

На основании результатов исследований можно рекомендовать введение в расплав легирующего комплекса, состоящего из 0,1% Са, 0,15% Се и 2,5% В, как оптимального для комплексного улучшения структуры, литейных и эксплуатационных свойств литой стали. Наряду с применением ряда технологических мероприятий при заливке это дает возможность получать отливки сложной конфигурации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
2. Бор, его соединения и сплавы / Г. В. Самсонов, Л. Я. Марковский, А. Ф. Жигач, М. Г. Валяшко; Под общ. ред. Г. В. Самсонова. – Киев: АН УССР, 1960. – 590 с.
3. Гальдитейн Я. Е., Мизин В. Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
4. Винаров С. Н. Свойства конструкционной стали с бором. – М.: Оборонгиз, 1955. – 325 с.
5. Бабаскин Ю. З. Структура и свойства литой стали. – Киев: Наук. думка, 1980. – 240 с.
6. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов: Учеб. для вузов. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

УДК 621.793

**В. М. КОНСТАНТИНОВ**, канд. техн. наук,  
**В. И. СОРОГОВЕЦ**, канд. техн. наук,  
**Т. В. БОРОВИЦКАЯ** (ПГУ\*)

### ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЧУГУННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДРОБЕМЕТНЫХ УСТАНОВОК ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Детали дробеметных установок работают в жестких условиях ударного газообразивного изнашивания. Традиционным материалом для них являются белые износостойкие чугуны. Однако вследствие того что эти детали дорогостоящи и, как правило, изготавливаются в России, ряд предприятий предпочитает производить их собственными силами. Наиболее распространенным сплавом в этом случае является серый чугун. Катастрофически низкая стойкость таких деталей компенсируется их низкой стоимостью и большими объемами производства. Так, например, стойкость лопатки из серого чугуна, отлитой на Полоцком заводе сельхозоборудования (ПЗСО), составляет 3 – 6 ч работы, а стойкость дробеметной камеры, произведенной на ОАО «Минский подшипниковый завод» (ОАО МПЗ), – 2 – 3 смены. В то же время следует отметить, что применение серого чу-

\* Полоцкий государственный университет.

гуна с технологической точки зрения оправданно благодаря высокой технологичности и низкой стоимости. Есть основание полагать, что значительная часть машиностроительных предприятий сталкивается с отмеченной задачей, решая ее доступными методами. Таким образом, проблема экономически и технически эффективного упрочнения чугунных деталей дробетных установок весьма актуальна для литейных участков и производств Беларуси.

**Классификация методов поверхностного плазменного упрочнения деталей.** Важным резервом экономии материальных и трудовых ресурсов является применение поверхностного упрочнения концентрированными источниками нагрева, позволяющего резко повысить срок службы изделий, улучшить их эксплуатационные характеристики, снизить производственные затраты [1]. Распространенной технологией поверхностного упрочнения является лазерное, однако большой ее недостаток – высокая стоимость. В связи с этим актуальна разработка методов поверхностного упрочнения концентрированными потоками энергии, имеющими близкие к лазерным технические характеристики, но на порядок меньшую стоимость. К таким источникам следует отнести в первую очередь плазменное поверхностное упрочнение.

Основной отличительной особенностью методов поверхностного упрочнения концентрированными источниками нагрева является возможность получения скоростей нагрева и охлаждения материалов, на несколько порядков превышающих значения, характерные для традиционных методов упрочнения (печной закалки, закалки ТВЧ, газопламенной закалки и др.).

Классификация возможных способов упрочнения поверхностей деталей концентрированными источниками приведена в табл. 1.

Традиционно основное внимание исследователей сосредоточено на процессах плазменной закалки и химико-термической обработки стальных деталей (способы  $a_3$ ,  $c_3$ , табл. 1). Оплавление поверхности детали при этом недопустимо и рассматривается как брак [2]. Значительно меньше работ посвящено плазменному переплаву поверхности. В этом случае локальное оплавление рабочей поверхности приводит к формированию на ней отбеленного слоя с дисперсной дендритной структурой (способ  $a_4$ , табл. 1). При этом скорость охлаждения расплава составляет примерно  $10^4$  °C/с, что и обуславливает высокую степень дисперсности закристаллизовавшейся структуры. Следует отметить, что структуры оплавленной зоны при плазменном и лазерном упрочнении близки, что делает предпочтительным плазменное оплавление. Определенное применение нашли способы лазерного и плазменного оплавления газотермических покрытий (способы  $b_2$  и  $b_4$ , табл. 1). Однако сложность этой технологии ограничивает ее промышленное использование.

Наиболее эффективно, по мнению авторов, плазменное упрочнение с оплавлением чугунных деталей (способ  $a_4$ , табл. 1). В этом случае воз-

можно получение отбеленного слоя с высокой износостойкостью. Дополнительное легирование переплавляемого слоя (способ  $c_4$ , табл. 1) открывает широкие возможности синтеза отбеленного слоя требуемого уровня свойств.

Таблица 1

**Классификация способов воздействия концентрированных источников энергии на поверхности стальных и чугуновых деталей**

Источник нагрева, характеристика воздействия (1, 2, 3, 4)		Объект воздействия (a, b, c)		
		Поверхностный слой детали без дополнительного легирования (a)	Нанесенное покрытие на детали (b)	Поверхностный слой детали с дополнительным легированием (c)
Лазерный луч	Быстрый нагрев и охлаждение без оплавления (1)	Лазерная закалка сталей и сплавов ( $a_1$ )	Лазерное термочувствительное наплавленное покрытие ( $b_1$ )	—
	Нагрев с оплавлением поверхности (2)	Лазерное оплавление сталей и чугунов ( $a_2$ )	Лазерное оплавление газотермических порошковых покрытий ( $b_2$ )	Лазерное легирование поверхности сплавов ( $c_2$ )
Плазменная дуга	Нагрев и охлаждение без оплавления (3)	Плазменная закалка выскоуглеродистых сталей ( $a_3$ )	—	Плазменная химико-термическая обработка сталей ( $c_3$ )
	Нагрев с оплавлением поверхности (4)	Плазменный переплав поверхности сталей и чугунов ( $a_4$ )	Плазменное оплавление газотермических порошковых покрытий ( $b_3$ )	Плазменное оплавление с дополнительным легированием ( $c_4$ )

**Исследование поверхностного плазменного оплавления чугуновых деталей без дополнительного легирования.** Термическое воздействие на поверхность чугуновой детали высококонцентрированным источником энергии является сложным комплексным физико-химическим процессом. Неравновесная эвтектическая кристаллизация переплавленного слоя, структурные изменения в зоне термического влияния, высокий температурный градиент – все это обуславливает сложность процесса. В общем случае макроструктура полученного слоя состоит из двух основных зон: переплавленного эвтектического слоя и зоны термического влияния (рис. 1).

Из всех факторов плазменного оплавления наибольшее влияние оказывает сила тока плазменной дуги. Предварительные опыты позволили определить целесообразный диапазон исследований: 50 – 200 А при линейной скорости перемещения источника 13,5 – 200 мм/мин [3]. Установ-

лено, что при увеличении силы тока глубина и ширина модифицированного слоя возрастают. Величина проплавления серого слоя в изучаемом случае может достигать 20 мм (рис. 2). При больших токах и высоких скоростях перемещения плазмотрона процесс протекает крайне нестабильно. При увеличении скорости перемещения плазмотрона более 200 мм/мин он переходит в автоколебательный режим.

При металлографическом исследовании шлифов и изломов чугунных образцов различного состава после плазменного оплавления было установлено, что получение отбеленных слоев без трещин возможно при предварительном подогреве свыше 300°C. Переплавленный слой имеет твердость HV 550 – 600 и структуру, характеризующуюся большой гетерогенностью, состоящую из квазиледебурита, цементита, карбидов, мартенсита, остаточного аустенита, бейнита, сорбита, графита в различных соотношениях и количествах в зависимости от вида чугуна и режимов обработки.

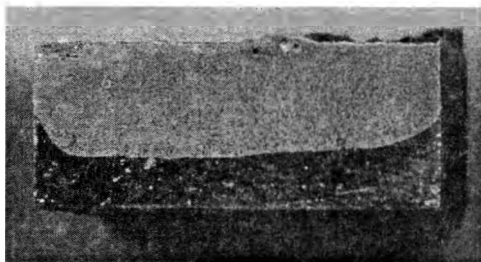


Рис. 1. Слой, полученный оплавлением поверхностного слоя чугуна СЧ-20 плазменной дугой

Зона термического влияния представляет собой разорванную цементитную сетку, мартенсит, остаточный аустенит, троостит, троостосорбит, переходящий в перлит (исходная структура). Микротвердость оплавленной поверхности составляет 6300 – 7000 МПа (оплавление с подогревом) и 7000 – 9000 МПа (без подогрева).

Проведенные исследования позволили определить оптимальный режим плазменного оплавления чугунных деталей:  $I = 70 - 90$  А,  $v = 100 - 150$  мм/мин. При этих режимах было выполнено упрочнение пар-

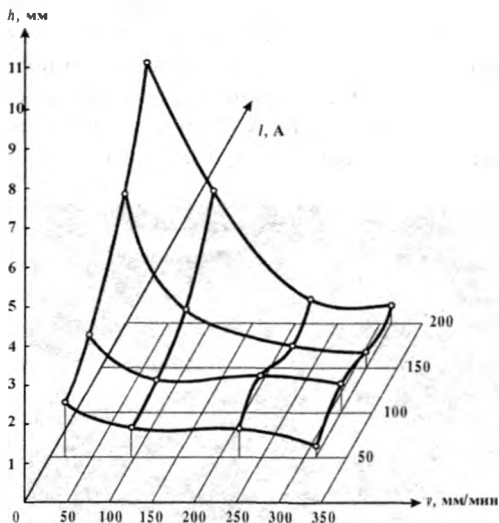


Рис. 2. Влияние силы тока и скорости перемещения плазмотрона на глубину зоны термического влияния

тии чугуновых дробеметных камер на МПЗ. Производственные испытания показали 10-кратное повышение срока службы (табл. 2).

Таблица 2

**Технико-экономические показатели плазменного упрочнения дробеметной камеры на ОАО «Минский подшипниковый завод»**

Показатель	Дробеметная камера без упрочнения	Дробеметная камера, упрочненная плазменным оплавлением поверхностного слоя
Твердость рабочей поверхности	200 – 250 НВ	50 – 65 HRC,
Период стойкости в условиях нормальной эксплуатации, сут.	3	30 – 45
Годовая потребность, шт.	400	30 – 40

Анализ изношенной поверхности упрочненных камер обнаружил следы хрупкого разрушения (рис. 3). Отбеленный слой обладает повышенной хрупкостью за счет формирования значительных внутренних напряжений, микротрещин и наличия цементитной структуры. Закономерным в этой ситуации представляется дополнительное легирование переплавленного слоя как карбидо- и боридообразующими элементами, так и аустенизирующими.

**Исследование процесса поверхностного плазменного легирования чугуна.** Поверхностный переплав чугуна с легирующими порошками позволяет придать упрочняющему слою повышенные физико-механические свойства. Авторы работы [4] для этих целей предложили использовать чистые порошки Cr, Ni, V. Однако их высокая стоимость и отсутствие в Беларуси их собственного производства снижают эффективность упрочнения.

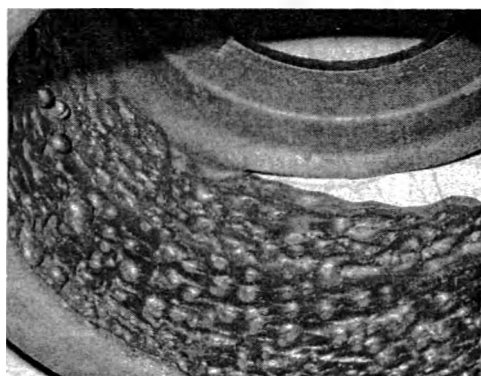


Рис. 3. Упрочненная поверхность дробеметной камеры после 30 суток эксплуатации

В работе в качестве легирующих порошков обмазки применяли самофлюсующийся порошок на никелевой основе ПГ-10Н-01 и порошок из стружки белого чугуна ИЧХ28Н2, диффузионно-легированный бором [5]. Первоначально было изучено влияние толщины легирующей обмазки на степень упрочнения слоя, показателем чего была его твердость. Установлен экстремальный характер влияния толщины обмазки на твердость переплавленного слоя.

Пики экстремума исследуемых порошков не сопадают. Первоначальное резкое повышение твердости обусловлено легирующим влиянием обмазки. В результате плазменного переплава в этом случае формируется слой белого чугуна, дополнительно легированного никелем и хромом.

При экстремальной твердости слоя его расчетный химический состав следующий, % (по массе): 10 – 15 Ni, 3 – 5 Cr, 0,5 – 1,0 Si, Fe – остальное. Дальнейшее уменьшение твердости слоя при повышении толщины обмазки обусловлено снижением доли железа и углерода при увеличении никеля. Начиная с толщины обмазки 0,4 мм, правомерно говорить не о легировании переплавленного слоя чугуна, а о традиционной наплавке слоя самофлюсующегося порошка. При этом резко возрастает расход порошка. Для порошка ПГ-10Н-01 оптимальная толщина легирующей обмазки составляет 0,1– 0,3 мм. Последующее увеличение толщины обмазки нецелесообразно как с технической, так и с экономической точки зрения. Для легирующей обмазки из порошка ИЧХ28Н2Р4 обнаружено смещение пика экстремума, обусловленное меньшим воздействием его легирующих элементов. Однако твердость слоя в области оптимальных толщин обмазки выше. Это связано с более высокой концентрацией карбидообразующих элементов, в частности хрома, в переплавленном слое. По химическому составу этот слой близок к хромистым износостойким чугунам. Оптимальная толщина обмазки в этом случае составляет 0,40 – 0,55 мм.

Получаемые структуры переплавленного слоя разнообразны – от доэвтектических до заэвтектических (рис. 4). Они зависят от количества и качества вводимого порошка. При минимальном количестве легирующего порошка формируется ледебуритная структура с ярко выраженным дендритным строением (рис. 4, б). Увеличение количества легирующего порошка изменяет структуру. Количество избыточных фаз увеличивается (рис. 4, а, б). Они имеют преимущественную ориентацию в направлении теплоотвода – перпендикулярно к подложке. В ряде случаев в структуре присутствуют фрагменты нерастворенного графита. Общая особенность анализируемых структур – высокая дисперсность структурных составляющих и метастабильность структуры. Карбидная фаза присутствует как в виде призматических обособленных борокарбидов, так и карбидной сетки.

Следующим этапом исследований стали производственные испытания изготовленных образцов в дробеметной камере Полоцкого завода сельхозоборудования.

Установлено, что уровень износостойкости упрочненных образцов, дополнительно легированных порошком ИЧХ28Н2Р4, в 1,4 раза выше, чем образцов с легированием порошком ПГ-10Н-01 (табл. 3).

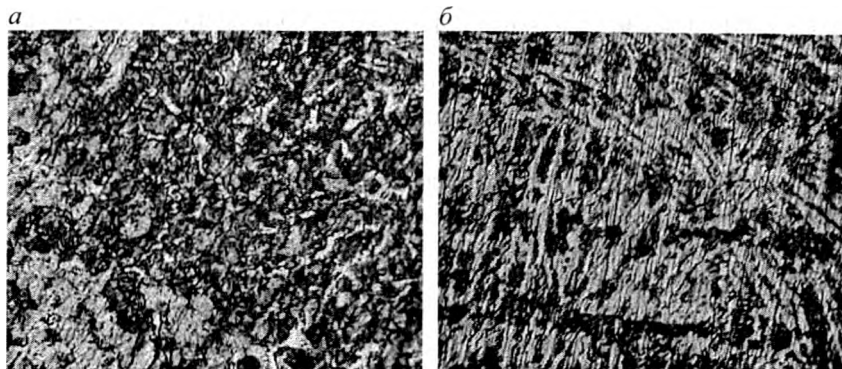


Рис. 4. Микроструктуры оплавленных покрытий плазменной дугой на сером чугуна при толщине переплавленного слоя:  
 а – 0,6 мм; б – 0,8 мм

Таблица 3

Результаты испытаний образцов на износостойкость  
 в дробеструйной камере ПЗСО,  $t_{исп} = 28$  мин

Легированный порошок	Твердость HRC <sub>3</sub>	Потеря массы образцов $\Delta m$ , г	$\epsilon$ , мин/г
ИЧХ28Н12	60±2	0,5207	53,77
	55±5	0,4078	68,66
	57±3	0,3687	75,94
	55±5	0,4652	60,19
	57±3	0,5306	52,77
	60±2	0,5503	50,88
	60±3	0,5489	51,01
	62±3	0,7416	37,36
ПГ-10Н-01	58±2	0,7897	35,46
	58±2	0,5899	47,46
	55±1	0,7195	38,92
	58±2	0,7717	36,28
	58±2	0,8849	31,65
	58±2	0,6386	43,85
	52±2	0,7842	35,17
	54±3	0,7045	39,74

Таким образом, плазменное легирование с оплавлением чугуновых деталей открывает широкие возможности синтеза износостойких слоев, аналогичных по свойствам белым износостойким чугунам. Регулируя качество и количество вводимого порошка, можно в широком диапазоне варьировать химический состав и уровень свойств слоя.

Применение в качестве присадочных материалов традиционных наплавочных порошков нецелесообразно. Перспективны для этих целей стружечные высоколегированные металлоотходы, дополнительно легированные диффузионным методом. Определенный интерес представляет использование ферросплавов.

Разработан и внедрен технологический процесс плазменного упрочнения чугунных деталей дробеметных установок. Применение упрочненных дробеметных камер на МПЗ позволило повысить срок их службы в 10 раз при одновременном снижении потребности в них в 9 – 10 раз.

Работа выполнена по заданию 03.06.01 межвузовской программы фундаментальных исследований «Металлургические процессы».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Спиридонов Н. В., Кобяков О. С., Куприянов И. Л.* Плазменные лазерные методы упрочнения деталей машин / Под ред. В. Н. Чачина. – Мн.: Выш. шк., 1988. – 155 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский, С. С. Сомотучин, Н. И. Пирч, В. И. Комир. – Киев: Техника, 1990. – 109 с.
3. *Сороговец В. И.* Исследование процесса плазменного поверхностного переплава серого чугуна // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. – Новополоцк, 1999. – С.36 – 39.
4. Износостойкость слоя поверхностного переплава чугуна с легирующими порошками / В. И. Турыгин, А. Г. Клабукав, М. И. Мясин, Л. Ф. Глухова. – Деп. в ВИНТИ 12.03.91, № 1084-В91.
5. Пат. РБ № 3207, МКИ 6В22F 1/02, 9/16. Способ нанесения диффузионных покрытий на металлические порошки, преимущественно для наплавки.