

**Обобщенные результаты испытаний опытных порошков из легированного чугуна, полученных с использованием металлургических методов.**

Студенты гр. 10405222 Демидчук Н.В.,  
гр. 10405221 Петричиц М.Г., гр. 10405322 Климёнок У.Б.  
Научные руководители – Слуцкий А.Г. Ванюк Э.А.  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

В результате ранее выполненных экспериментальных исследований [1-3] были изготовлены опытные образцы слитков различного состава в том числе: хромокремниевый чугун содержащий 16% Cr, 10% Si, 1 % В); хромокремниевый чугун, содержащий 16,0% Cr, 5,0% Si, ~1,5%В); комплекснолегированный чугун, содержащий 2,5%С, 6%Cr, 5%Si, 1,5%В, 8%W, 5%Со. В качестве основного материала при плавке использовали: стальной лом, хром металлический Хр1, кремний кристаллический Кр1, кобальт и вольфрам в виде отходов стали Р18. Для дополнительного легирования бором использовали лигатуру, полученную СВС процессом. Плавку осуществляли на высокоскоростной индукционной печи. После растворения легирующих присадок чугун перегревали и затем осуществляли его разливку в холодный металлический кокиль для получения слитков (рисунок 1) .

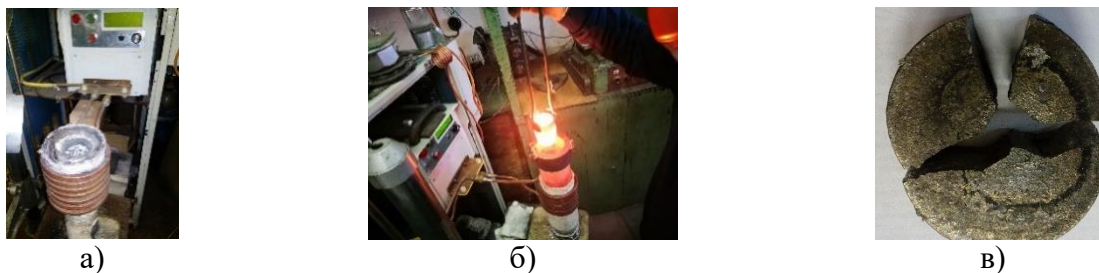


Рисунок 1 – Процесс получения слитка из легированного сплава

(Fe-Cr-Si-Co-W-B): а – высокоскоростная плавильная установка; б – процесс плавки; в – полученный слиток;

В дальнейшем они подвергались дроблению и последующему размолу в шаровой мельнице типа «Пьяная бочка» с использованием шаров из стали ШХ15 различного диаметра. При нанесении покрытий использовали порошки с размером частиц менее 80 мкм и 80...180 мкм. Для сравнительной оценки был выбран импортный серийный порошок ПГ-СР4 (основа Ni; 13,0-17,0%Cr; 0,6-1,0% С; 3,0-5,0% Si; 2,5-4,0%В; 4,0%Fe) фракцией 40...100 мкм.

На рисунке 2 приведены фотографии опытных образцов порошков из комплексно-легированного сплава (Fe-Cr-Si-Co-W-B) и их изображения, выполненные на сканирующем электронном микроскопе VEGA TESCAN в масштабе увеличения: 1:500 и 1:50 мкм.

При анализе СЭМ-изображений опытного порошка из легированного чугуна, установлено наличие направленной транскристаллизации за счет очень сильного теплоотвода в металлическом кокиле. При этом в плоскости спайности сколы идут по линейным дислокациям. При анализе СЭМ-изображения крупной фракции порошка (рисунок 2 (б)) видны темные включения по изломам, т. е. скол произошел по включениям или около включений.

Полученные образцы порошков из комплексно-легированных сплавов были переданы в лабораторию плазменных технологий для проведения испытаний различными методами нанесения покрытия. Анализ показал, что насыпная плотность и текучесть порошков на основе легированных чугунов ниже, чем у эталонного порошка ПГ-СР4, имеющего сферическую форму.

На следующем этапе был проведен анализ результатов нанесения покрытий с использованием опытных порошков различными методами. Установлено, что при газопламенном

напылении покрытия из опытных порошков имеют низкие адгезионные свойства, что выражается в их крошении и отслаивании. В дальнейшем был использован двухэтапный вариант, включающий газопламенное напыление с последующим плазменным оплавлением нанесенных покрытий.

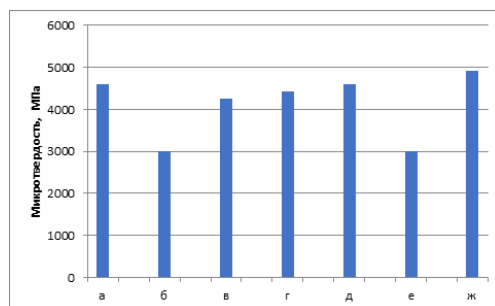
На рисунке 3 представлены фотографии образцов с покрытиями из опытных порошков, полученных данным методом.



а - чугун с 1% бора, размер частиц менее 80 мкм; б - чугун с 1% бора, размер частиц 80...180 мкм; в - чугун с 1,5% бора, размер частиц менее 80 мкм; г - чугун с 1,5% бора, размер частиц 80...180 мкм; д - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц менее 80 мкм; е - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц 80...180 мкм; ж - ПГ-СР4

Рисунок 3 – Фотографии образцов с покрытиями из опытных порошков с использованием плазменного оплавления.

На рисунке 4 представлена гистограмма микротвердости покрытий, полученных данным методом.

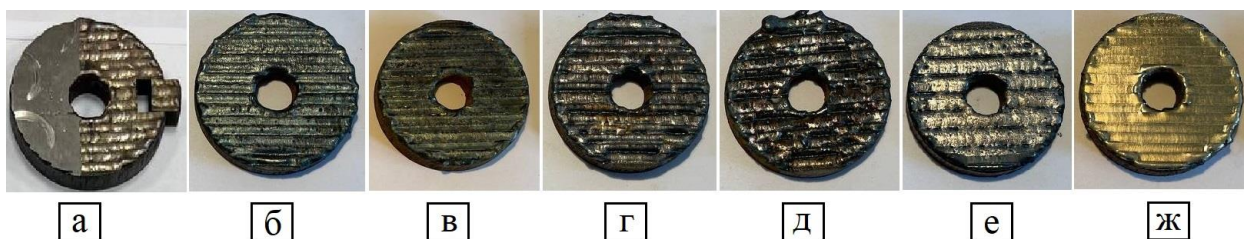


а - чугун с 1% бора, размер частиц менее 80 мкм; б - чугун с 1% бора, размер частиц 80...180 мкм; в - чугун с 1,5% бора, размер частиц менее 80 мкм; г - чугун с 1,5% бора, размер частиц 80...180 мкм; д - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц менее 80 мкм; е - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц 80...180 мкм; ж - ПГ-СР4

Рисунок 4 – Гистограмма микротвердости исследуемых покрытий, нанесенных плазменной наплавкой

Установлено, что наивысший показатель микротвердости зафиксирован у покрытий их хромокремниевого чугуна, содержащего 1 % бора и дополнительно легированного бором и вольфрамом размером частиц порошка менее 80 мкм. У покрытий с размером частиц 80...180 мкм наблюдается некоторое снижение микротвердости.

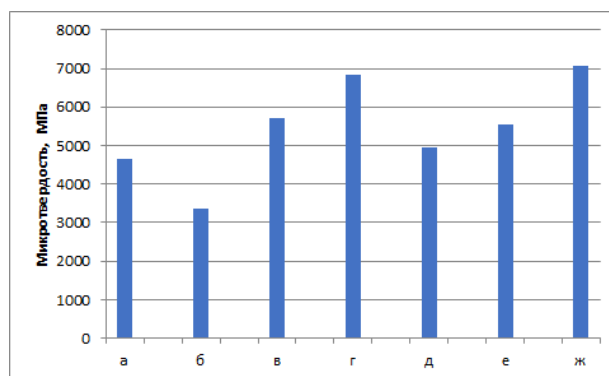
Следующий вариант нанесения покрытий включал газопламенное напыление и оплавление на оптоволоконном лазере марки YLR-1. Были изготовлены образцов для проведения исследований (рисунок 5).



а - чугун с 1% бора, размер частиц менее 80 мкм; б - чугун с 1% бора, размер частиц 80...180 мкм; в - чугун с 1,5% бора, размер частиц менее 80 мкм; г - чугун с 1,5% бора, размер частиц 80...180 мкм; д - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц менее 80 мкм; е - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц 80...180 мкм; ж - ПГ-СР4

Рисунок 5 - Фотографии образцов с покрытиями, нанесенными лазерной наплавкой

Установлено (рисунок 6), что максимальные значения микротвердости были достигнуты у покрытий из порошка чугуна с вольфрамом, размер частиц 80...180 мкм (6819 МПа) и порошка чугуна с 1,5% бора, размер частиц менее 80 мкм (5725 МПа). Отмечается, что эти значения оказались незначительно ниже по сравнению с эталонным покрытием ПГ-СР4 с микротвердостью 7078 МПа.



а - чугун с 1% бора, размер частиц менее 80 мкм; б - чугун с 1% бора, размер частиц 80...180 мкм; в - чугун с 1,5% боа, размер частиц менее 80 мкм; г - чугун с 1,5% бора, размер частиц 80...180 мкм; д - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц менее 80 мкм; е - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц 80...180 мкм; ж - ПГ-СР4

Рисунок 6 - Гистограмма микротвердости исследуемых покрытий, нанесенных лазерной наплавкой.

Следует отметить, что у покрытий из порошка чугуна с 1% бора, размер частиц 80...180 мкм (4185 МПа) и чугуна с 1 % бора, размер частиц менее 80 мкм (4807 МПа) были установлены минимальные показатели, которые оказались значительно ниже (на 40% и 30% соответственно) в сравнении с ПГ-СР4. Кроме того, у образцов из порошка чугуна с вольфрамом, размер частиц менее 80 мкм (4941 МПа) и чугуна с вольфрамом, размер частиц 80...180 мкм (5558 МПа) микротвердость оказалась на 30% и 20% ниже соответственно по сравнению с эталонным покрытием. Из полученных данных видно, что фракционный состав порошка оказывает существенное влияние на микротвердость покрытия.

Сравнительный анализ показал, что микротвердость покрытия при лазерной наплавке в среднем выше на 40%, чем при плазменной. Этому способствует формирование более однородной и плотной структуры покрытия.

Ниже приведены обобщенные результаты исследований износостойкости полученных

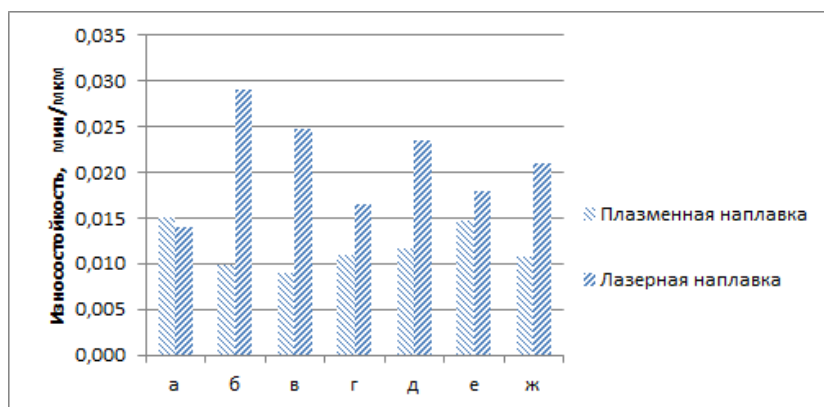
покрытий. На рисунке 7 представлены фотографии опытных образцов с покрытиями, нанесенными плазменной наплавкой, после испытаний на износостойкость:



а - чугун с 1% бора, размер частиц менее 80 мкм; б - чугун с 1% бора, размер частиц 80...180 мкм; в - чугун с 1,5% бора, размер частиц менее 80 мкм; г - чугун с 1,5% бора, размер частиц 80...180 мкм; д - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц менее 80 мкм; е - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц 80...180 мкм; ж - ПГ-СР4

Рисунок 7 – Опытные образцы с покрытиями, нанесенными плазменной наплавкой, после испытаний на износостойкость.

На рисунке 8 представлены сравнительные результаты износостойкости исследуемых покрытий, нанесенных плазменной и лазерной наплавкой:



а - чугун с 1% бора, размер частиц менее 80 мкм; б - чугун с 1% бора, размер частиц 80...180 мкм; в - чугун с 1,5% бора, размер частиц менее 80 мкм; г - чугун с 1,5% бора, размер частиц 80...180 мкм; д - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц менее 80 мкм; е - чугун, легированный вольфрамом, размер частиц 80...180 мкм; ж - ПГ-СР4

Рисунок 8 - Гистограмма износостойкости исследуемых покрытий, нанесенных плазменной и лазерной наплавкой:

При сравнительном анализе результатов исследований микротвердости и износостойкости, покрытий из опытных порошков, выявлено три покрытия с наилучшими физико-механическими свойствами.

- покрытие хромосилициевого чугуна с 1% бора, размер частиц – до 80 мкм) с микротвердостью равной 4604 МПа и износостойкостью 0,015 мин/мкм;

-покрытие чугуна, легированного вольфрамом, размер частиц – до 80 мкм) с микротвердостью равной 4588 МПа и износостойкостью 0,012 мин/мкм;

- покрытие хромосилициевого чугуна с 1,5% бора (состав: основа Fe, 16,0% Cr, 5,0% Si, ~1,5%B), размер частиц 80...180 мкм) с микротвердостью 4425 МПа и износостойкостью 0,011 мин/мкм.

В целом можно утверждать, что у покрытий из опытных порошков, полученных литейно-металлургическим методом износостойкость при лазерной наплавке в среднем выше

на 80%, чем при плазменной наплавке.

Таким образом, полученные результаты исследований свидетельствуют о реальной возможности использования литейных технологий при изготовлении порошков взамен импортных для нанесения износостойких покрытий.

#### Заключение

1. Установлено, что порошки, полученные литейно-металлургическим методом уступают характеристикам импортного порошка ПГ-СР4, изготовленного методом распыления и имеющего сферическую форму частиц. Тем не менее уровень их технологических свойств удовлетворительный для проведения последующих операций газотермического нанесения покрытий.

2. При газопламенном напылении опытных порошков установлена низкая прочность сцепления полученного покрытия с матрицей.

3. Существенное повышение физико-механических свойств исследуемых покрытий достигнуто при плазменной и лазерной методах наплавки. Установлено, что лазерные методы наплавки показали максимальные значения микротвердости и износостойкости по всем исследуемым покрытиям. Так среднее значение микротвердости при лазерной наплавке приблизительно на 40% превышает среднюю микротвердость плазменной наплавки.

4. Износостойкость покрытий при лазерной наплавке в среднем превышает на 80% аналогичный показатель, при плазменной методе оплавления. При этом, наилучшие физико-механические свойства показали два покрытия из порошков хромокремниевое чугуна, содержащего 1,5% бора (размер частиц – до 80 мкм) и аналогичного сплава дополнительно легированного 8% W, 5% Co, размер частиц – до 80 мкм).

#### Список использованных источников

1. Способы получения износостойких материалов для защитных покрытий с использованием литейно-металлургических методов / А.Г. Слуцкий [и др.] // *Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов* в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 216–225.

2. Отработка в лабораторных условиях литейно-металлургического процесса получения материалов для нанесения износостойких покрытий / Н. А. Гулецкий [и др.]; науч. рук.: В. А. Шейнерт, А. Г. Слуцкий // *Новые материалы и технологии их обработки [Электронный ресурс]: сборник научных работ XXIV Республиканской студенческой научно-технической конференции, 19–20 апреля 2023 года* / сост.: А. П. Бежок, И. А. Иванов. – Минск: БНТУ

3. Технологические особенности получения литых заготовок из износостойких материалов для защитных покрытий / В. А. Шейнерт [и др.] // *Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов* в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 43. – с. 145–151.