

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АГРЕГАТОВ ВОЕННОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

Рассмотрен вопрос возможности повышения адгезионной прочности покрытий, нанесенных холодным газодинамическим напылением электроискровой обработкой при устранении боевых повреждений чугунных корпусных деталей военной автомобильной техники.

Ключевые слова: боевые повреждения чугунных корпусных деталей; электроискровая обработка; газодинамическое напыление; адгезионная прочность.

D. I. Konin, V. V. Almazov

RESTORATION OF CASE DETAILS OF UNITS OF MILITARY VEHICLES IN A COMBINED WAY

The article deals with the possibility of increasing the adhesive strength of coatings applied by cold gas-dynamic spraying by electrospark treatment while eliminating combat damages to cast-iron case details of military vehicles.

Keywords: combat damages to cast-iron case details; electrospark processing; gas dynamic spraying; adhesive strength.

Требования по обеспечению высокой подвижности войск вызывают необходимость уменьшения продолжительности ремонта машин и скорейшего возврата их в строй, тем самым подчеркивают возросшее значение ремонта в полевых условиях подвижными ремонтными органами. Опыт боевых действий Афганистана, Чеченской республики показал, что в 80% случаев причиной нарушения работоспособности машин являются боевые повреждения, вызывающие потерю герметичности корпусных деталей основных агрегатов. Воздействие стрелкового оружия, осколков фугасов и снарядов в первую очередь приводит к образованию пробоин и трещин корпусов агрегатов и узлов [1]. В этой связи вопросы внедрения в подвижные ремонтные органы альтернативных низко энерго- и трудоемких способов восстановления корпусных деталей сегодня актуальны.

Анализ конструкционных материалов корпусных деталей агрегатов военной автомобильной техники (ВАТ) показывает, что 60 % из них выполнены из сложносвариваемых высокоуглеродистых сплавов (чугунов). Высокая энергоемкость сварочных процессов, необходимость применения специального оборудования, потребность в специалистах высокой квалификации, низкая производительность значительно снижают эффективность сварки, пайки и применения эпоксидных композиций для восстановления герметичности корпусных деталей ВАТ, получивших боевые повреждения. В результате эффективность функционирования подвижных ремонтных органов снижается [2, 3].

Восстановление герметичности корпусных деталей ВАТ, получившей боевые повреждения, возможно методом холодного газодинамического напыления (ХГДН). Однако исследования показывают, что покрытия, нанесенные методом ХГДН, обладают потенциально высокими свойствами, но область применения ограничивается низким уровнем адгезионной прочности (АП) при восстановлении чугунных деталей [4]. Причиной низкой адгезионной прочности являются особенности формирования холодных газодинамических покрытий на чугунных деталях, связанные с наличием на поверхности свободного углерода.

Большинство способов повышения адгезионной прочности газодинамических покрытий были направлены на подготовку поверхности основы под напыление. По мнению ученых, наиболее перспективным способом подготовки поверхности при ХГДН является абразивная обработка электрокорундом (Al_2O_3) [4]. Такая подготовка, во-первых, очищает поверхность и выводит ее из состояния термодинамического равновесия со средой, освобождая межатомные

связи поверхностных слоев, во-вторых, увеличивает шероховатость поверхности, тем самым увеличивая адгезионную прочность газодинамического покрытия. Испытания газодинамических покрытий на АП показали, что данная обработка вносит существенные изменения в поверхностные слои напыляемой поверхности. Так, величина АП на алюминиевых, медных и цинковых подложках составляет 55–65 МПа, на стальных – 30–35 МПа, что сравнимо с результатами при напылении газотермическими методами. При подготовке чугунной поверхности авторы рекомендуют абразивно-струйную обработку вести под углом 90°. Однако вопрос подготовки чугунной поверхности основы данной абразивной обработкой не приводит к существенным изменениям, и прочность сцепления составляет 20–22 МПа.

Поэтому отдельно метод ХГДН не применяют в подвижных ремонтных органах и ограничено используют в стационарных. Повысить адгезионную прочность ХГДН на чугунных деталях (до 60 МПа) возможно путем удаления свободного углерода с поверхности основы абразивно-струйной обработкой электрокорундом в комплексе с термохимической очисткой, а также развитием интерметаллидных связей на границе раздела между покрытием и основой путем увеличения температуры контакта при напылении [5]. Использование данного способа подготовки поверхности чугунной детали предъявляет повышенные требования к точности соблюдения большого количества технологических параметров процесса, что в подвижных ремонтных органах обеспечить трудно, а отклонение от них приводит к уменьшению адгезионной прочности покрытия.

Сократить количество технологических операций, тем самым усовершенствовать технологический процесс подготовки поверхности чугунной детали перед нанесением газодинамического покрытия возможно применением электроискровой обработки (ЭИО), которая по результатам исследований позволяет формировать на поверхности детали различные износостойкие покрытия (наноструктуры) с заданными свойствами [6].

Технология электроискровой обработки металлических поверхностей основана на использовании импульсного электрического разряда, проходящего между электродами в газовой среде. Сущность его состоит в том, что при электроискровом разряде в такой среде происходит разрушение материала электрода (анода) и перенос продуктов эрозии на деталь (катод).

Электроискровой обработкой можно восстанавливать изношенные детали и изменять свойства их приповерхностного слоя. Нанесенный на рабочую поверхность детали слой имеет прочную связь с основой, так как его образование сопровождается химическим и диффузным процессами [7].

Электроискровая обработка включает в себя три метода: электроискровая наплавка (ЭИН), электроискровое упрочнение (ЭИУ) и электроискровое легирование (ЭИЛ).

Электроискровой наплавкой при восстановлении поверхностей неподвижного соединения можно нанести покрытие до 1,5 мм и более.

При электроискровом упрочнении (ЭИУ) перенесенный материал электрода легирует металл детали и, соединяясь химически с диссоциированным атомарным азотом воздуха, углеродом и материалом детали, образует диффузионный износостойчивый упрочненный слой, состоящий из интерметаллидов, нитридов, карбонитридов, боридов, силицидов [8].

При ЭИО деталей изменяются физико-механические свойства материала и микрогеометрия поверхности. В качестве наплавочных материалов (электродов) для ЭИО могут использоваться материалы, приведенные в таблице 1 [9].

К первой группе материалов относят соединения тугоплавких металлов, которые могут иметь небольшое количество металлической связки. Материалы этой группы образуют хороший слой покрытия и вследствие их небольшой химической активности наименее чувствительны к окружающей среде.

В результате нанесения материалов второй группы на поверхности образуется мягкий антифрикционный и антикоррозионный слой, который увеличивает надежность работы сопряжений. Преимущество нанесения покрытий материалами второй группы ЭИО перед другими способами заключается в высокой прочности сцепления покрытия с основой и возмож-

ности нанесения этих материалов в заключительной стадии обработки изделия без какого-либо воздействия на остальные части его поверхности.

Т а б л и ц а 1 – Электродные материалы

I группа – твердые соединения и сплавы	II группа – мягкие металлы и сплавы	III группа – другие токопроводящие материалы
1 Карбиды, бориды, нитриды и прочие твердые соединения металлов. 2 Вольфрамсодержащие сплавы. 3 Безвольфрамовые твердые сплавы	1 Металлы: алюминий, медь, серебро, золото, свинец, олово. 2 Сплавы: латуни, бронзы и др.	1 Чистые металлы: вольфрам, хром, молибден, никель, титан. 2 Ферросплавы. 3 Стали углеродистые и легированные. 4 Чугуны. 5 Графиты. 6 Кремний

К третьей группе электродных материалов относят все остальные металлы. Здесь наблюдается большое различие в способности металлов осаждаться на изделия, обусловленное свойствами самих металлов.

Определяющими факторами толщины получаемой поверхности при ЭИО являются материалы катода и анода, время обработки, энергетические режимы установки, частота вибрации электрода, диаметр электрода и другие.

Как известно, в первом приближении линейную зависимость прироста массы металла на поверхности детали при электроискровой наплавке за единицу времени можно представить в виде [10]:

$$\rho V = (\varpi \tau_u - m_0) \cdot \nu_u \cdot t_{об}, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла, перенесенного на поверхность детали, г/мм³;

V – объем металла, перенесенного на поверхность детали, мм³;

ϖ – массовая скорость разрушения электрода за единичный искровой разряд, г/мин;

τ_u – длительность единичного импульса тока, с;

m_0 – масса разрушенного электрода за единичный искровой разряд, выброшенная в окружающую среду, г;

ν_u – частота импульсов тока, вырабатываемых генератором, Гц;

$t_{об}$ – время обработки до насыщения поверхности детали наплавляемым материалом и достижения необходимой сплошности, мин.

Для различных пар «деталь – электрод» объем материала, переносимого на обрабатываемую поверхность в единицу времени, приближенно можно определить по формуле, мм³/мин [10]:

$$\frac{dV}{dt} = Y = AW^\theta \nu_u^\zeta K_c C_n, \quad (2)$$

где A, θ, ζ – коэффициенты, зависящие от свойств сопряженных электродов, в частности, коэффициентов температуропроводности, термического удлинения, термического напряжения и диаметра электрода;

$W = JU\tau_u$ – энергия единичного искрового разряда, Дж;

J – сила тока единичного искрового разряда, А;

U – напряжение единичного искрового разряда, В;

τ_u – длительность импульсов, с;

ν_u – частота импульсов тока, вырабатываемых генератором, Гц;

K_c – коэффициент, учитывающий влияние на массоперенос разрядных емкостей, включенных параллельно межэлектродному промежутку;

C_n – коэффициент переноса.

Таким образом, при увеличении мощности искрового разряда происходит увеличение производительности процесса ЭИН. Коэффициент переноса материала эродированного электрода на поверхность детали будет равен:

$$C_n = \left(\frac{\rho V}{\omega \tau_u} \right) \cdot \nu_u \cdot t_{об} = B - K_n W, \quad (3)$$

где B – коэффициент, учитывающий насыщение переносимого материала и наплавляемой поверхности материалами из внешней среды. Для сплавов на основе железа и меди $B \approx 1$;

K_n – коэффициент влияния энергии разряда на перенос материала.

Многочисленные эксперименты, проведенные различными исследователями, показали, что коэффициент переноса C_n разрушенного (эродированного) материала наплавляемого электрода на поверхность деталей из сплавов на железной, никелевой и титановой основах изменяется в широких пределах (0,25... 1,2). Значения $C_n > 1$ вызваны тем, что разрушенный материал и наплавляемая поверхность насыщены элементами из внешней среды.

Преимущественный перенос материала анода на катод осуществляется при условии [9]:

$$D_{.M} = \frac{c_K \rho_K \lambda_K (T_{пл}^K - T_x^K)^2}{c_A \rho_A \lambda_A (T_{пл}^A - T_x^A)^2} \frac{r_K}{(r_A - r_K)} \gg 1, \quad (4)$$

где c_A, c_K – удельные теплоемкость материала анода и катода, кДж/кг·К;

ρ_A, ρ_K – удельные электропроводность материала анода и катода, Ом·м;

λ_A, λ_K – удельные теплопроводность материала анода и катода, Вт/(м·К);

$T_{пл}^A, T_{пл}^K$ – температуры плавления материала анода и катода, К;

T_x^A, T_x^K – температура хладноломкости материала анода и катода, К;

r_A, r_K – атомный радиус материала анода и катода.

Таким образом, исходя из механических и теплофизических свойств электродов, электрических характеристик генераторов и механических свойств вибраторов, можно осуществлять выбор материала электрода и технологических режимов процесса ЭИН для нанесения покрытий необходимой толщины и качества, с заданными механическими свойствами.

В научно-технической литературе не имеется данных о совместном применении электроискровой обработки и «холодного» газодинамического напыления порошков для восстановления герметичности корпусных деталей. Естественно, для этого необходимо изучение физико-химических процессов между подготовленной поверхностью ЭИО и газодинамическим покрытием.

Были проведены экспериментальные исследования по электроискровой обработке, основной задачей являлся выбор материала электрода и энергетических режимов ЭИО, при которых происходит более качественное нанесение слоя, способствующее повышению адгезии ХГДН на чугунных деталях. На основе анализа литературных данных и экспертных опросов научных сотрудников лаборатории № 11 ВНИИТУВИД «Ремдеталь», длительное время занимающихся проблемами восстановления изношенных деталей методом электроис-

кровой наплавки, наиболее технически приемлемыми и доступными для обработки материалов, изготовленных из чугуна марки СЧ21 в полевых условиях, являются электроды из меди, алюминия, бронзы и сталей. Для проведения эксперимента были выбраны М1, АЛ-11, БрОС 9-4, Ст3. Электроискровую наплавку осуществляли на 2,4 и 7 режимах установки «БИГ-4» (рисунок 1), питающейся от бытовой электросети. Энергетические характеристики установки представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2 – Энергетические параметры режимов установки «БИГ-4»

№ усл. электрич. режима	Управляемые параметры генератора		Значения энергетических параметров режимов установки			
	«режим»	«коэффициент энергии»	амплитудный ток, А (±20 %)	длительность импульса, мкс (±20 %)	частота импульсов, Гц (±20 %)	энергия импульсов, Дж
1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,2	125	20	600	0,045
2		0,4			1200	
3		0,6			1800	
4		0,8			2400	
5		1,0			3000	
6	2	0,2	125	40	300	0,09
7		0,4			600	
8		0,6			900	
9		0,8			1200	
10		1,0			1500	
11	3	0,2	200	80	150	0,29
12		0,4			300	
13		0,6			450	
14		0,8			600	
15		1,0			750	
16	4	0,2	200	170	84	0,61
17		0,4			168	
18		0,6			252	
19		0,8			336	
20		1,0			420	
21	5	0,2	200	350	44	1,26
22		0,4			88	
23		0,6			132	
24		0,8			176	
25		1,0			220	
26	6	0,2	200	700	24	2,52
27		0,4			48	
28		0,6			72	
29		0,8			96	
30		1,0			120	
31	7	0,2	200	1400	12	5,0
32		0,4			24	
33		0,6			36	
34		0,8			48	
35		1,0			60	

Обработку производили до получения качественного слоя сплошностью Спл>90 %. После ЭИО образцы подвергались внешнему осмотру, при этом определяли качество сформированного слоя и наличие в нем дефектов с использованием лупы пятикратного увеличения.

На подготовленные образцы напыление проводили с использованием установки холодного газодинамического напыления «ДИМЕТ-403К» (рисунок 2) и порошком на основе Al, Zn производства «Обнинского центра порошкового напыления» на режиме, рекомендуемым для получения максимальной АП покрытия.



Рисунок 1 – Установка для электроискровой обработки БИГ-4



Рисунок 2 – Оборудование ДИМЕТ-403К для нанесения газодинамических покрытий

Далее образцы закрепляли в разрывную машину и производили отрыв по нормали штифтовым методом согласно методическим рекомендациям МР 250-87. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3 – Результаты эксперимента

№ образца	Материал электрода, размер, мм	Режим установки	Коэффициент энергии	Время обработки, с	Толщина покрытия, мм	Адгезионная проч. покрытия, МПа
1	М1, \varnothing 3	2	1,0	17	0,1	22,9
2	М1, \varnothing 3	4	1,0	15	0,1	28,9
3	М1, \varnothing 3	7	1,0	8	0,2	51,9
4	АЛ11, \varnothing 4	2	1,0	24	0,1	17,9
5	АЛ11, \varnothing 4	4	1,0	17	0,1	18,9
6	АЛ11, \varnothing 4	7	1,0	13	0,5	23,9
7	БрОС 9-4, 4*3	2	1,0	20	0,1	19,9
8	БрОС 9-4, 4*3	4	1,0	17	0,1	22,1
9	БрОС 9-4, 4*3	7	1,0	15	0,3	33,8
10	Ст3, \varnothing 4	2	1,0	15	0,1	14,2
11	Ст3, \varnothing 4	4	1,0	12	0,1	17,7
12	Ст3, \varnothing 4	7	1,0	10	0,4	20,4
13	Без обработки					14,7

Таким образом, на основании анализа результатов проведенного эксперимента можно сделать следующие заключения:

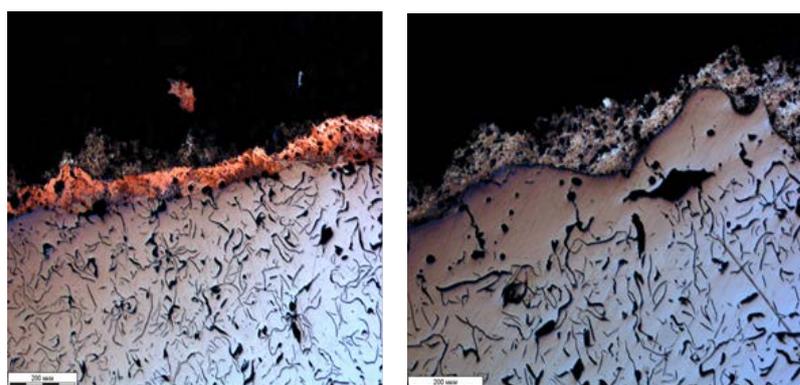
- с увеличением мощности искрового разряда происходит увеличение адгезионной прочности газодинамических покрытий и уменьшение времени электроискровой обработки;
- на мягких режимах обработки происходит наплавка материала электрода с менее развитой поверхностью (рисунок 3, а, 4, а), а на грубых происходит легирование поверхности чугуна материалом электрода с развитием рельефа и выгорание с поверхностного слоя свободного углерода (рисунок 3, б, 4, б);



а б

а – 4 режим; б – 7 режим

Рисунок 3 – Поверхность, обработанная медным электродом



а б

а – 4 режим; б – 7 режим

Рисунок 4 – Микроструктура чугуновых образцов после испытания на АП, обработанных медным электродом

- более высокие значения адгезионной прочности газодинамических покрытий получены для подложек из менее твердых материалов (медь М1, бронза БрОС 9-4, алюминий АЛ-11). Подобная зависимость связана, по-видимому, с более значительной глубиной проникновения частиц в подложку и более развитой контактной поверхностью для этих материалов, чем для подложки из стали;

- для восстановления герметичности корпусных деталей агрегатов ВАТ, получивших боевые повреждения целесообразно применить комбинированный способ, заключающийся в подготовке поверхности ЭИО медным электродом на грубых режимах и дальнейшим нанесением ХГДН.

Список литературы

- 1 Повышение эффективности ремонтных органов по восстановлению АТ в военное время: отчет о НИР (заключ.): 06-04 / 21 НИИИ, рук. В. М. Тарасов; исполн.: А. Н. Колобов [и др.]. – Бронницы, 2002. – 120 с. – Библиогр.: с. 101–116. – Инв. № 56456.
- 2 Куприянов Г. В. Способ восстановления боевых повреждений корпусных деталей военной автомобильной техники холодным газодинамическим напылением: дис. ... канд. техн. наук: 20.02.17: защищена 29.01.09: утв. 24.04.2009 / Куприянов Георгий Владимирович. – Рязань, 2009. – 206 с. – Библиогр.: с. 183–195.
- 3 Лашко С. В. Пайка металлов / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко. – М.: Машиностроение, 1988 – 376 с.: ил. – Библиогр.: с. 375–376. – ISBN 5-217-00268-9.
- 4 Технология газодинамического нанесения металлических покрытий / О. Ф. Ключев, Г. В. Буздыгар, А. В. Шкодкин. «Ремонт БТВТ и АТ». – 2004. – № 122. С. 34–39.
- 5 Коберниченко А. Б. Пооперационный анализ технологий холодного газодинамического напыления: монография / А. Б. Коберниченко, Е. Н. Моос, Г. В. Куприянов. – Рязань, 2009. – 157 с. – С. 150–157.
- 6 Бурумкулов Ф. Х. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф. Х. Бурумкулов, П. П. Лезин, П. В. Сенин, В. И. Иванов, С. А. Величко, П. А. Ионов. – Саранск, – Тип. «Крас. Окт.», 2003. – 504 с.
- 7 Сивцов В. Н. Разработка технологического процесса восстановления посадочных отверстий корпусных деталей комбинированием электроискрового покрытия и клея-компаунда: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: защищена 29.01.08: утв. 15.04.2008 / Сивцов Валерий Николаевич. – Саранск, 2008. – 189 с. – С. 174–182.
- 8 Иванов В. И. Влияние технологических режимов электроискрового легирования и материала электрода на некоторые параметры рельефа поверхности / В. И. Иванов // Электронная обработка материалов. – 1998. – № 3. – С. 12–15.
- 9 Верхотуров А. Д. Электродные материалы для электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева. – М.: Наука, 1988. – 224 с.
- 10 Бойцов А. Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов. – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.

Конин Дмитрий Иванович, Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное командное училище, канд. техн. наук, преподаватель кафедры автотехнического обеспечения.

Адрес: 390007 г. Рязань, ул. Военных автомобилистов, д. 12;

т. +7(910)567-46-71;

e-mail: dimonkonin@mail.ru.

Dmitry Konin, Engineering Ph. D., Lecturer at Ryazan Guards Higher Airborne Command School, Department of Autotechnical Support.

Address: 12, ulitsa Voennykh Avtomobilistov, Ryazan, Russia, 390007;

Phone: +7(910)567-46-71;

e-mail: dimonkonin@mail.ru.

Алмазов Валерий Владимирович, канд. техн. наук, преподаватель кафедры автотехнического обеспечения.

Адрес: 390007 г. Рязань, ул. Октябрьский городок, д. 44, кв. 103;

т. +7(910)643-91-47;

e-mail: almazov2901@yandex.ru.

Valery Almazov, Engineering Ph. D., Lecturer at Ryazan Guards Higher Airborne Command School, Department of Autotechnical Support.

Address: 103, 49, ulitsa Oktyabrskiy Gorodok, Ryazan, Russia, 390007;

Phone: +7(910)643-91-47;

e-mail: almazov2901@yandex.ru.