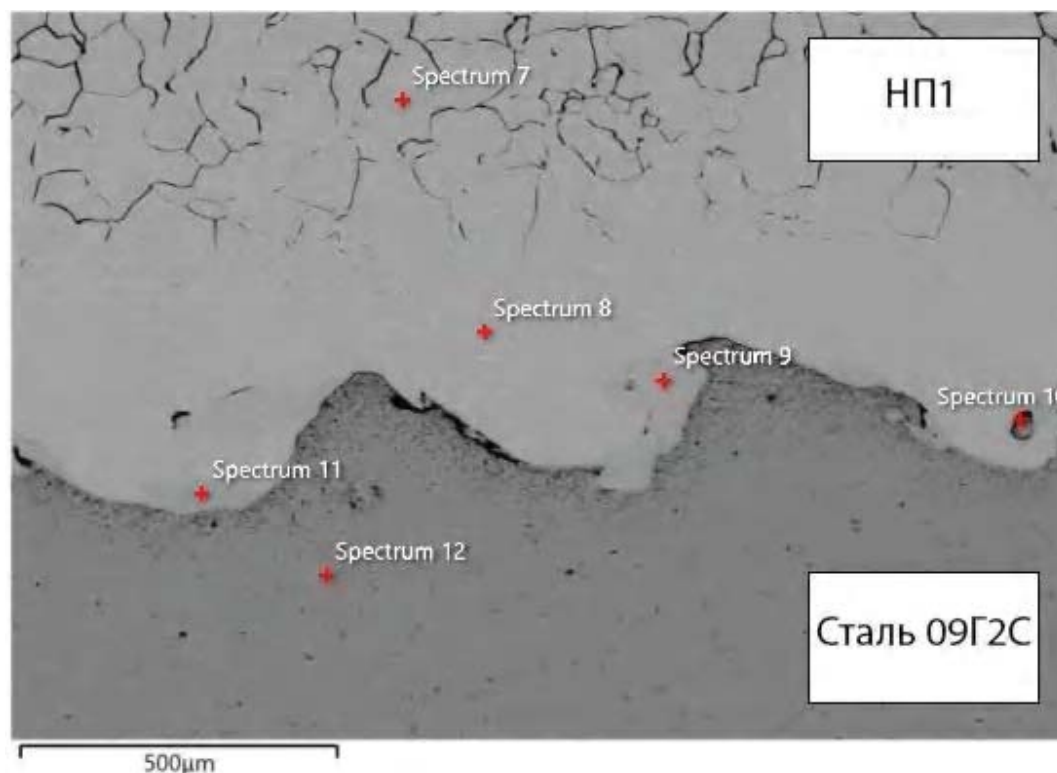


Рис. 8. Микроструктура зоны соединения никель НП1-сталь 09Г2С после СВ и последующего отжига при температуре 680 °С (съемка с использованием детектора BSE) с указанием точек, в которых определялся химический состав.

Точка Spectrum 10 – стальной фрагменте в никеле, точки Spectrum 9, 11 – локальные участки взаимодействия компонентов никеля и стали

Таблица 2

Химический состав в отдельных точках микроструктуры (рис. 8)

Точка	Содержание элемента, ат.%			
	Ni	Fe	Mn	Si
Spectrum 7	100	–	–	–
Spectrum 8	100	–	–	–
Spectrum 9	68,38	30,60	0,47	0,55
Spectrum 10	0,50	96,58	1,69	1,23
Spectrum 11	40,19	57,93	1,05	0,83
Spectrum 12	–	97,38	1,57	1,05

Точка Spectrum 10 соответствует фрагменту стали в никеле, ее химическому составу. Химический состав в точках Spectrum 9, 11 показывает одновременное существование в оплавах компонентов никеля и стали. Различия в химических составах оплавов связана с варьированием степени пластической деформации и различной вовлеченностью в оплав участков никеля и стали, имеющие близкие температуры плавления (1455 °С у никеля и 1539 °С у железа).

Интенсивного взаимодействия между никелем и сталью после отжига при температуре 680 °С не наблюдается. Однако присутствуют

участки с отделившимися от основы фрагментами стали, которые образовались в процессе сварки взрывом.

Выводы

1. Сварка взрывом биметалла никель НП1-сталь 09Г2С позволяет формировать надежное соединение с характерным для сварки взрывом волновым профилем и образованием на гребнях волн вихревых зон. Дефектов кристаллизационного происхождения (усадочная пористость, кристаллизационные трещины) не обнаружено.

2. Результаты энергодисперсионного анализа показали, что в зонах соединения с оплавами

и фрагментами стали в никеле, как после сварки взрывом, так и после отжига, имеет место неоднородное распределение химических элементов. При отсутствии оплавов видимого взаимодействия между никелем и сталью с образованием твердых растворов не наблюдается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пустов, Ю. А.* Перспективные коррозионно-стойкие материалы и технологии защиты металлов от коррозии / Ю. А. Пустов. – М. : МИСиС, 2010. – 69 с.
2. *Жарский, И. М.* Коррозия и защита металлических конструкций и оборудования / И. М. Жарский, Н. П. Иванова, Д. В. Куис, И. А. Свидунович. – Минск : Вышейшая школа, 2012. – 303 с.
3. *Мальцева, Г. Н.* Коррозия и защита оборудования от коррозии / Г. Н. Мальцева. – Пенза : Издательство Пензенского государственного университета, 2015. – 88 с.
4. *Буторин, П. Б.* Выбор коррозионностойких конструкционных материалов для оборудования получения каустической соды / П. Б. Буторин, Ю. Б. Данилов, В. С. Бобрин // Южно-сибирский научный вестник. – 2021. – № 2 (36). – С. 23–29.
5. *Лысак, В. И.* Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 544 с.
6. *Трыков, Ю. П.* Диффузия в слоистых композитах : монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 403 с.
7. *Рябов, В. Р.* Сварка разнородных металлов и сплавов / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. – М. : Машиностроение, 1984. – 239 с. ; ил.
8. *Гуревич, Л. М.* Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва : Металлургиздат, 2016. – 346 с.
9. *Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник. В 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лакишева. – Т. 2. – 1997. – 1024 с.*