

УДК 621.745.55

**Ковальчук А. Г., Ямшинський М. М., Федоров Г. Е.**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЖАРСТОЙКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ОТЛИВОК**

Анализ эксплуатации значительного количества литых деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного износа, высоких температур и агрессивных сред (теплоэнергетика, металлургия, горнообогатительная и химическая отрасли и др.), показывает, что технологии их изготовления с использованием объемного легирования не всегда себя оправдывают, а во многих случаях и вредны, поскольку лишь небольшая толщина таких деталей изнашивается, окисляется или повреждается. Это приводит к неоправданным расходам дорогих высоколегированных сплавов [1].

Ежегодно безвозвратно расходуются тысячи тонн металла литых деталей высокой себестоимости. В этих случаях достаточно было бы обеспечить высокие эксплуатационные характеристики только рабочих поверхностей таких деталей. Для достижения этой цели перспективными могут быть способы производства отливок из нелегированных сплавов на основе железа с поверхностным композиционным или легированным слоем, который образуется во время формирования заготовки в литейной форме.

К деталям современных машин и механизмов предъявляются повышенные требования относительно твердости, стойкости против коррозии и эрозии в различных агрессивных средах и др. Большинство таких деталей изготавливают с использованием литых заготовок, то есть отливок. Срок службы отдельных литых деталей в значительной степени определяет надежность машин и их производительность.

Для достижения высоких поверхностной прочности и износостойкости литых деталей в машиностроении используют различные виды обработки: химико-термическую, лазерную и др., а также электрохимические покрытия и специальные наплавки. Однако многими из этих методов не удается получить слой с нужными свойствами толщиной более 0,3 мм, что недостаточно, особенно для крупных деталей [1]. Наплавлением на поверхности детали можно получить слой значительной толщины, однако этот процесс трудоемок, дорогой и, кроме того, на некоторых поверхностях деталей наплавление осуществить практически невозможно.

Толщина поверхностного слоя со специальными свойствами таких отливок должна быть не менее 8...10 мм [1].

Перспективным направлением развития технологии получения отливок с дифференцированными свойствами является поверхностное легирование, которое заключается в применении красок и паст, наносимых на поверхность литейной формы, и заливке среднеуглеродистым расплавом.

Авторами исследованы процессы жаростойкого поверхностного легирования с использованием некоторых ферросплавов. Такие исследования дали положительные результаты и подтвердили целесообразность использования ферросплавов в качестве наполнителей легирующих покрытий [1]. Это позволило продолжить исследования в этом направлении [2–6].

Целью данной работы является исследование процессов жаростойкого поверхностного легирования отливок.

Несмотря на обширные сведения по применению поверхностного легирования для повышения износостойкости литых деталей, вопрос о жаростойком поверхностном легировании остается малоизученным.

Так как для износостойкого легирования чаще всего применяются порошки отдельных легирующих материалов или их смеси, целесообразно установить возможность применения механических смесей порошков для жаростойкого поверхностного легирования отливок.

В качестве исходных материалов для исследования процессов жаростойкого поверхностного легирования выбраны порошки феррохрома ФХ200 фракции 0,1 мм и алюминий фракции 50 мкм, так как хром и алюминий в наибольшей степени способствуют повышению окалиностойкости сплавов на основе железа. Выбор марки феррохрома обусловлен его температурой плавления (1530 °С).

Легирующие составы наносились на поверхность формы кистью (в несколько приемов до толщины 5 мм). В качестве связующего для легирующего покрытия применяли раствор поливинилбутирала в эфиро-альдегидной фракции этилового спирта.

Состав легирующего покрытия приведен в табл. 1. Результаты исследований влияния легирующих покрытий на толщину поверхностно-легированного слоя приведены в табл. 1 и на рис. 1. Температура заливки форм – 1620 °С.

Таблица 1

Составы легирующих покрытий и результаты исследования их эффективности

Индекс покрытия	Состав легирующего покрытия, % по объему		Толщина легированного слоя, мкм
	Алюминиевый порошок	Порошок феррохрома ФХ200	
1	–	100	1970
2	30	70	904
3	50	50	90
4	66,5	33,5	538
5	100	–	5500

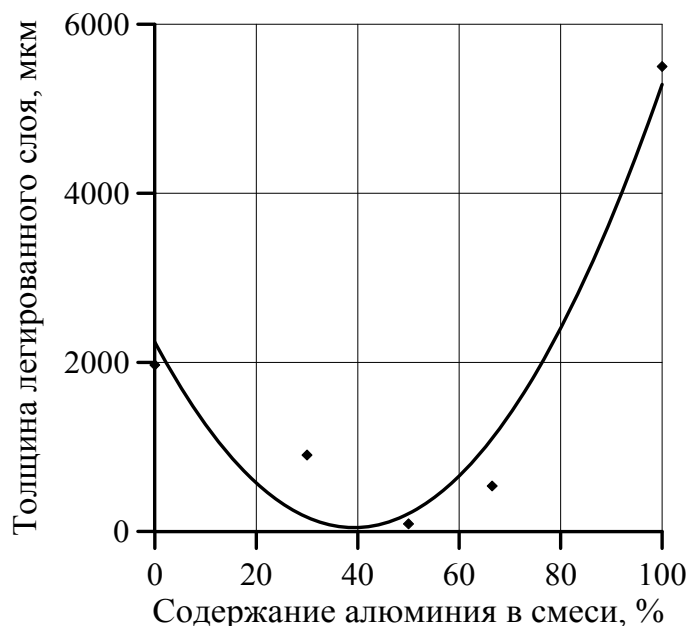


Рис. 1. Влияние алюминия на толщину поверхностно-легированного слоя

Установлено, что изменение содержания алюминия в легирующем покрытии существенно влияет на толщину легированного слоя. При повышении его в покрытии от нуля до 50 % по объему толщина легированного слоя уменьшается во много раз. При небольших содержаниях алюминия в покрытии основу составляет сравнительно тугоплавкий порошок

феррохрома, и поверхностное легирование проходит, по-видимому, вследствие капиллярного проникновения жидкого металла в поры легирующего покрытия. Однако, в виду того что поры покрытия заполнены мелкодисперсным порошком алюминия, который препятствует проникновению в них металла, имеет меньшую температуру плавления, чем хром, и забирает значительное количество тепла, толщина легированного слоя уменьшается и достигает минимума при соотношении хрома и алюминия 50:50 % по объему.

Исследования микротвердости с шагом  $\approx 50$  мкм легированного слоя показывают, что распределение хрома и его соединений неодинаково (рис. 2). Максимальная микротвердость достигается в самом поверхностном слое, что свидетельствует о наличии зоны с большой концентрацией хрома и его соединений. В середине слоя колебания микротвердости значительно меньше (см. рис. 2), чем в поверхностном слое, что свидетельствует о равномерном распределении легирующих элементов в объеме матрицы-основы металла.

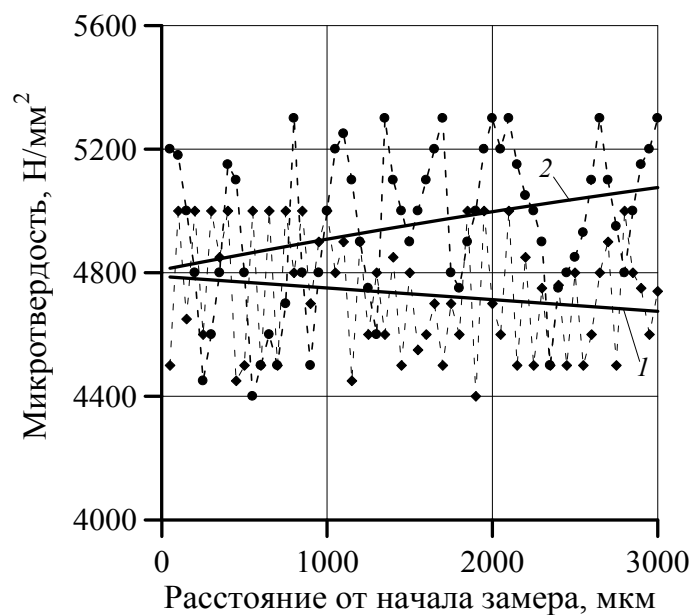


Рис. 2. Микротвердость в середине легированного слоя:  
1 – 70 % ФХ200 и 30 % Al; 2 – 30 % ФХ200 и 70 % Al

Микроструктура легированного слоя у внешней границы представляет собой частички феррохрома, в промежутках которых находятся легированный алюминием и хромом феррит. Структура поверхностно-легируемого слоя гетерогенна.

При повышении содержания алюминия в легирующем покрытии более 50 % по объему толщина легированного слоя увеличивается и достигает максимума (5500 мкм) при содержании алюминия 100 % по объему.

Механизм поверхностного легирования в этом случае заключается, по-видимому, в интенсивном расплавлении алюминия, смешивании его с основой металла и обволакивании частичек феррохрома при одновременном протекании диффузионных процессов. Распределение хрома в поверхностном слое при этом более равномерно (рис. 3, кривая 2), структура близка к гомогенной.

Применение легирующих покрытий, состоящих из отдельных порошков (алюминия или феррохрома), способствует получению легированного слоя максимальной и одинаковой толщины. Микротвердость поверхностного слоя при этом стабильна.

При использовании чистого порошка алюминия температуры и теплосодержания жидкой стали достаточно для расплавления легирующего покрытия на всю толщину, поэтому максимальное содержание алюминия в феррите достигается в поверхностном слое, о чем свидетельствуют значения микротвердости (рис. 3).

Аналогичный механизм образования легированного слоя наблюдается, по-видимому, и при использовании в качестве основы легирующего покрытия феррохрома. Однако, в этом случае температуры и теплосодержания жидкой стали недостаточно для расплавления покрытия на всю глубину, поэтому и толщина легированного слоя меньше (рис. 3). Легирующее покрытие при этом расплавляется на глубину 1,5...2,0 мм, остальная его часть спекается и скалывается при выбивке отливок. Это приводит также к образованию неровной поверхности отливки в местах ее поверхностного легирования.

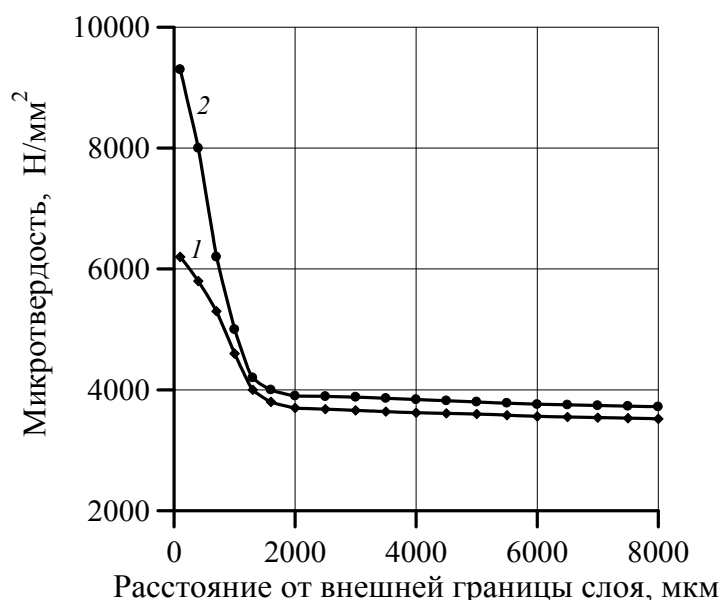


Рис. 3. Изменение микротвердости легированного слоя, полученного при нанесении покрытия на основе порошка алюминия (1), феррохрома (2)

Структура легированного слоя в этом случае представляет собой легированный хромом феррит с плавным уменьшением концентрации хрома от внешней границы легированного слоя к поверхности раздела слой – основной металл, о чем свидетельствует изменение микротвердости (рис. 3).

Исследование окалинстойкости легированного слоя проводилось в среде воздуха в течение 10 и 100 ч. Результаты испытаний приведены в табл. 2 и на рис. 4. Испытания проводились при температуре 1000 °С.

Как видно из табл. 2, окалинстойкость легированного слоя на порядок выше окалинстойкости углеродистой стали. Это подтверждает возможность и целесообразность процесса поверхностного легирования.

Таблица 2

Окалинстойкость легированных слоев

Индекс покрытия	Состав легирующего покрытия, % по объему		Увеличение массы, мг/см², при выдержке, ч	
	Алюминиевый порошок	ФХ200	10	100
0	–	–	6,50	56,00
1	–	100	1,20	5,80
2	30	70	0,37	3,60
3	50	50	0,33	2,70
4	66,5	35,5	0,32	2,40
5	100	–	0,30	2,20

Лучшими защитными свойствами обладает легированный слой, полученный при нанесении легирующего покрытия на основе феррохрома, так как образующаяся на поверхности образца при высоких температурах окисная пленка  $Cr_2O_3$  является более плотной и труднее отслаивается от поверхности. Добавки алюминия вызывают образование комплексной пленки, в состав которой входят оксиды  $Al_2O_3$  обладающие меньшей способностью к удерживанию поверхности образца и могут периодически отслаиваться от поверхности, давая возможность образовываться новым оксидам алюминия.

Таким образом, легированный слой, полученный при нанесении легирующего покрытия на основе хрома, обладает достаточно высокой окислостойкостью, но имеет ограниченную толщину. Отливки с таким легированным слоем могут использоваться для работы при температурах до  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ .

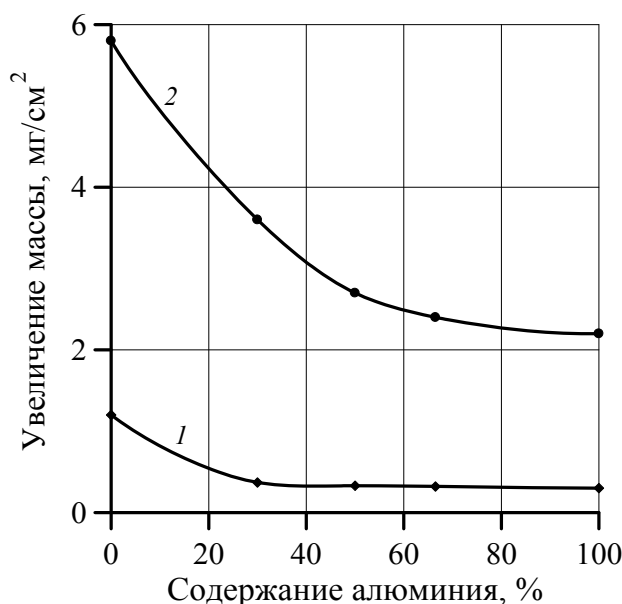


Рис. 4. Изменение окислостойкости легированного слоя в зависимости от содержания алюминия в легирующем покрытии  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ :

1 – выдержка в течение 10 часов; 2 – выдержка в течение 100 часов

Легирующее покрытие на основе порошка алюминия обеспечивает получение легированного слоя достаточной толщины с равномерным распределением легирующего элемента, однако окислостойкость такого слоя ниже, хотя и остается высокой. Поэтому отливки с таким легированным слоем могут длительно работать лишь при температурах до  $900\text{ }^\circ\text{C}$ .

Легирующие покрытия на основе хрома и алюминия не обеспечивают получение легированного слоя достаточной для эксплуатации и высоких температурах толщины с равномерным распределением в нем легирующих элементов.

Следовательно, необходимы исследования по влиянию на толщину поверхностно легированного слоя других соотношений хрома и алюминия, других составов покрытий, фракций исходных материалов, особое нанесение и толщина легирующих покрытий, температурных режимов заливки и охлаждения.

Как отмечалось выше, механические смеси порошков алюминия феррохрома не позволяют получить легированный слой достаточной толщины с равномерно распределенными элементами.

Исследовано влияние легирующего покрытия на основе лигатуры хром-алюминий-железо состава 66 % хрома, 15 % алюминия, 1 % кремния остальное железо на процесс образования легированного слоя при этом использовался метод вставок – простановка в форму пластин толщиной 5 мм, изготовленных из лигатуры фракций 0,1 и 0,315 мм в соотношении 1:1.

Выбор гранулометрического состава лигатуры обусловлен стремлением получить легирующее покрытие, имеющее, с одной стороны, размер пор, достаточный для свободного проникновения в них жидкого металла, а с другой стороны, размеры частиц порошка, обеспечивающие их эффективное расплавление. В качестве связующего при этом применяли жидкое стекло  $M = 2,5$  плотностью  $1480 \text{ кг/м}^3$ , разведенное водой в соотношении 1:1.

После заливки форм с температуры  $1560 \text{ }^\circ\text{C}$  получен легированный слой со средней толщиной  $260 \text{ мкм}$ . Распределение легирующих элементов в легированном слое равномерное, о чем свидетельствует микротвердость слоя на различных расстояниях от границы раздела легированный слой – основной металл. Структура легированного слоя представляет собой легированный хромом и алюминием феррит с плавным уменьшением содержания легирующих элементов к границе раздела.

Однако толщина легирующего слоя недостаточна, по-видимому, из-за низкой для этого легирующего покрытия температуры заливки. Исследование окалиностойкости легированного слоя (табл. 3) показали достаточно высокую окалиностойкость образцов.

Таблица 3

Окалиностойкость легированного слоя, полученного при нанесении покрытия на основе лигатуры хром-алюминий-железо

Температура испытаний, $^\circ\text{C}$	Увеличение массы, $\text{мг/см}^2$ при выдержке ч	
	10	100
1200	0,72	2,3
1000	0,25	1,1
900	0,12	0,7

Окалиностойкость легированного слоя находится на уровне хромоалюминиевых сталей.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, применение легирующих покрытий на основе лигатуры хром-алюминий-железо является перспективным для получения легированного слоя, обладающего высокой окалиностойкостью, но требует более высокой температуры перегрева металла перед заливкой в формы. Такой метод может быть использован для получения легированного слоя на отливках, изготавливаемых из сталей, содержащих пониженное количество хрома (18...20 %).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямишинський М. М. Середньовуглецеві зносостійкі сталі для теплоенергетики / М. М. Ямишинський, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 4 (25). – С. 179–185.
2. Ямишинський М. М. Сучасні технологічні аспекти виготовлення виливків із диференційованими властивостями поверхні / М. М. Ямишинський, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов // Наукові вісті Національного технічного університету «КПІ». – 2004. – № 6. – С. 21–26.
3. Совершенствование технологии изготовления отливок с дифференцированными свойствами поверхности / Ямишинский М. М., Федоров Г. Е., Платонов Е. А., Кузьменко А. Е. // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 3. – С. 14–19.
4. Гурьев М. А. Поверхностное упрочнение стальных деталей при литье по газифицируемым моделям / М. А. Гурьев, Г. А. Околович // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 102–106.
5. Olawale Samuel Fatoba. Optimization of Carburized UNS G10170 Steel Process Parameters Using Taguchi Approach and Response Surface Model (RSM) / Olawale Samuel Fatoba, OlaitanLukmanAkanji, Abiodun Samson Aasa // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2014. – №2. – С. 566–578.
6. Sigma Phase Formation and Embrittlement of Cast Iron-Chromium-Nickel (Fe-Cr-Ni) Alloys / A. M. Babakr, A. Al-Ahmari, K. Al-Jumayiah, F. Habiby // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2008. – №7. – С. 127–145.

Статья поступила в редакцию 08.04.2017 г.