ВОПРОСЫ СВАРКИ, МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.791.927.5

DOI:10.35211/1990-5297-2021-2-249-59-64

С. А. Фастов, И. В. Зорин, В. И. Лысак, Д. А. Муругов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ МЕЖДУ НАПЛАВЛЕННЫМ ИЗНОСОСТОЙКИМ СПЛАВОМ И СТАЛЬЮ 5ХНМ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: naplavka34@yandex.ru; serheyfastov@yandex.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований наплавки на штамповую сталь 5ХНМ трех типов износо- и термостойких сплавов с применением предварительного подогрева. Оценено влияние предварительного подогрева на структуру наплавленных сплавов, а также на формирование структуры зоны термического влияния основного металла. Выявлено, что применение предварительного подогрева в рассматриваемых условиях наплавки обуславливает образование структурной неоднородности зоны термического влияния основного металла, проявляющейся в переменном распределении хрома и молибдена.

Ключевые слова: наплавка, колеблющийся электрод, наплавочные сплавы, структура металла, твердость, зона термического влияния, порошковая проволока.

S. A. Fastov, I. V. Zorin, V. I. Lysak, D. A. Murugov

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PREHEATING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES TRANSITION ZONE BETWEEN HARDFACED WEAR-RESISTANT ALLOY AND 55NiCrMoV5 STEEL

Volgograd State Technical University

The results of the experimental studies hardfacing of the 55NiCrMoV5 die steel of the three types of wear and heat-resistant alloys with preheating are presented. The effect of the preheating on the structure hardfaced alloys as well as on the heat affected zone formation of the base metal is estimated. It is revealed that the use of preheating under the considered conditions of surfacing causes the formation of a structural heterogeneity of the heat-affected zone of the base metal, which manifests itself as a variable distribution of chromium and molybdenum.

Keywords: surfacing, hardfacing, cladding, filler metal, metal structure, hardness, heat affected zone, flux-cored wire.

Введение

Известно, что металлургическое оборудование, эксплуатирующееся в условиях циклического температурного и силового воздействия (ЦТСВ) выходит из строя преимущественно по причине образования на его рабочих поверхностях трещин от термической усталости [1], интенсифицирующих изнашивание металла. Как правило, такие дефекты не распространяются на большую глубину [2]. Поэтому существует возможность удалить с использова-

нием механической обработки слой поврежденного металла и произвести ремонтную наплавку более износо- и термически стойкими сплавами (ИТС). Технологически более целесообразно применение изготовительной наплавки инструмента, что повышает изначальную стойкость оборудования к ЦТСВ [1, 3]. В качестве основного металла (ОМ), который по отношению наплавленному металлу (НМ) является несущим, получили широкое применение углеродистые конструкционные стали,

© Фастов С. А., Зорин И. В., Лысак В. И., Муругов Д. А., 2020.

* Исследования выполнены в рамках государственного задания № 0637-2020-0006, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-48-340010.

например сталь 40, 45, 40X и т.п. и инструментальные низколегированные стали, например распространенная сталь 5ХНМ [4]. Однако из-за повышенного содержания углерода при наплавке в зоне термического влияния (ЗТВ) таких сталей могут образовываться закалочные структуры, провоцирующие образование трещин [5]. Также вследствие существенных различий в системах легирования основного металла и высоколегированного износостойкого наплавленного металла вблизи линии сплавления могут образовываться прослойки в виде науглероженной и обезуглероженной зоны, которые могут ускорить разрушение наплавленного изделия [6-8]. Помимо этого, некоторые износостойкие сплавы склонны к образованию горячих и холодных трещин в процессе наплавки и после охлаждения [1, 5, 9, 10]. Одной из самых эффективных технологических мер по предотвращению образования закалочных структур в металле ЗТВ и холодных трещин является предварительный подогрев (ПГ) наплаваемого изделия. Его положительное влияние проявляется в уменьшении скорости охлаждения как в ЗТВ основного металла, так и в наплаваемом металле, что приводит к уменьшению в нем уровня сварочных напряжений [5, 11-15]. Эффект снижения остаточных напряжений также способствует увеличению ресурса работы инструмента при ЦТСВ [16].

Так, например, при наплавке порошковой самозащитной проволокой HARDFACE BNC (наплавленный сплав 250X12Г2Б5Р2) применение предварительного подогрева способствовало снижению количества трещин в наплавленном металле, но не позволило полностью их избежать. Проведение ПГ в интервале от 25 °С до 400 °С не повлияло на изменение структуры наплавленного металла и его твердости, а его износостойкость увеличилась только при повышении температуры подогрева до 200 °С

[17]. Уменьшение твердости при нагреве выше 200 °С было также обнаружено авторами в работе [15] при наплавке порошка Fe60 (наплавленный сплав 420X27Н5В2Р2), что, по мнению авторов, связано с укрупнением размера зерен при увеличении температуры ПГ. Однако в научной литературе до сих пор недостаточно изучено влияние предварительного подогрева на структуру и эксплуатационные свойства износостойких сплавов, предназначенных для наплавки валков прокатных станков, роликов машин непрерывного литья заготовок, штампов горячей штамповки и другого инструмента.

Поэтому целью данной работы являлось изучение влияния предварительного подогрева на структуру ИТС, а также на формирование структуры зоны термического влияния основного металла.

Методики исследований и эксперимент

Для оценки влияния ПГ на структуру и свойства наплавленных сплавов производили наплавку трех типов ИТС посредством порошковых проволок $\varnothing$ 2,8 мм, изготовленных в лабораторных условиях. Электродуговую наплавку производили на пластину из штамповой стали 5ХНМ с габаритными размерами 70х60х15 мм. Выбор стали 5ХНМ в качестве основного металла обусловлен ее широким применением для изготовления технологического инструмента для горячего деформирования металла [4, 18]. Для обеспечения имитации процесса наплавки на реальное массивное изделие пластину для наплавки предварительно приваривали к пластине толщиной не менее 30 мм из низкоуглеродистой стали. Для выведения кратера сварочной ванны использовали стальную планку толщиной 15 мм. Схематичное изображение подготовленного для наплавки изделия представлено на рис. 1. Химический состав основного и наплавленного металла приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав наплавленного и основного металла

Индекс сплавов	Условное обозначение сплавов	Легировующие элементы, % масс.								
		C	Cr	W	Ni	Mo	Ti	V	Mn	Si
1	12X15H4M3AT	0,06	14	—	3,92	3,11	0,51	—	0,3	0,09
2	25X5ФМС	0,27	5,7	0,45	0,16	1,86	—	0,5	0,9	0,58
3	3X2B8ФГС	0,25	2,53	10,3	—	—	—	0,3	0,97	0,64
4	5ХНМ	0,55	0,71	—	1,66	0,2	Cu = 0,12	—	0,46	0,22

Рис. 1. Схема монтажа пластины ОМ перед наплавкой

Наплавку осуществляли в среде инертного газа Ar (технически чистый 99,9%) на сварочном автомате A2 MiniMaster (ESAB), имеющем механизм колебания электрода в поперечной плоскости. Применение колеблющегося электрода давало возможность при небольшой величине проплавления основного металла получить широкий валик НМ, что обеспечивало необходимый химический состав за меньшее количество слоев. Другое преимущество наплавки колеблющимся электродом заключается в возможности перераспределить тепловую мощность дуги по объему сварочной ванны, что обеспечивает более «мягкий» термический цикл, который оказывает положительное влияние на качество НМ [1, 19]. Параметры режима наплавки: $I_{св} = 280...320$ А, $U_d = 25...27$ В, $v_{св} = 10...12$ м/ч, размах колебаний $\pm 7,5$ мм, частота колебаний – 1,5 Гц, вылет электрода относительно токоподводящего наконечника 20...25 мм, расход газовой смеси – 17...20 л/мин, полярность на электроде «+», количество слоев НМ – 2. Для исследований из наплавленных сплавов было изготовлено 6 образцов, из которых 3 были получены без предварительного подогрева (индексы сплавов 1-ПГ20, 2-ПГ20 и 3-ПГ20 в соответствии с порядком упоминания сплавов в таблице 1) и 3 образца, наплавленные с предварительным подогревом (индексы сплавов 1-ПГ300, 2-ПГ300 и 3-ПГ300 соответственно).

Температура ПГ пластин составляла 300 °С. В процессе наплавки межпроходная температура варьировалась в диапазоне 300...350 °С. Такая температура является общепринятой

в практике наплавки ИТС на трудносвариваемые стали [10, 20]. Перед наложением следующего валика, образцы, выполнявшиеся без ПГ, охлаждали до температуры окружающей среды на спокойном воздухе.

На поверхности наплавленных валиков отсутствовали дефекты в виде пор, трещин или шлаковых включений. Поверхность валиков, выполненных с величиной взаимного перекрытия около 50 % гладкая, без грубой чешуйчатости. Величина углубления между соседними валиками составляла не более 1,5 мм.

Определение химического состава НМ осуществляли с помощью оптико-эмиссионного спектрометра Oxford Instruments PMI-MASTER Pro. Измерение твердости на поверхности наплавленного металла производили по методу Роквелла на твердомере ТН-500.

Вследствие существенных различий в химическом составе основного и наплавленного металла производили их раздельное химическое травление. Для НМ применяли раствор хлористого железа $FeCl_3 + HCl + H_2O$, а для ОМ использовали 4 % раствор HNO_3 в C_2H_5OH . Защиту металла от воздействия реактива осуществляли нанесением на поверхность, не предназначенную для травления, лака на основе ацетилтрибутилцитрата целлюлозы. Исследование микроструктуры производили на световом оптическом микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40 MAT. Оценку распределения химических элементов производили с помощью энергодисперсионного анализа на электронном растровом микроскопе VERSA-3D.

Результаты и обсуждение

Таблица 2

Твердость на поверхности наплавленного металла

Индекс образца	Твердость НМ, HRC
1-ПГ20	18...21
2-ПГ20	43...57
3-ПГ20	47...49
1-ПГ300	7...10
2-ПГ300	44...51
3-ПГ300	44...48

Исследованиями установлено, что во втором слое наплавленного металла структура сплава 1-ПГ300 характеризуется повышенной дисперсностью и отсутствием четко выраженных границ ферритных зерен, характерных для образца 1-ПГ20. Наплавленный сплав 2-ПГ300 характеризуется наличием мартенсита с некоторой долей ферритной фазы, окружающей «островки» мартенсита. Однако при больших увеличениях в мартенситной составляющей фиксируются игольчатые выделения, которые, вероятно, являются карбидами хрома и ванадия. Структура наплавленных сплавов 3-ПГ20 и 3-ПГ300 представляет собой эвтектоид с выделениями бейнита и включениями карбидов вольфрама и ванадия.

Значения твердости НМ представлены в табл. 2, из них следует, что подогрев не привел к заметным изменениям твердости наплавленных сплавов 25Х5ФМС (2-ПГ300) и 3Х2В8ФГС (3-ПГ300). Значительное уменьшение твердости наплавленного сплава 12Х15Н4М3АТ (1-ПГ300) свидетельствует о высокой чувствительности аустенитно-мартенситной матрицы ко времени пребывания металла при повышенных температурах, а также о некотором разупрочнении сплава.

Выявлено, что структура ЗТВ всех образцов, наплавленных с предварительным подогревом, представляет собой чередование вертикально ориентированных светлых и темных зон, образующих полосчатое строение (рис. 2, б). Анализ распределения твердости показал, что твердость светлых участков больше (450–600 НВ), чем – темных (до 300 НВ), что объясняется различием в содержании легирующих элементов между данными участками структуры (рис. 3). В светлых участках в среднем в 1,4 раза выше содержание хрома, в 1,1 раза больше никеля и в 3 раза больше молибдена, по сравнению с содержанием данных элементов в темных участках структуры (табл. 3).

Рис. 2. Структуры ЗТВ основного металла (увеличение х200): наплавка с ПГ (а), наплавка без ПГ (б)

Рис. 3. Распределение хрома (а) и молибдена (б) в ЗТВ основного металла при наплавке с предварительным подогревом

Таблица 3

Содержание легирующих элементов в участках ЗТВ основного металла образца 3-ПГ300

Номер участка	Усредненное содержание основных легирующих элементов, масс.%		
	Mo	Cr	Ni
Участок 1 (светлый)	0,3	0,9	1,3
Участок 2 (темный)	0,1	0,6	1,1

Такое распределение легирующих элементов объясняется их ликвацией, развитию которой способствует увеличение времени пребывания основного металла при повышенных температурах. Формирующееся в зоне термического влияния полосчатое строение металла можно рассматривать как результат наследования структурой ее исходной дендритной ликвации, образующейся на стадии изготовления отливки стали 5ХНМ и сохраняющейся по данным работы [21] и при последующей высокотемпературной ковке.

Выводы

1. Установлено, что применение при наплавке колеблющимся электродом износостойких сплавов на сталь 5ХНМ предварительного подогрева обусловило формирование структурной неоднородности в зоне термического влияния основного металла, представляющую собой чередующиеся участки с различным содержанием хрома и молибдена.

2. Выявленная особенность строения зоны термического влияния позволяет рассматривать ее как металл с переменными свойствами, сочетающими прочность и пластичность, что способствует повышению стойкости участков структуры, находящихся вблизи условной линии сплавления, к циклическим температурно-силовым нагрузкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов, Г. Н. Наплавка износостойких сплавов на пресовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей : монография / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак. – Волгоград : ВолгГТУ, 2005. – 284 с.
2. Бабинцев, А. А. Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков / А. А. Бабинцев, И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев, И. И. Рябцев, Г. Н. Гордань // Автоматическая сварка. – 2014. – № 5. – С. 17–21.
3. Kashani H., Amadeh A., Vatanara M. R., Improvement of wear resistance of hot working tool steel by hardfacing. Part 2 – case study // Material science and technology. – 2008. – Vol. 24 – № 3. – С. 356–360.

4. Тылкин, М. А. Штампы для горячего деформирования металлов / М. А. Тылкин, Д. И. Васильев, А. М. Погаев. – М. : Высшая школа, 1977. – 496.
5. Фрумин, И. И. Технология механизированной наплавки / И. И. Фрумин, Ю. А. Юзвенко, Е. И. Ленайчук. – М. : Высшая школа, 1964. – 304 с.
6. A. Roshanghias, M. Barzegari, A.H. Kokabi, M. Mirazizi, The effects of functionally graded material structure on wear resistance and toughness of repaired weldments / Materials and Design. – 2011. – №21. – С. 892-899.
7. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин ; под ред. Э. Л. Макарова. – М. : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2014. – 487, с.: ил.
8. Qingbao Wang, Zhuoxin Li, Yaowu Shi, Lizhi Wang, Fei Liu, Interior crack and its formation mechanism in overlaying weld of back-up rolls / Engineering Failure Analysis – 2013. – №34. – С. 268-277.
9. Bęczkowski R., Gucwa M., Defects appearing in the surfacing layers of abrasion resistant. / Archives of foundry engineering. – 2016. – №4. – С. 23-28.
10. Якушин, Б. Ф. Новый способ износостойкой наплавки деталей из легированных сталей / Б. Ф. Якушин, А. В. Сударев // Сварка и диагностика. – 2013. – № 4. – С. 50–55.
11. Winarto, Priadi, D., Effect of Preheating and Battering on Cracking Susceptibility and wear resistance of hardfaced HSLA steel deposit / Yosetsu Gakkai Ronbunshu/ Quarterly Journal of the Japan Welding Society. – 2013. – Vol. 31 №4, С. 202-205.
12. Михеев, Д. А. Оптимизация режима предварительного подогрева при восстановлении замковых соединений бурльных труб методом наплавки / Д. А. Михеев, А. П. Амосов // Экспозиция нефть газ. – 2015. – № 4. – С. 23–26.
13. Неверов, В. В. Опыт изготовления биметаллического металлообрабатывающего инструмента, используемого при производстве стального проката / В. В. Неверов, В. В. Карих // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2007. – № 7. – С. 128–130.
14. Wei Ya, Belavendram Pathiraj, Residual stresses in Stellite 6 layers clad on AISI 420 steel plates with a Nd:YAG laser. / Journal of laser applications. – 2018. – Vol. 30 – № 30. – С. 032007-1-14
15. Shi R. R., Chen S. Y., Peng Y. G., Zhang Z., Effect of preheating temperature on microstructure of Fe based alloy coating by laser direct metal deposition. / Key engineering materials. – 2016. – № 703. – С. 94-99.
16. Рябцев, И. А. Структура многослойных образцов имитирующих наплавленные инструменты для горячего деформирования металлов / И. А. Рябцев, А. А. Бабинцев, Г. Н. Гордань, И. И. Рябцев, Т. В. Кайда, Л. Т. Еремеева // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 43–47.
17. Gucwa1 M., Winczek J., Mićian M., The effect of the preheating on to properties of the wear resistant welds. / Welding technology review. – 2020. – Vol. 92. – №2. – С. 7-14.
18. Фомичев, А. Ф. Предварительная оценка условий работы штампов для горячей штамповки. / А. Ф. Фомичев, Б. А. Кривицкий, А. Е. Салиенко, Э. Е. Юргенсон // Металлообработка. – 2007. – № 37. – С. 45–47.
19. Литвиненко-Арьков, В. Б. Аргонодуговая наплавка порошковой проволокой с наночастицами TiCN поверхности оправок трубопрошивного стана : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10. / Литвиненко-Арьков В. Б.; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград. – 146 с.
20. Соколов, Г. Н. Восстановление криволинейного профиля валков трубопрокатного стана дуговой наплавкой / Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, С. Н. Цурихин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2008. – № 6. – С. 7–11.
21. Калинин, В. П. Металлография железа. В III томах. Том II. Структура сталей / В. П. Калинин ; пер. с англ. В. П. Калинина, Н. А., Зоиде и Н. В. Чаргеишвили ; под ред. Ф. Н. Тавадзе. – М. : Изд-во «Металлургия», 1972. – 284, с.: ил.