

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ПОКРЫТИЯ ИЗ Cr-Ni-Si ЧУГУНА

*Описаны характерные особенности микроструктуры покрытия, наплавленного Cr-Ni-Si чугуном «Сормайт» в магнитном поле. Установлено, что наложение магнитного поля с индукцией 28 мТ позволяет диспергировать первичную структуру покрытия за счет уменьшения размеров дендритов, эвтектических колоний, карбидов  $M_7C_3$ . Также повышается устойчивость аустенита к эвтектоидному превращению, что проявляется в уменьшении объемной доли троостита в металлической матрице.*

**Ключевые слова:** наплавка, магнитное поле, карбиды, аустенит, троостит.

### Введение

Применение магнитного поля (МП) при дуговой сварке и наплавке известно достаточно давно; например, оно описано в классических работах [1–3]. Магнитное поле позволяет перемещать и даже вращать дугу относительно шва (наплавки), что дает возможность управлять процессами наплавки, величиной зоны перегрева, формой наплавленного валика и другими параметрами [2, 3]. Кроме того, наложение МП на зону сварки (наплавки) повышает металлургическое качество (плотность) металла шва (наплавленного слоя). В работах [4, 5], отмечено снижение глубины проплавления основного металла и увеличение скорости расплавления электродной проволоки под воздействием МП. Имеются данные об измельчении структуры металла шва при сварке дугой, колеблющейся в поперечном магнитном поле [6]. Известно применение наплавки в магнитном поле для восстановления изношенных деталей [7, 8]. Несмотря на большое количество опубликованных материалов, влияние МП на фазово-структурное состояние слоев, формируемых электродуговой наплавкой, остается недостаточно изученным. Особенно это касается покрытий триботехнического назначения, состоящих из большого количества упрочняющих твердых фаз (карбидов, боридов, нитридов, и проч.). Данные покрытия по химическому составу и структуре соответствуют высоколегированным белым чугунам, содержащим в структуре с карбидные (боридные) эвтектики. Наложение магнитного поля может влиять на кристаллизацию эвтектики, предопределяя ее строение и свойства.

Целью данной работы являлось исследование влияния продольного магнитного поля на микроструктуру и свойства широко применяемого в промышленности наплавочного материала «Сормайт», соответствующего по своему химическому составу высокохромистому чугуна.

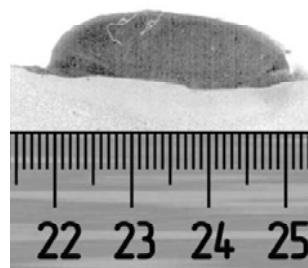
### Материал и методики исследований

Материалом исследований служило покрытие «Сормайт», полученное электродуговой наплавкой порошковой лентой ПЛАН-101 (табл. 1) на поверхность листа толщиной 30 мм из стали 09Г2С (ГОСТ 5520).

**Таблица 1** – Номинальный химический состав порошковой ленты ПЛАН 101

Содержание, масс. %				
C	Cr	Mn	Si	Ni
3,0	25,0	2,0	3,0	3,0

Наплавка проводилась при следующих параметрах: ток дуги –  $700 \pm 50$  А, напряжение –  $32 \pm 2$  В, вылет – 50 мм, скорость наплавки – 32 м/ч, скорость подачи – 41 м/ч. Наплавку осуществляли на механизированном автомате АД-1004 с источником питания ВДУ-1200. Контрольный образец (№ 1) наплавляли без наложения магнитного поля, опытный образец (№ 2) – при наложении продольного магнитного поля индукцией 28 мТ. Магнитное поле получали с помощью водоохлаждаемого соленоида (200 витков, сечение провода – 9 мм<sup>2</sup>), по которому пропускали ток силой 10 А и частотой 50 Гц. Индукцию магнитного поля измеряли теслометром 43205. Сечение наплавленного валика представлено на рис. 1.



**Рис. 1.** Наплавленный валик в сечении

Наплавленні образці остывали на спокійному повітрі, після чого їх розрізали абразивним кругом з водяним охолодженням для отримання сечення валика, перпендикулярного напрямку наплавки. Після шліфовки і поліровки по стандартній методикі поверхню шліфів піддавали довготривалому травленню при кімнатній температурі в спиртовому 4 %-ном розчині азотної кислоти. Мікроструктуру досліджували з використанням оптичного мікроскопа Nikon Eclipse M200 і електронного скануючого мікроскопа (СЭМ) JSM-6510 LV. Об'ємну частку карбидів підраховували по електронним зображенням мікроструктури з використанням комп'ютерної програми PixelAnalyzer, розробленої на кафедрі металознавства і термічної обробки ПГТУ. Мікротвердість структурних складових вимірювали з допомогою твердомера FM-300 (Future-Tech) при навантаженні 50 г. з усеред-

ненням значень 5–7 замірів, виконаних в певній області зразка.

### Експериментальна частина і аналіз отриманих результатів

По своїй структурі наплавлені покриття відносились до білих чугунів. Їх основними структурно-фазовими компонентами являлись аустенит і карбіди хрому  $M_7C_3$ . Наявність матричної фази в вигляді ГЦК-твердого розчину було обумовлено гамма-стабілізуючим впливом нікелю, а наявність гексагональних карбидів  $M_7C_3$  – високою концентрацією хрому в порошковій ленті. Розподіл мікроструктури по товщині покриття представлено на рис. 2. Сечення наплавки в напрямку від межі сплавлення до поверхні можна умовно розділити на п'ять зон приблизно однакової протяженності.

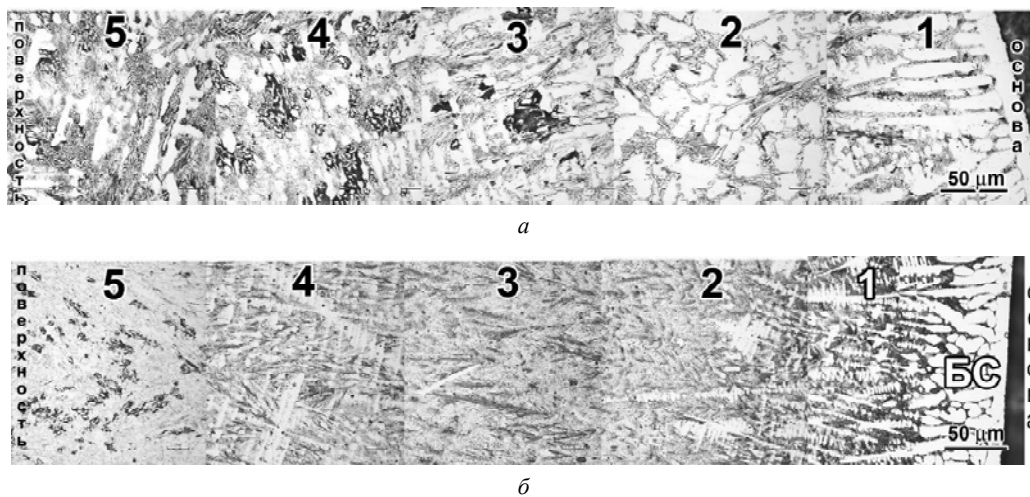


Рис. 2. Розподіл мікроструктури по сеченню наплавленого шару: а – зразок № 1; б – зразок № 2

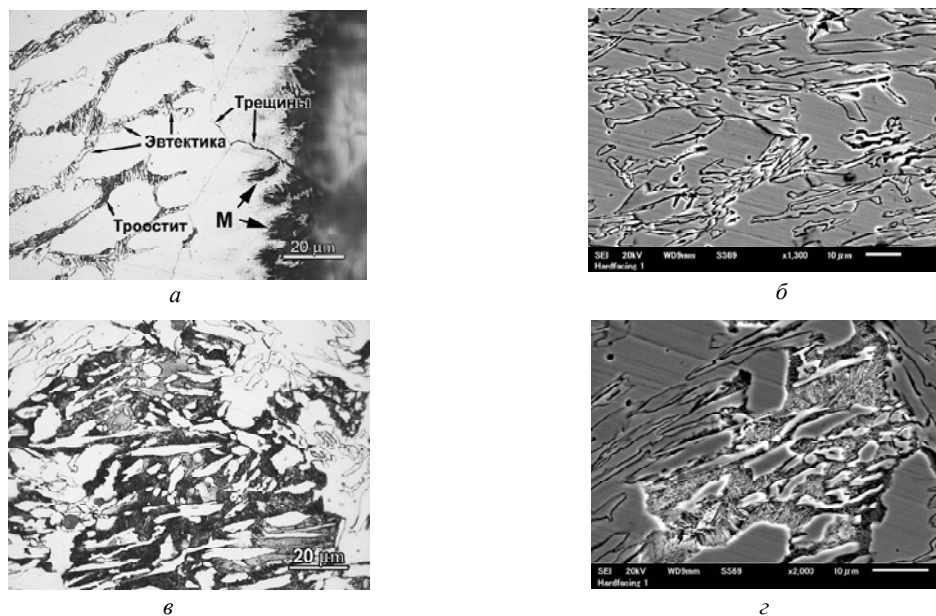


Рис. 3. Мікроструктура зразка № 1: а – межа сплавлення з основою (зона 1); б – зона 2; в, г – зона 4

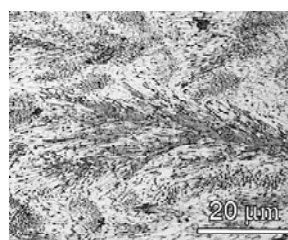
В контрольном образце (№ 1) на границе сплавления с основой присутствует так называемый «белый слой» (БС), состоящий из бескарбидной прослойки аустенита толщиной до 30 мкм, в пределах которой отмечается наличие трещин напряжения (рис. 3 а). «Белый слой» наплавки граничит с мартенситным слоем подложки, образовавшимся в результате насыщения основы легирующими элементами (Cr, Ni, Si) из сварочной ванны. От аустенитного слоя в направлении поверхности располагаются вытянутые дендриты аустенита длиной 50...120 мкм, разграниченные участками «розеточной» карбидной эвтектики «аустенит +  $Me_7C_3$ ».

В зоне 2 столбчатые дендриты сменяются разориентированными дендритами с поперечным сечением 9...21 мкм. Колонии карбидной эвтектики включают пластинчатые карбиды  $(Cr, Fe)_7C_3$ ; в сечении шлифа эти карбиды имеют в длину до 40 мкм и в поперечном сечении – 0,5...2,5 мкм. Металлической матрицей является аустенит с микротвердостью 550–600 НВ. Ближе к поверхности (зоны 3–5) в образце №1 присутствуют ориентированные аустенитные дендриты, развитые до осей третьего порядка: их длина по оси первого порядка достигает 250 мкм, а поперечное сечение ветвей – 7...21 мкм.

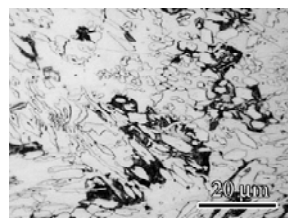
Начиная с первого слоя в структуре покрытия появляются темные участки, как правило, располагающиеся внутри эвтектических колоний и окружающие эти колонии (рис. 3 в, г). По мере приближения к поверхности наплавки количество темных участков и занимаемая ими площадь возрастают. Известно, что в присутствии повышенного количества кремния даже в высокохромистом чугуна может выявляться графит, существенно снижающий абразивную и эрозионную износостойкость чугуна [9]. В то же время, подобную темную окраску имеет и троостит – тонкопластинчатый эвтектоид, образующийся в высоколегированных сплавах в ходе эвтектоидной реакции «аустенит → феррит + карбиды» [10]. Для идентификации темной структурной составляющей применили сканирующий электронный микроскоп, который выявил присутствие высокодисперсной феррито-карбидной смеси (троостита) с пластинами цементита толщиной 0,15...0,30 мкм (рис. 3 з). Согласно [9] присутствие перлитных структур нежелательно для сплавов, работающих в условиях интенсивного абразивного и эрозионного изнашивания.

Распределение микроструктурных зон по сечению образца № 2, наплавленного в МП, представлено на рис. 2 б. Сопоставление двух образцов № 1 и № 2 показывает, что наложение магнитного поля в процессе наплавки привело к существенным изменениям в микроструктуре наплавленного металла. Прежде всего, речь идет об уменьшении размеров дендритов и измельчении карбидов, входящих в состав карбидной эвтектики. Сама эвтектика приобрела более диспергированный характер, сформировавшись в веерообразные скопления карбидных волокон толщиной 0,3...0,6 мкм, вытянутых в направлении от основы к поверхности наплав-

ки. В длину эти колонии имеют 30...60 мкм, в поперечном сечении – 4...8 мкм (рис. 4 а).



а



б

Рис.4. Микроструктура образца № 2: а – зона 3; б – зона 5

Можно предположить, что эффект диспергирования первичной структуры был вызван процессами электромагнитного перемешивания жидкого металла в ванне формирующегося валика. Это привело как к увеличению количества центров кристаллизации твердых фаз за счет снижения энергии зарождения критического зародыша, так и к дроблению кристаллов аустенита, растущих в направлении интенсивного теплоотвода – к границе сплавления с основой.

Наряду с измельчением карбидов возросла объемная доля эвтектики, приблизившись в слоях с 3-го по 5-й к 100 %. Слой 3 фактически имеет эвтектическую структуру без дендритов первичного аустенита (данные о параметрах микроструктуры покрытия сведены в табл. 2). Еще одной отличительной особенностью наплавки в магнитном поле стало резкое уменьшение площади, занимаемой трооститом (рис. 4 б). Это указывает на повышенную устойчивость первородного аустенита к фазово-структурным превращениям в процессе охлаждения из жидкого состояния. Данный результат противоречит известному факту ускоряющего влияния МП на  $\gamma \rightarrow \alpha$  фазовое превращение в сплавах на основе железа как в мартенситном, так и перлитном (бейнитном) интервалах температур [11]. Объяснением тормозящего влияния МП в данном случае может быть более равномерное распределение легирующих элементов в объеме кристаллизующегося слоя под воздействием электромагнитного перемешивания, вызываемого действием вихревых индукционных токов. В результате уменьшается ликвационное расслоение кристаллизующегося металла и уменьшается разность в уровне легированности дендритных и междендритных областей (в которых при затвердевании формируются эвтектические колонии). Соответственно, аустенит, входящий в состав эвтектики, в меньшей степени превращается в троостит при охлаждении наплавленного

слоя. С другой стороны, по мере перемещения дуги (о, соответственно, и МП) по длине валика влияние МП на устойчивость аустенита в уже сформированном покрытии ослабевает: можно полагать, что к моменту снижения температуры в конкретном участке наплавки до 600–500 °С (интервал формирования троостита) данный участок уже находится вне зоны действия магнитного поля.

Как следует из таблицы 2, твердость аустенитных дендритов варьируется от 450 до 560 HV. Эти значения превышают обычный для аустенита (200...400 HV) уровень благодаря твердорастворному упрочнению вследствие растворения никеля, кремния и части хрома в решетке гамма-железа. Пониженная микротвердость аустенита на границе с основой обусловлена «разбавляющим» действием подложки, обогащенной легирующими элементами в зоне сплавления. Наложение МП практически не отразилось на микротвердosti аустенита в покрытии. В то же время отмечен рост (на 20...50 HV) микротвердosti карбидной эвтектики в образце № 2. Необходимо отметить в целом пониженную микротвердость эвтектики (540...650 HV) в обоих образцах. Фактически, этот уровень сопоставим с твердостью аустенита, несмотря на присутствие в эвтектике твердых карбидов хрома (1300...1800 HV [8]). Причиной, по всей видимости, является обеднение эвтектического аустенита углеродом и хромом, что резко уменьшило твердорастворную компоненту его прочности. Превращение эвтектического аустенита в троостит вызвало дополнительное снижение микротвердosti, несмотря на высокодисперсное состояние карбидов, входящих в состав троостита. Таким образом, уменьшение объемной доли троостита в образце № 2 под действием магнитного поля положительно отразилось на средней твердosti покрытия.

**Таблица 2** – Микроструктурное состояние и микротвердость покрытия (\*– средние значения; в числителе и знаменателе – микротвердость эвтектики без троостита и с трооститом, соответственно)

Параметр	Номер зоны					
	«Белый слой»	1	2	3	4	5
Образец № 1 (контрольный)						
Микротвердость эвтектики*, HV	-	563	605	565/475	595/505	565/529
Микротвердость дендритов*, HV	475	491	555	578	563	532
Объемная доля эвтектики*, %	18	22	25	33	45	54
Объемная доля троостита*, %	0	5	12	15	23	35
Поперечное сечение дендритов, мкм	7...16	6...26	9...21	8...15	7...13	6...12
Поперечное сечение эвтектич. колоний, мкм	2...5	1...7	9...32	7...28	11...45	10...53
Толщина карбидов, мкм	-	0,6...2,2	0,5...2,5	1,0...4,6	1,2...3,5	0,7...1,5
Образец № 2 (магнитное поле)						
Микротвердость эвтектики*, HV	-	564	543	650	615	595/495
Микротвердость дендритов*, HV	475	454	497	543	550	563
Объемная доля эвтектики*, %	22	35	61	95	75	80
Объемная доля троостита*, %	0	0	0	0	0	15
Поперечное сечение дендритов (оси первого порядка), мкм	5...13	2...7	1...5	-	2...5	1...4
Поперечное сечение эвтектич. колоний, мкм	1...5	5...17	2...5	2...6	5...17	4...10
Толщина карбидов, мкм	-	0,5...1,1	0,3...0,7	0,3...0,6	0,3...0,8	0,5...1,0

В целом, можно констатировать, что наложение магнитного поля оказало благоприятное влияние на структурное состояние покрытия «Сормайт» с точки зрения его дальнейшего использования в качестве износостойкого материала.

### Выводы

1. Наплавленный слой «Сормайт», полученный электродуговой наплавкой порошковой лентой ПЛАН-101, представляет собой белый Cr-Ni-Si доэвтектический чугун с аустенитными дендритами и карбидной эвтектикой «аустенит+M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>». По мере удаления от зоны сплавления матричная фаза эвтектических колоний становится аустенито-трооститной.

2. Наложение продольного магнитного поля индуктивностью 28 мТл на зону плавления порошковой ленты модифицирует первичную структуру наплавленного слоя. Это проявляется в измельчении эвтектических карбидов, уменьшении размеров аустенитных дендритов и эвтектических колоний, изменении строения эвтектики от «розеточной» до «веерной». При этом возрастает объемная доля карбидной эвтектики, приближая структуру к эвтектическому состоянию.

Наплавка в продольном магнитном поле повышает устойчивость аустенита к эвтектоидному превращению при послекристаллизационном охлаждении, что приводит к резкому уменьшению объемной доли троостита в эвтектических колониях.

### Список литературы

1. Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке продольном магнитном поле / [В. Д. Кузнецов, И. В. Малинкин, В. В. Сыроватка и др.] // Сварочное производство. – 1972. – № 4. – С. 3–4.

2. Магнитное управление формированием шва при автоматической сварке под флюсом / [Ю. Г. Гаген, И. В. Перун, С. Т. Добровольский и др.] // Автоматическая сварка. – 1975. – № 11. – С. 73–74.
3. Хасуи А. Наплавка и напыление // А. Хасуи, О. Моригаки. – М. : Машиностроение, 1985. – 239 с.
4. Миронова М. В. Производительность расплавления ферромагнитных сварочных проволок при наплавке в продольном магнитном поле / М. В. Миронова // Захист металургійних машин від поломок : зб. наукових праць. – ПДТУ. – Маріуполь, 2012. – Вип.14. – С. 259-263.
5. Миронова М. В. Влияние индукции продольного магнитного поля на проплавление основного металла при дуговой наплавке / Миронова М. В. // Вестник ПГТУ. – 2012. – Вып. 25. – С. 141–146.
6. Измельчение структуры металла шва при сварке дугой, колеблющейся в поперечном магнитном поле / [А. М. Болдырев, Ю. С. Ткаченко, Н. П. Толоконников и др.] // Автоматическая сварка. – 1975. – № 7. – С. 70–71.
7. Чигарев В. В. Влияние продольного магнитного поля на формирование наплавленного износостойкого слоя / В. В. Чигарев, А. Г. Белик // Сварка и родственные процессы в промышленности (Доклады 2-го научно-технического семинара, 17 апреля 2007, г. Киев). — К. : Эко-технология. – 2007. – С. 56–59.
8. Акулович Л. М. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле / Л. М. Акулович, А. В. Миранович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 58–65.
9. Laird G. Abrasive-Resistance Cast Iron Handbook // G. Laird, R. Gunglach, K. Rohring. – The American Foundry Society. – 2000.
10. Kutz M. Handbook of Material Selection // M. Kutz. John Wiley and Sons; 2002.
11. Калетина Ю. В. Влияние постоянного магнитного поля на кинетику гамма-альфа-превращения в сплавах с изотермическим типом маргенсита / Ю. В. Калетина, Е. А. Фокина, В. М. Счастливец // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 96, № 6. – С. 38–45.

*Одержано 28.04.2016*

**Ефременко Б.В., Белик О.Г., Макуров С.Л. Структура і властивості покриття з Cr-Ni-Si чавуну, нанесеного в магнітному полі**

*Описано характерні особливості мікроструктури покриття, наплавленого Cr-Ni-Si чавуном «Сормайт» у магнітному полі. Встановлено, що накладення магнітного поля з індукцією 28 мТ дозволяє диспергувати первинну структуру покриття за рахунок зменшення розмірів дендритів, евтектичних колоній, карбідів  $M_7C_3$ . Також підвищується стійкість аустеніту до евтектоїдного перетворення, що проявляється в зменшенні об'ємної частки трооститу в металевій матриці.*

**Ключові слова:** *наплавка, магнітне поле, мікротвердість, карбіди, аустеніт.*

**Efremenko B., Belik A., Makurov S. The structure and properties of Cr-Ni-Si cast iron coating deposited under magnetic field**

*The characteristics of the microstructure of the coating deposited with Cr-Ni-Si cast iron «Sormait» in the magnetic field are described. It is found that the application of a magnetic field with induction 28 mT allows dispersing the primary structure of the coating. It manifests in reducing the sizes of the austenitic dendrites, eutectic colonies and carbides  $M_7C_3$ . Also the austenite stability to eutectoid transformation is increased, that is a decrease in the volume fraction of troostite structure in the metallic matrix.*

**Key words:** *hardfacing coating, magnetic field, microhardness, carbides, austenite.*