

Дьяченко О. В., Кардаполова М. А., Криуша С. М.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Изучено влияние параметров лазерной обработки на состав фаз порошкового покрытия из нержавеющей стали после лазерного легирования карбидом бора и аморфным бором. Выявлен механизм упрочнения легированного покрытия из AISI 316Lsi.

Среди процессов изготовления и восстановления деталей машин все более важную область начинают занимать процессы гиперзвуковой металлизации порошковыми материалами. Это обусловлено несколькими причинами, в частности, тем, что данный метод позволяет наносить покрытия из широкой номенклатуры материалов [1–3].

Перспективным методом нанесения покрытий из нержавеющей стали является плазменное напыление с последующим лазерным переплавом, с дополнительным легированием.

Свойства зоны легирования зависят от концентрации легирующих элементов и получения фаз различной степени стабильности и дисперсности, образующихся в процессе охлаждения. Режимы лазерного облучения: плотность мощности излучения и его диаметр, а также концентрация легирующих компонентов в обмазке определяют строение и состав зоны термического влияния [4, 5].

Целью работы является изучение влияния скорости лазерной обработки и состава легирующих материалов на микроструктуру и фазовый состав покрытий из нержавеющей стали.

Методика исследования. Исходные поверхности образцов из стали 3 подвергли дробеструйной обработке, а затем напылили методом гиперзвуковой металлизации (ГМ) нержавеющей сталь AISI 316LSi. Далее на образцы нанесли аморфный бор и B_4C и в качестве связующего использовали 3 % раствор клея «АГО» в ацетоне, а часть образцов оставили без легирования. Толщина покрытий поддерживали постоянной, и составила около 0,6 мм, измеряли магнитным толщиномером МТ-40НС. Обработку поверхности проводили с использованием CO_2 -лазера непрерывного действия «Комета-2» [6].

Изучение микроструктуры покрытий и основы композиционного материала проводили при различном увеличении на сканирующем электронном микроскопе MARKO VegaII^{LMU}. Для рентгеноспектрального микроанализа использовали дифрактометр ДРОН-3,0.

Результаты и обсуждение. Был проведен элементный анализ на электронном микроскопе MARKO VegaII LMU на исследование химического состава элементов покрытия.

В спектре 1 СтЗ представлено покрытие из нержавеющей стали AISI 316Lsi + B_4C (рис. 1).

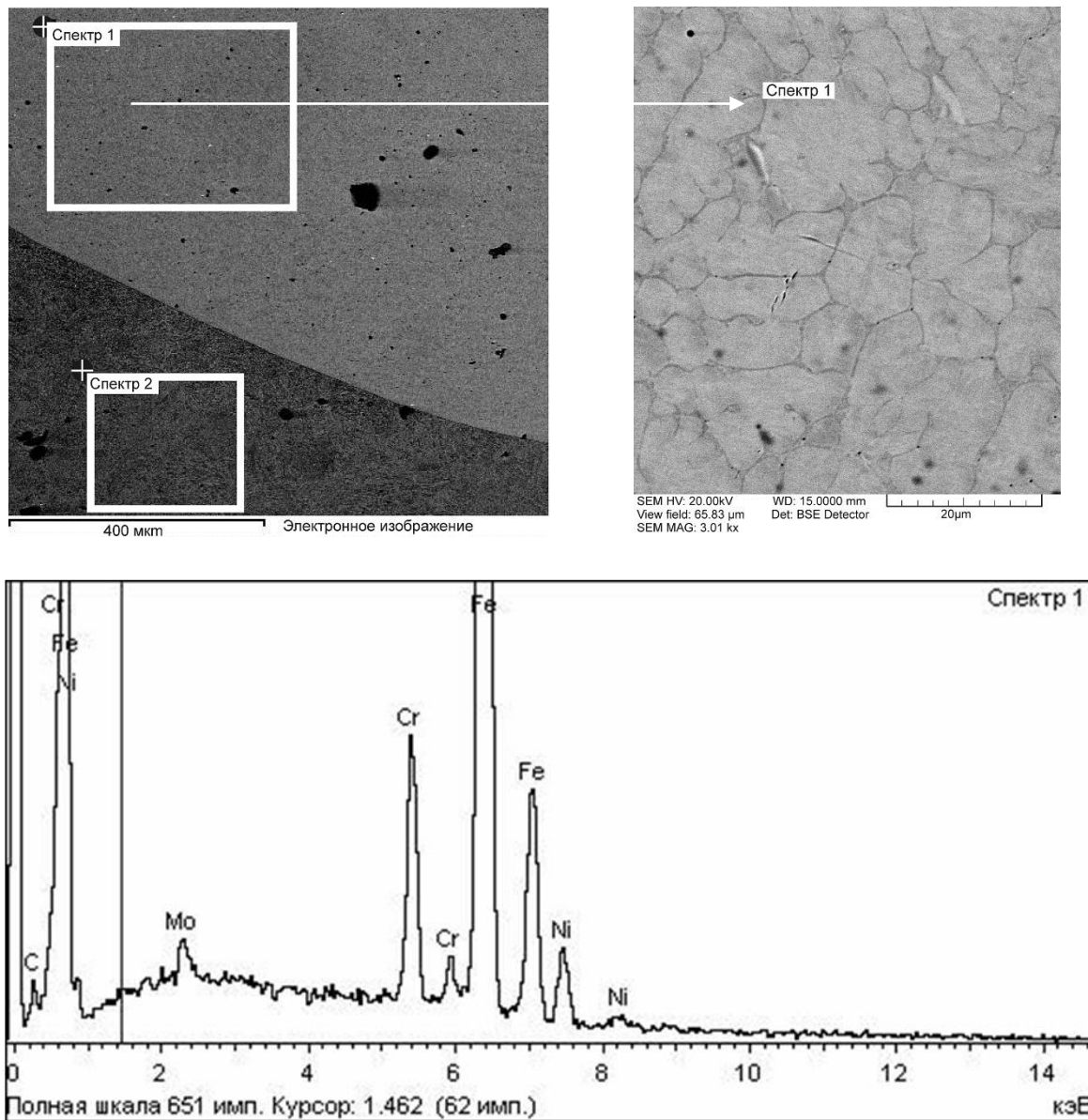


Рис. 1. Распределение химических элементов в спектре 1 в покрытии на основе нержавеющей стали AISI 316Lsi + B_4C

Расшифровка элементного состава, а также количественный состав химических элементов, выявленных в спектре I в процентном отношении, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Распределение химических элементов в покрытии AISI 316Lsi + B_4C

Спектр	В статике	C, %	Si, %	Cr, %	Mn, %	Fe, %	Ni, %	Mo, %	Итого
Спектр 1	Да	3,44	–	6,70	–	82,88	5,42	1,56	100
Спектр 2	Да	7,51	0,12	0,04	0,64	91,68	–	–	100
Макс.	–	7,51	0,12	6,70	0,64	91,68	5,42	1,56	–
Мин.	–	3,44	0,12	0,04	0,64	82,88	5,42	1,56	–

Для исследования химического состава покрытия на основе нержавеющей стали AISI 316Lsi легированной B_4C был проведен элементный анализ в спектре 2 (рис. 2).

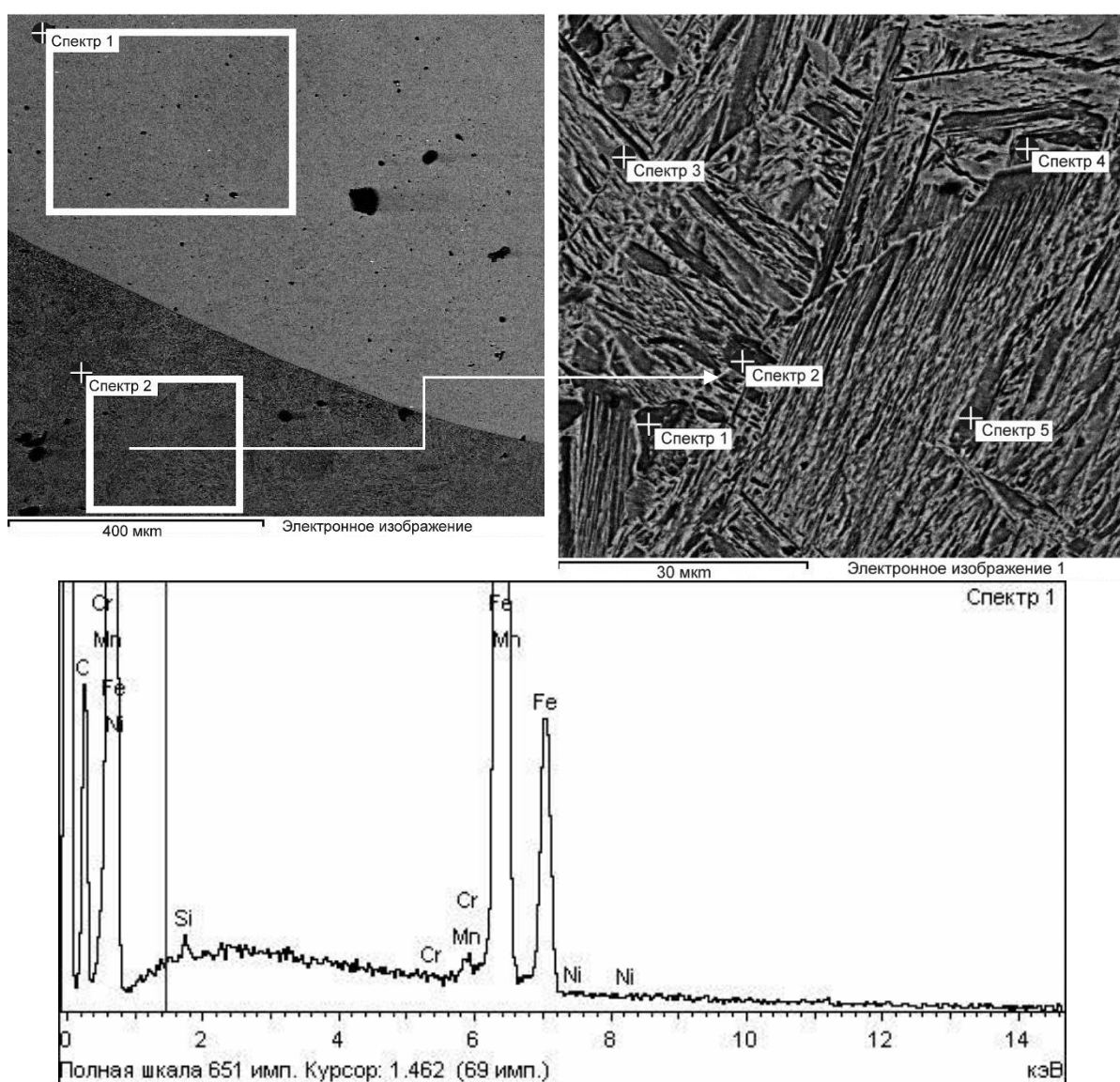


Рис. 2. Распределение химических элементов в спектре 2 на основе нержавеющей стали AISI 316Lsi + B_4C

Расшифровка элементного состава, а также количественный состав химических элементов, выявленных в спектре 2 в процентном отношении, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Распределение химических элементов в покрытии AISI 316Lsi + B_4C

Спектр	В статике	C, %	Si, %	Cr, %	Mn, %	Fe, %	Ni, %	Mo, %	Итого
Спектр 1	Да	21,38	0,17	0,09	0,51	77,67	0,19	–	100
Спектр 2	Да	21,26	0,10	–	0,59	78,00	0,05	–	100
Спектр 3	Да	14,22	0,10	0,02	0,55	85,02	0,09	–	100
Спектр 4	Да	13,86	0,14	–	0,54	85,46	–	–	100
Спектр 5	Да	19,15	0,12	0,08	0,64	80,00	–	–	100
Макс.	–	21,38	0,17	0,09	0,64	85,46	0,19	–	–
Мин.	–	13,86	0,10	0,02	0,51	77,67	0,05	–	–

Исследовали элементный состав на границе зерен покрытия AISI 316Lsi + B_4C (рис. 3).

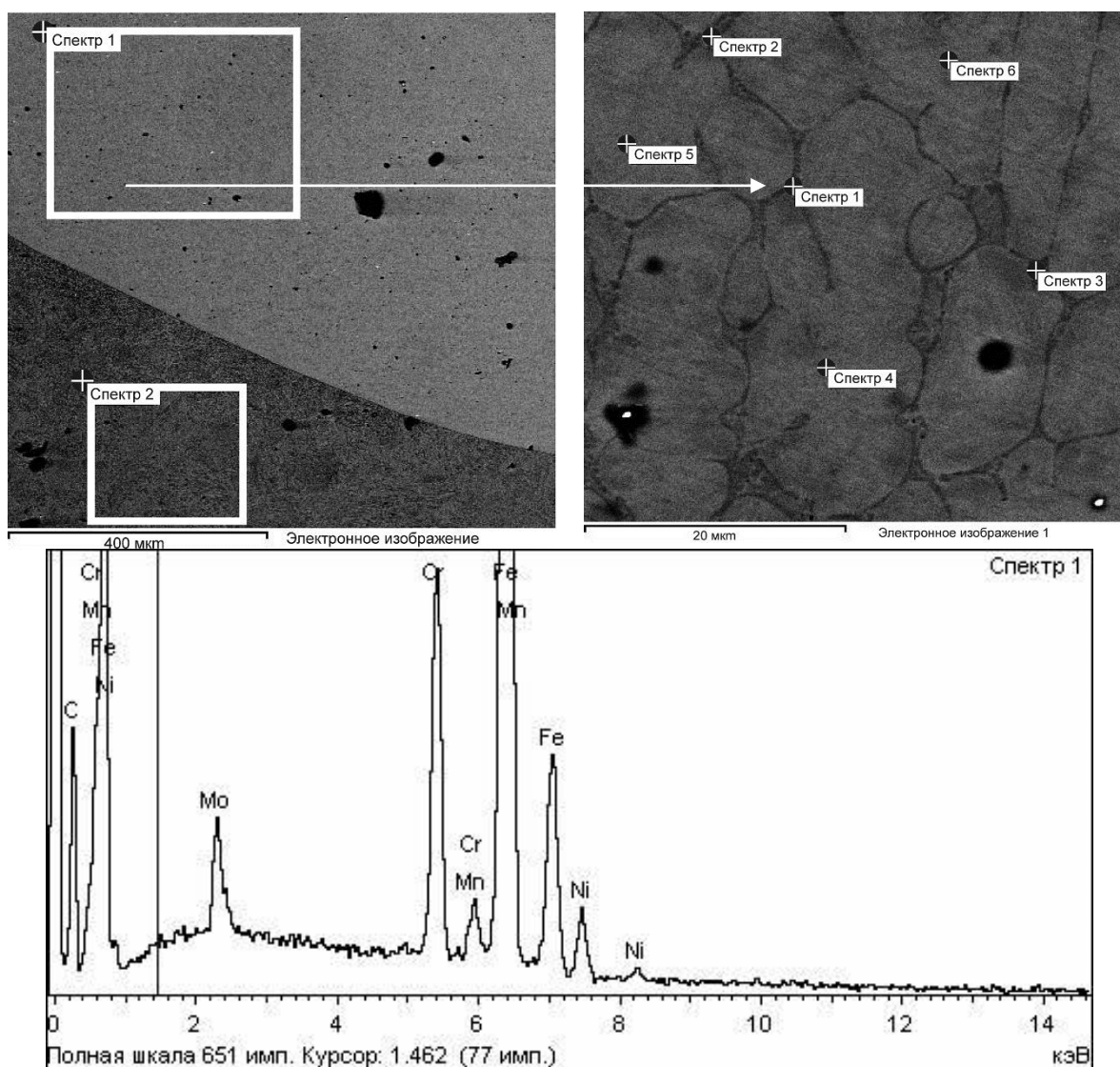


Рис. 3. Распределение химических элементов на границе зерен покрытия нержавеющей стали AISI 316Lsi + B_4C

Расшифровка элементного состава, а также количественный состав химических элементов на границе зерен покрытия AISI 316Lsi + B_4C в процентном отношении, представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Распределение химических элементов на границе зерен AISI 316Lsi + B_4C

Спектр	В статике	C, %	Si, %	Cr, %	Mn, %	Fe, %	Ni, %	Mo, %	Итого
Спектр 1	Да	19,57	–	8,72	0,11	64,57	3,81	3,23	100
Спектр 2	Да	19,20	0,07	9,53	0,07	62,98	4,00	4,16	100
Спектр 3	Да	17,95	–	8,05	0,21	67,56	3,94	2,30	100
Спектр 4	Да	16,67	–	4,87	0,09	72,46	5,09	0,82	100
Спектр 5	Да	15,49	0,07	5,34	0,08	73,64	4,75	0,63	100
Спектр 6	Да	15,10	0,05	5,04	0,11	74,06	5,00	0,65	100
Макс.	–	19,57	0,07	9,53	0,21	74,06	5,09	4,16	–
Мин.	–	15,10	0,05	4,87	0,07	62,98	3,81	0,63	–

Для изучения состава покрытия из нержавеющей стали AISI 316Lsi после лазерного легирования B_{AM} (рис. 4) был проведен элементный анализ (рис. 5).

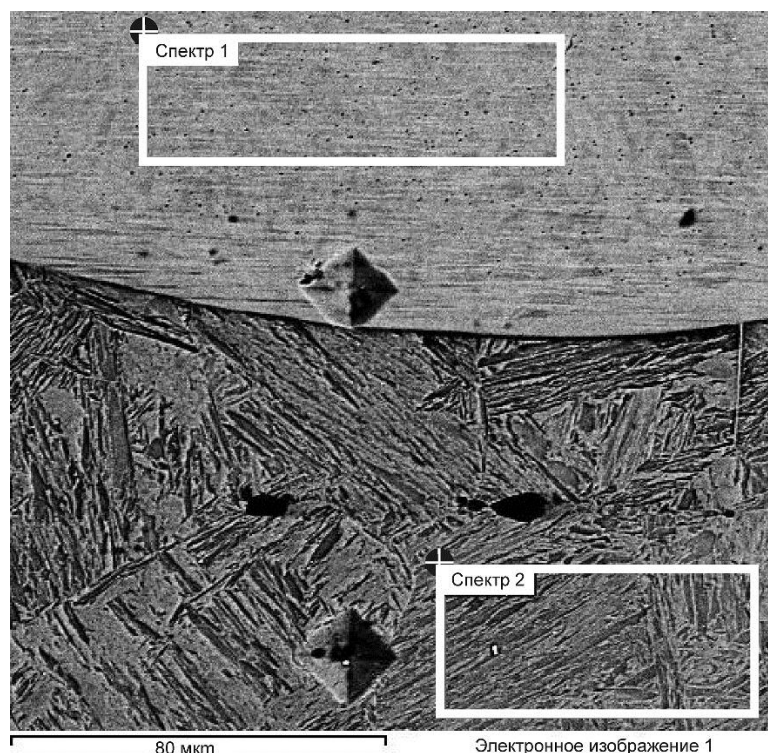


Рис. 4. Электронное изображение покрытия из нержавеющей стали AISI 316Lsi + B_{AM}

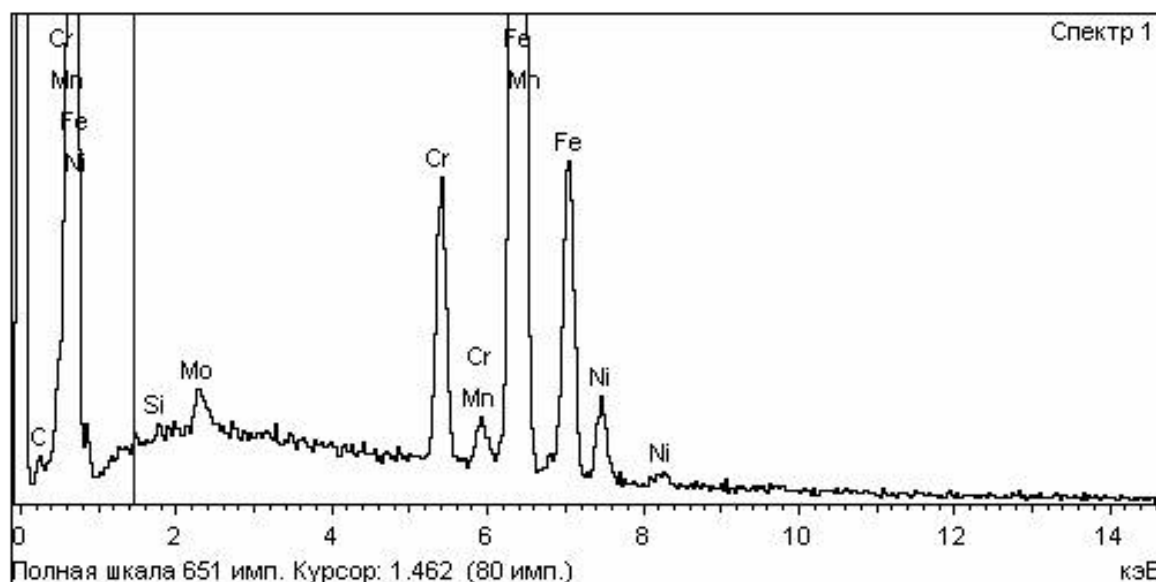


Рис. 5. Распределение химических элементов в спектре покрытия из нержавеющей стали AISI 316Lsi + B_{AM}

Расшифровка элементного состава, а также количественный состав химических элементов в спектре 1 и спектре 2 покрытия AISI 316Lsi + B_{AM} в процентном отношении, представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Распределение химических элементов в спектре 1 и спектре 2 покрытия AISI 316Lsi + B_{AM}

Спектр	В статике	C, %	Si, %	Cr, %	Mn, %	Fe, %	Ni, %	Mo, %	Итого
Спектр 1	Да	1,51	0,11	5,64	0,46	86,42	4,49	1,36	100
Спектр 2	Да	6,04	0,07	–	0,61	93,28	–	–	100
Макс.	–	6,04	0,11	5,64	0,61	93,28	4,49	1,36	–
Мин.	–	1,51	0,07	5,64	0,46	86,42	4,49	1,36	–

Теперь рассмотрим, фазовый состав сварочной нержавеющей проволоки AISI 316Lsi.

Результаты определения фазового состава сварочной нержавеющей проволоки AISI 316Lsi для напыления под последующее лазерное легирование приведены в табл. 5 и отображены на рис. 6.

Таблица 5 – Фазовый состав сварочной нержавеющей проволоки AISI 316LSI в состоянии поставки

Фазы	Количество легирующих элементов, %
α -Fe	26,9
γ -Fe	40,2
Ni	12
Cr	16
Карбиды Mo, Cr, Ni	2,4
Силициды, фосфаты	2,5

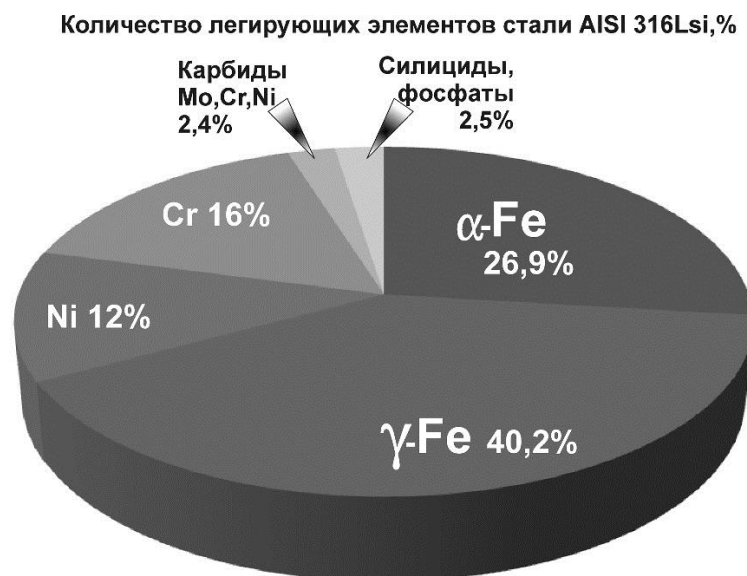


Рис. 6. Диаграмма распределения количество легирующих элементов сварочной нержавеющей проволоки AISI 316Lsi

Рентгеновский фазовый анализ покрытия из нержавеющей стали AISI 316Lsi без лазерного легирования на рис. 7.

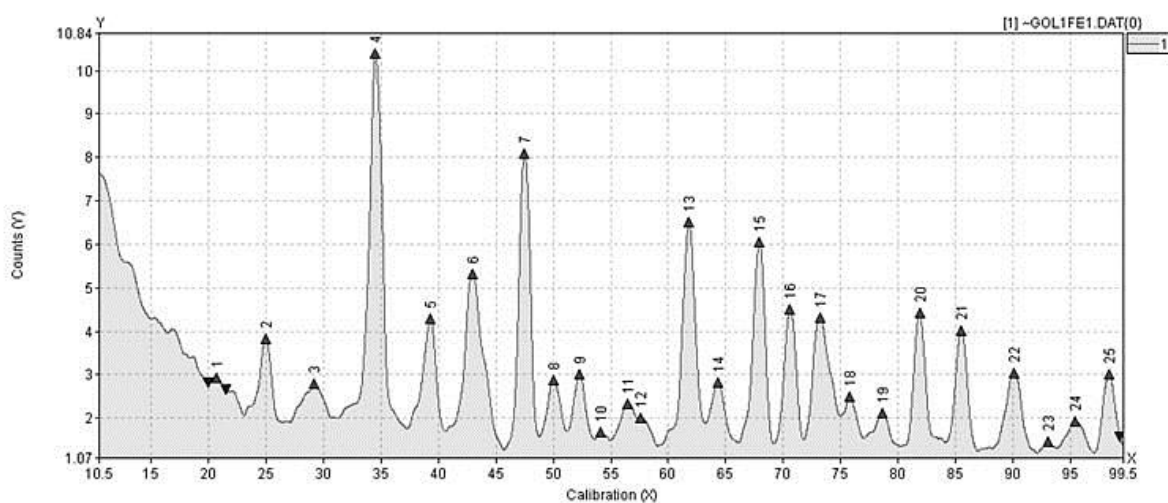


Рис. 7. Результаты фазового анализа напыленного покрытия AISI 316Lsi без лазерного легирования

Рентгеновский фазовый анализ легированного покрытия B_4C на основе из нержавеющей стали AISI 316Lsi на рис. 8.

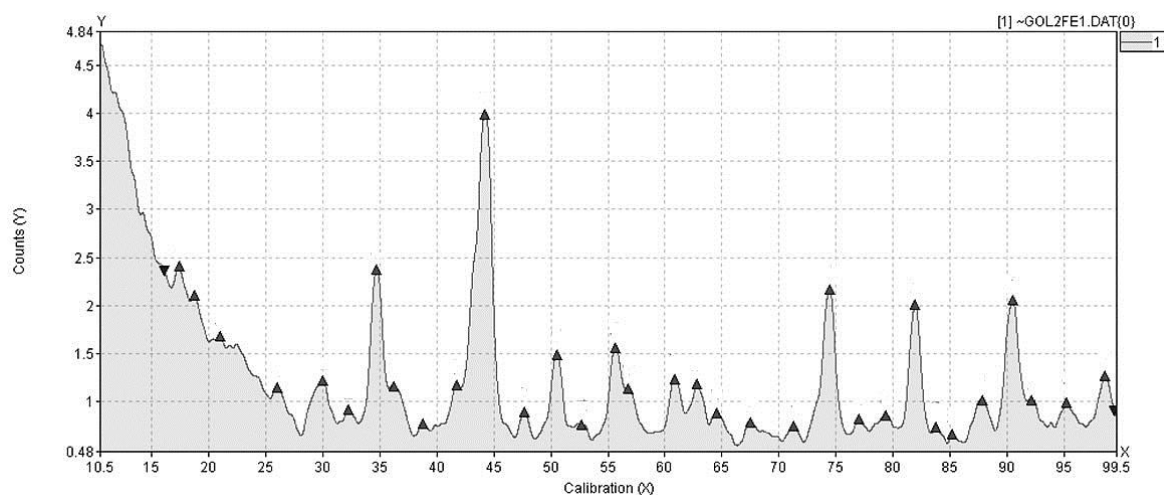


Рис. 8. Результаты фазового анализа легированного покрытия B_4C на основе нержавеющей стали AISI 316Lsi

Полученные результаты показывают, что основной фазовый состав напыленного слоя (рис. 7) составляет γ -Fe (аустенит), δ -FeCr и карбиды $(CrFe_7)C_3$. Можно предположить, что при гиперзвуковой металлизации происходит выгорание и окисление в виде черных прослоек (на фотографии электронной микроскопии выделено) на рис. 9.

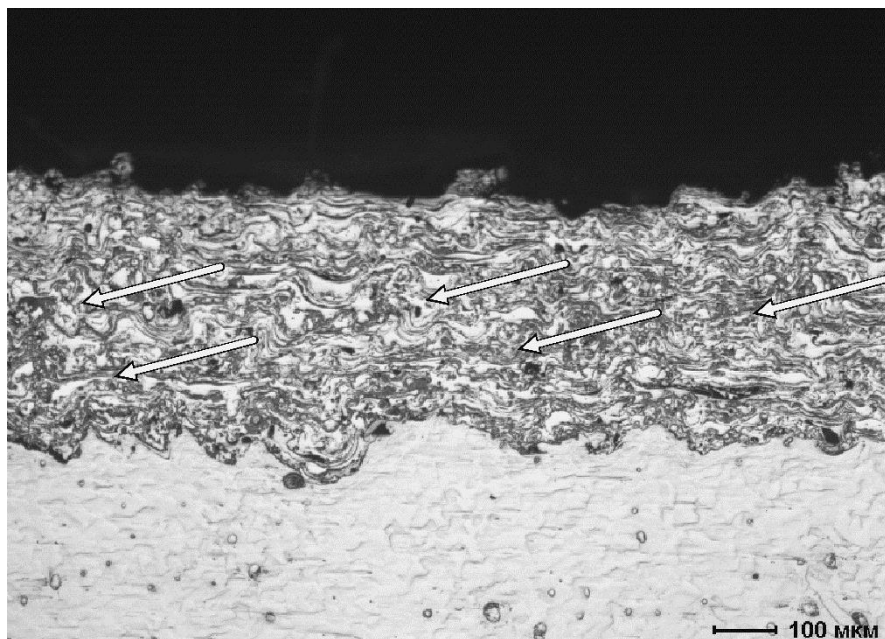


Рис. 9. Напыленный слой нержавеющей стали AISI 316Lsi без легирования

После лазерного легирования состав легированного слоя меняется и состоит из α -Fe, карбидов хрома $Cr_{23}C_6$ и исходных карбидов бора B_4C . Это видно из расшифровки спектра 1 на рис. 1.

Можно сделать вывод, что при лазерном оплавлении имеются остаточные карбиды бора и углерод при распаде B_4C взаимодействует с имеющимся в напыленном слое хромом и образует $Cr_{23}C_6$.

При легировании произошел переход дельта железа $\delta-Fe$ в $\alpha-Fe$.

Мартенситная структура способствует упрочнению легированного слоя.

Остаточные карбиды B_4C напыленного покрытия при нагреве в процессе лазерного легирования распадаются и углерод вступает с хромом во взаимодействие и переходят в Cr_3C_6 .

При такой технологии получения покрытия в процессе легирования идет упрочнение покрытия за счет Cr и α -железа – происходит модифицирование поверхностного слоя. При этом происходит изменение кристаллической решетки из $\gamma-Fe$ (аустенит) в $\alpha-Fe$ (мартенсит).

Выводы. Проведенный элементный анализ на исследование химического состава покрытия после лазерного легирования B_4C и B_{AM} показал максимальное и минимальное значение содержания элементов в покрытии в зависимости от вида легирующей обмазки.

При сравнении фазового состава покрытия 316LSI после лазерного оплавления без легирования и после лазерного легирования B_4C получено, что в процессе легирования идет упрочнение покрытия за счет Cr и α -железа. При этом происходит модифицирование поверхностного слоя и изменение кристаллической решетки из $\gamma-Fe$ (аустенит) в $\alpha-Fe$ (мартенсит).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильющенко, А. Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, С. П. Кундас, Б. Форманек; под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 480 с.
2. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплоустойчивых покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов – Минск: Беларуская навука, 2006. – 363 с.
3. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
4. Катаев, В. А. Методы исследования фазового состава и свойств углеродистой стали / В. А. Катаев; науч. ред. В. О. Васьковский; М-во образования и науки рос. Федерации, урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 84 с.
5. Ziętała M. et al. The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Т. 677. – Р. 1–10.
6. Лазерное легирование покрытий из нержавеющей сталей / С. М. Криуша, О. В. Дьяченко // Тезисы докладов студентов факультета маркетинга, менеджмента, предпринимательства 75-ой студенческой научно-технической конференции БНТУ, проводимой в рамках международного молодежного форума «Креатив и инновации 2019» Минск, 22–28 мая 2019 года.

Поступила 05.03.2025