

УДК 621.793.6

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

## БОРСОДЕРЖАЩИЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МЕТАЛЛООТХОДОВ: РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ

*Выполнен анализ состояния исследований, разработки и внедрения отечественных борсодержащих сплавов для износостойких защитных покрытий с использованием в качестве сырья дисперсных металлоотходов. Приведены примеры таких сплавов. Обсужден импотрозамещающий потенциал разработки. Показано, что в современных условиях активное использование в качестве сырья для наплавочных сплавов стальной и чугунной стружки машиностроительных предприятий позволяет повысить эффективность упрочняющих технологий.*

**Ключевые слова:** борсодержащие сплавы, износостойкая наплавка, стальная, чугунная стружка

**Введение.** Проблемы создания эффективных сплавов для защитных покрытий, обеспечивающих работоспособность машин и оборудования в экстремальных условиях эксплуатации, были и остаются актуальными для большинства промышленно развитых стран. Особую значимость эти проблемы приобретают в настоящее время для Беларуси. Отсутствие собственных металлургических ресурсов и повышение стоимости импортного металлургического сырья настоятельно требуют новых ресурсосберегающих подходов к повышению долговечности быстроизнашиваемых деталей. Для различных исторических периодов были характерны различные направления исследований и разработок упрочняющих технологий. В относительно благополучный советский период значительное внимание уделялось высокопроизводительным технологиям и высокоэффективным материалам. Характерной особенностью тех разработок были экстремально высокие свойства получаемых покрытий и, в ряде случаев, недооценка экономических факторов. Именно в этот период получили широкое распространение эффективные, но дорогостоящие никелевые самофлюсующиеся порошки. Традиционный подход при создании указанных сплавов и технологий был эффективен в условиях плановой экономики и крупных специализированных ремонтных предприятий. Большинство серийно выпускаемых сплавов для защитных покрытий ориентированы именно на эти технологии. Ряд из них сейчас неконкурентоспособны — упрочнение и восстановление деталей дорогими импортными сплавами стало невыгодным. Существует острая потребность в недорогих специализированных сплавах для формирования защитных (износостойких и антифрикционных) покрытий.

Альтернативой традиционным самофлюсующимся сплавам стало создание научных и технологических основ получения самофлюсующихся порошковых сплавов диффузионным легированием в порошковых насыщающих средах [1–5]. Результаты выполненных исследований и производственный опыт позволяют диффузионным легированием вводить в состав сплавов широкий спектр легирующих элементов, основ-

ным из которых является бор [1, 6]. Получаемые диффузионно-легированные (ДЛ) самофлюсующие порошки имеют композиционное строение и состоят из ядра и диффузионной оболочки. Химический и фазовый состав ДЛ-порошков регламентируется технологическими режимами диффузионного легирования. В качестве сырья эффективно использование дисперсных металлоотходов (измельченной стальной, чугунной стружки, отходов дробы и др.) [7].

В представленной статье выполнен анализ современного состояния и перспективы разработки и внедрения борсодержащих сплавов для защитных покрытий с использованием в качестве сырья дисперсных металлоотходов отечественных машиностроительных предприятий.

**Борсодержащие сплавы для наплавки покрытий с высокой абразивной износостойкостью.** В качестве основы для наплавочных сплавов обосновано применение стружки серых (СЧ) и белых (БЧ) чугунов [8]. В качестве исходного материала для изготовления наплавочных сплавов чугунная стружка имеет ряд достоинств: большие запасы на предприятиях и низкая стоимость предопределяет невысокую стоимость наплавочных сплавов из нее, а стабильность химического состава и отсутствие пересортицы способствуют высокому качеству порошков. Важным является также хрупкость стружки, обеспечивающая легкий размол. Машиностроительные предприятия страны активно используют различные чугуны, «производя» ежегодно сотни тонн стружки.

Выполненный физико-химический анализ легирующих элементов свидетельствует о целесообразности дополнительного легирования чугунной стружки бором для приближения состава сплава к эвтектическому, придания самофлюсуемости при наплавке, повышения механических свойств вследствие образования высокотвердых бористых фаз. Легирование чугунной стружки карбидообразующими элементами целесообразно для образования в структуре высокотвердых карбидов, стойких в условиях абразивного истирания, повышения микротвердости матричного твердого раствора. Легирование стружки марганцем

оправдано для увеличения пластичности сплава за счет аустенизации матричной составляющей, интенсификации образования избыточных фаз. Существенное значение имеет стоимость легирующих элементов. Таким образом, для упрочнения наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, целесообразно дополнительное легирование матичного сплава наряду с бором, распространенными карбидообразующими и аустенизирующими легирующими элементами [9].

Выполнен комплекс исследований влияния ряда легирующих элементов (N, B, Ti, Cr, Mn) на структурообразование и свойства сплавов на основе чугунов. Наплавленные слои имеют гетерогенное эвтектическое строение с различной степенью эвтектичности в зависимости от системы легирования. Установлено, что легирование стружки СЧ карбидообразующими элементами (хромом, титаном) не приводит к образованию заэвтектических структур вследствие недостаточной концентрации углерода (рисунок 1 а). Сплавы систем СЧ–В–Cr и СЧ–Cr–Ti отличаются высокой абразивной износостойкостью, особенно после термической обработки. Микротвердость матричной эвтектоидной составляющей в результате закалки возрастает с 4200 ÷ 5000 до 5100 ÷ 6900 МПа, микротвердость эвтектики при этом практически не изменяется.

Сплавы на основе отходов БЧ имеют заэвтектическое строение (см. рисунок 1 в). Максимальной износостойкостью среди них отличается ДЛ-сплав на основе стружки белого чугуна, легированный бором и марганцем. В наплавленном слое такого состава закалочные структуры образуются даже при охлаждении расплава на воздухе, а высокое содержание хрома в исходной стружке обуславливает образование высоко-

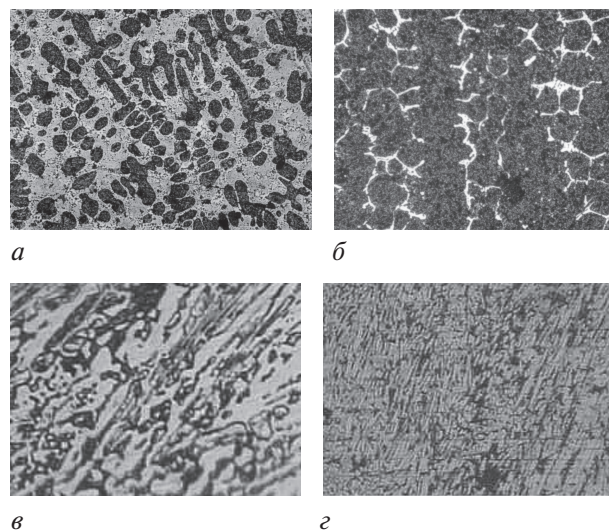


Рисунок 1 — Микроструктуры наплавленных покрытий (× 300):  
 а — СЧ–В–Cr; б — СЧ–N–Cr–Ti, закалка, низкий отпуск;  
 в — БЧ–В–Mn закалка, низкий отпуск;  
 з — БЧ–N, закалка, высокий отпуск

твердых карбидов типа  $M_7C_3$  и  $M_{23}C_6$ . Важным резервом повышения эксплуатационных свойств наплавки является термическая обработка. Выполненными исследованиями доказано определяющее влияние микротвердости матричной структурной составляющей ДЛ-сплавов на их абразивную износостойкость (эвтектоида для доэвтектических составов и эвтектики для сплавов с заэвтектическим строением). Обнаружен эффект дисперсионного твердения для азотсодержащих наплавки, обеспечивающий повышение твердости и износостойкости. В результате определены составы сплавов исследованных систем, обладающие наибольшей стойкостью к абразивному истиранию (таблица 1).

Таблица 1 — Абразивная износостойкость наплавки из борсодержащих сплавов

№	Исходные металлоотходы	Введенные легирующие элементы %, масс.	Термическая обработка	Твердость, НВ	Относительная износостойкость
<i>Наплавки из металлоотходов</i>					
1	Стружка серого чугуна СЧ20, СЧ35	2,9 В	без термообработки	490 ± 54	2,6
2		2,3 В; 5,5 Cr		490 ± 85	2,9
3		2,2 В; 12,5 Cr		510 ± 80	2,9
4		2,2 В; 12,5 Cr	закалка, низкий отпуск	550 ± 35	4,1
5	Стружка белого чугуна ИЧХ28Н2	1,5 В; 2,0 Mn	без т.о.	620 ± 90	4,2
6		1,5 В; 2,0 Mn	закалка, средний отпуск	780 ± 85	3,9
<i>Известные сплавы и стали</i>					
7	Сормайт У30Х28Н4С4		без т.о.	540 ± 50	2,9
8	Сталь 65Г (эталон)		закалка, средний отпуск	420 ± 70	1,0

Типичными областями применения разработанных наплавочных сплавов являются различные стальные детали, работающие в сыпучих абразивных средах: вспашка почвы, дорожное строительство, нулевой цикл капитального строительства и др.

Выполнен комплекс научно-внедренческих работ, позволивший осуществить внедрение технологичной упрочнения наплавкой рабочих органов почвообрабатывающих машин (лемехов, долот, лап культиваторов, полевых досок и грудей отвала) сплавами из чугунной стружки на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения Беларуси. Результаты многочисленных полевых испытаний, проведенных в различных почвенно-климатических условиях Беларуси и Российской Федерации, свидетельствуют о повышении долговечности и работоспособности упрочненных деталей (таблица 2). Разработаны технические условия и технологические процессы упрочнения наплавкой указанных деталей. На Минском заводе шестерен был создан специализированный участок по производству упрочненных деталей плугов. Ресурсо-энергосберегающее значение обсуждаемой технологии состоит не только в импортозамещающей, высокоэффективной утилизации чугунной стружки, но и в прямой экономии топлива при вспашке упрочненными плужными лемехами, за счет эффекта самозатачивания составляющей 10–15 %.

В последние годы обсуждаемые технологии активно развиваются в направлении расширения сырьевой базы металлоторходов для создания эффективных борсодержащих наплавочных сплавов. В качестве сырья используют отходы стальной и чугунной дроби, а так же стружку сталей Х6ВФ и Р6М5 [10–11].

**Антифрикционные плазменные покрытия из борсодержащих порошковых сплавов.** Развитие тенденций снижения стоимости подшипников скольжения обусловило интенсивную разработку антифрикционных материалов на железной основе, в том числе из металлоотходов с экономным легированием для придания

специальных свойств. Перспективными считаются разработки, отвечающие классическим представлениям о структуре антифрикционных материалов, предложенные Г. Шарпи: упрочненная матрица, имеющая жесткий каркас с мягкими фазами, повышающими антифрикционные свойства материала. Выполненный анализ стружечных отходов свидетельствует о перспективности применения чугунной стружки с дополнительным легированием медью и бором для получения антифрикционных покрытий плазменным напылением [12]. Использование этих материалов обеспечивает снижение расхода цветных металлов и повышение эксплуатационных свойств трибосопряжения.

Ведущую роль для приобретения покрытием специальных антифрикционных свойств играет диффузионное легирование сплавов. Напыленное покрытие наследует композиционное строение диффузионно-легированного порошка. Технологические возможности диффузионного легирования позволяют получать широкий спектр структур. Структура напыленного покрытия по сравнению с наплавкой характеризуется более высокой степенью гетерогенности и ярко выраженной структурной наследственностью по отношению к ДЛ-порошку. Полученная композиционная структура сохраняет структурные элементы ДЛ-стружки — бориды, феррито-перлитное ядро (рисунок 2). Происходит лишь частичное оплавление боридной оболочки. Высокая степень гетерогенности структуры покрытия обеспечивает снижение макротвердости более чем на 30 % по сравнению с наплавкой того же состава [13].

Разработан и запатентован антифрикционный гетерогенный материал, полученный плазменным напылением диффузионно-легированной бором и медью чугунной стружки. Высокая износостойкость напыленного покрытия обеспечивается за счет наличия и распределения в структуре высокотвердых, избыточных фаз, обеспечивающих релаксацию пиковых нагрузок, фаз, обладающих высокими антифрикционными свойствами, матричных фаз, воспринимающих основные нагрузки и обеспечивающих основной отвод тепла из зоны контакта и эвтектических фаз, повышающих несущую способность материала (рисунок 3). Износостойкость разработанного покрытия в тяжелых условиях трения скольжения с перменной нагрузкой сопоставима или превосходит износостойкость традиционных бронз (БрАЖ 9-4, БрОЦС 5-5-5) [14].

Таблица 2 — Результаты приемочных полевых испытаний упрочненных наплавкой борсодержащими сплавами плужных лемехов и долот (\*) на Белорусской МИС (Минская обл.) и Северо-Западной МИС (Ленинградская обл., Россия)

Плуг, производитель	Место проведения испытаний	Ресурс лемеха (Га)	
		сталь 65Г	с наплавкой
ПКМП 5-40, Минский завод шестерен	Белорусская МИС	11,3 (10,0)*	17,9 (17,0)*
ПГП 4-40, «Кузлитмаш», Пинск	Белорусская МИС	15,0 (10,0)*	30,0 (19,0)*
ПКМ 6-40С, Минский завод шестерен	Северо-Западная МИС	12,6	19,7

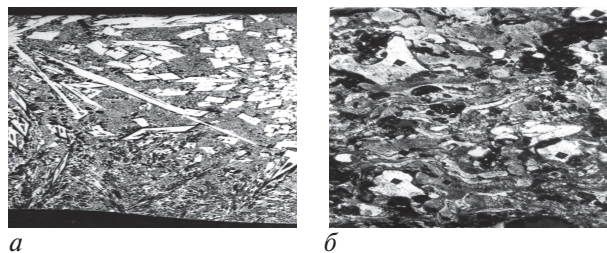


Рисунок 2 — Сравнение микроструктуры наплавленного слоя (а) и газотермического покрытия (б) из борированной стружки серого чугуна (x 400)

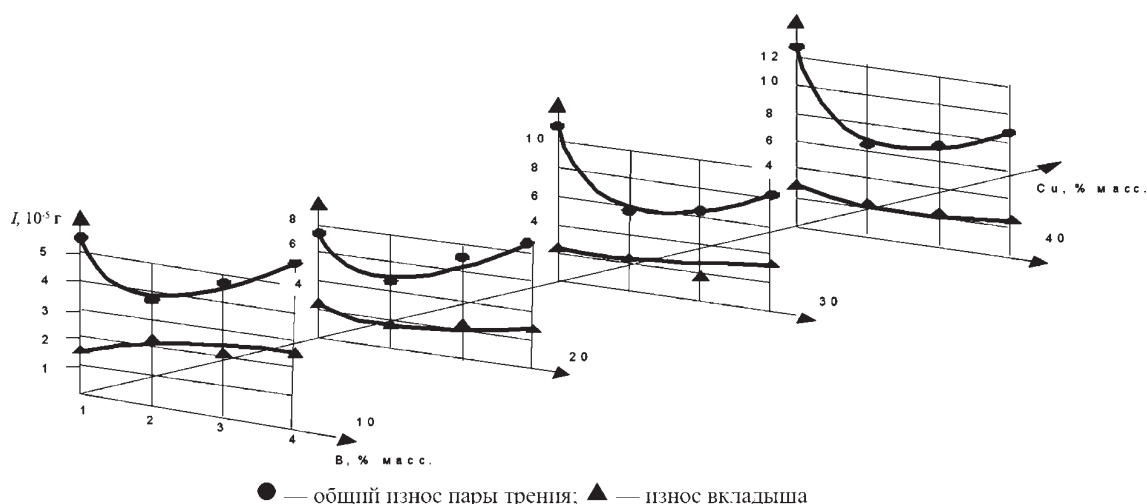


Рисунок 3 — Износ пары трения в зависимости от содержания бора и меди в газотермическом покрытии (режим трения: нагрузка переменная 3 ÷ 9 МПа, скорость скольжения 7 м/с)

**Заключение.** Широкомасштабное применение разработанных подходов получения защитных покрытий из борсодержащих сплавов на основе металлоторходов открывает широкие возможности ресурсосбережения при создании и освоении упрочняющих и реновационных технологий на различных предприятиях. Основными факторами, обеспечивающими ресурсосберегающий эффект являются активное использование внутренних вторичных сырьевых ресурсов машиностроительных предприятий, в частности стружечных металлоотходов, и высокая технико-экономическая эффективность упрочнения быстрозашиваемых деталей отечественными сплавами.

#### Список литературы

1. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф.И. Пантелеенко. — Минск: Технопринт, 2001. — С. 300.
2. Любецкий, С.Н. Разработка технологии диффузионного легирования железных порошков и получение износостойких покрытий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / С.Н. Любецкий; БПИ. — Минск, 1991. — 19 с.
3. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Минск: Технопринт, 2002. — С. 175.
4. Восстановление деталей машин: справ. / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова. — М.: Машиностроение, 2003. — 672 с.
5. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугунной стружки / В.М. Константинов Н.В. [и др.]. — Минск: Технопринт, 2004. — 137 с.

6. Константинов, В.М. Теоретические и технологические аспекты создания экономно-легированных защитных слоев из диффузионно-легированных сплавов / В.М. Константинов // Вестн. БНТУ. — 2007. — № 2. — С. 29–37.
7. Константинов, В.М. Ресурсо-энергосберегающий потенциал применения диффузионно-легированных сплавов в реновационных технологиях / В.М. Константинов, Ф.И. Пантелеенко // Тяжелое машиностроение. — 2004. — № 2. — С. 21–27.
8. Жабуренок, С.Н. Повышение долговечности плужных лемехов наплавкой диффузионно-легированными сплавами из чугунной стружки и последующей термической обработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / С.Н. Жабуренок; Полоцкий гос. ун-т. — Новополоцк, 2004. — 19 с.
9. Константинов, В.М. Физико-химический анализ элементов в защитных покрытиях из диффузионно-легированных сплавов / В.М. Константинов // Вестн. ПГУ. Сер. В. — 2003. — Т. 2. — № 4. — С. 15–25.
10. Пантелеенко, Е.Ф. Исследование диффузионно-легированных отходов стальной и чугунной дроби для получения защитных покрытий / Е.Ф. Пантелеенко, В.Г. Щербаков // Литье и металлургия. — 2009. — № 1. — С. 176–181.
11. Стефанович, А.В. Исследование структуры наплавленных покрытий полученных из диффузионно-легированных отходов инструментальных сталей / А.В. Стефанович // Металлургия: респб. межвед. сб. науч. тр. / БНТУ. — 2012. — Вып. 34, Ч. 2. — С. 102–110.
12. Константинов, В.М. Газотермические покрытия из диффузионно-легированной стружки, как альтернатива антифрикционным бронзам / В.М. Константинов, В.А. Фруцкий // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2002. — № 6. — С. 36–39.
13. Фруцкий, В.А. Антифрикционный материал из легированной бором и медью чугунной стружки для подшипников скольжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / В.А. Фруцкий. — Новополоцк, 2006. — 156 с.
14. Триботехнические и теплофизические свойства газотермических покрытий из диффузионно-легированной стружки / Константинов В.М. [и др.] // Трение и износ. — 2005. — Т. 25, № 2. — С. 190–196.

Konstantinov V.M.

#### Boron containing alloys for protective coatings made of metal discard: resource saving potential or development and use

The analysis of investigations, development and application of domestically produced boron containing alloys for wear-resistant protective coatings made on the base of dispersible metal discard is revealed. The examples of developed alloys and their import substitution potential are revealed in the article. It is shown, that in contemporary conditions the proper use of steel and cast-iron cuttings from engineering industry as a base material for surfacing all oys improves the efficiency of strengthening technologies.

**Keywords:** boron containing alloys, wear-resistant hard facing, steel, cast-iron cuttings

Поступила в редакцию 07.05.2014.