

**А. А. Тамаргазин, проф., д-р техн. наук**

*Национальный авиационный университет, г. Киев*

**Л.А. Лопата, доц., канд. техн. наук**

*Институт воздушного транспорта Национального авиационного университета, г. Киев*

**Ю.В. Брусило, нач. транспортного центра**

*Национальный авиационный университет, г. Киев*

**С.А. Довжук, инж.**

*Кировоградский национальный технический университет*

## Влияние факторов процесса электродугового напыления на структурообразование и свойства покрытий

В статье рассмотрены первичные (технологические факторы), касающиеся технологии и условий напыления и вторичные, которые являются производными от технологических факторов, влияющих на структурообразование и свойства покрытий. Обобщая результаты исследований по влиянию факторов процесса электродугового напыления на структурообразование и свойства покрытий, были установлены параметры процесса электродугового напыления, выбраны метод подготовки поверхности перед напылением и способ обработки напыленных покрытий.

**электродуговое напыление, свойства, структурообразование, технологические факторы, прочность сцепления**

**Актуальность.** В мировой практике упрочнения и восстановления деталей значительное распространение получил способ электродугового напыления (ЭДН), как один из самых технологичных, производительных и качественных методов. Электродуговое напыление имеет широкую область применения:

- для восстановления стальных, чугунных и из цветных металлов деталей цилиндрической и плоской формы, работающих в условиях трения скольжения, смазки и неподвижных посадок;
- для устранения дефектов стального и чугунного литья;
- для повышения жаростойкости стали алитированием (покрытие алюминием, его диффузия в поверхностные слои стального изделия);
- для нанесения антифрикционных покрытий при изготовлении подшипников скольжения;
- для долговременной антикоррозионной защиты алюминием и цинком металлоконструкций с гарантией 20-25 лет в условиях атмосферы;
- для защитно-декоративных целей с покрытием медью, бронзой, латунью, алюминием.

Широкому применению электродугового напыления способствуют его ряд существенных преимуществ перед другими способами:

- высокая производительность нанесения покрытия до 20 кг/час стали, до 10 кг/час алюминия;
- получение покрытия толщиной от 0,1 до 10 и более миллиметров;
- износостойкость в 1,5-1,8 раза выше закаленной стали 45, которая обусловлена хорошей маслостойкостью и удержанием масла в микропорах покрытия;

- обеспечение износостойкости деталей на уровне новых;
- отсутствует деформация деталей, которая неизбежна при наплавке, так как при электродуговом напылении незначительные тепловложения (температура нагрева детали 100-150° С);
- простота и технологичность процесса;
- возможность нанесения покрытия на поверхности деталей из различного материала (сталь, чугун, алюминий, бронза, дерево, полимер и др.);
- габариты деталей не лимитируют применение электродугового напыления;
- получение комбинированных металлопокрытий с заданными свойствами из различных материалов проволоки;
- низкая удельная себестоимость нанесения покрытия (в 1,4-1,8 раза ниже наплавки).

Положительные качества ЭДН (технологичность, простота, высокая производительность и износостойкость, отсутствие термоповодок, низкая стоимость и универсальность, стабильность усталостной прочности восстанавливаемых деталей) не могли быть не замечены учёными и производственниками.

Однако метод электродугового напыления как любой метод металлопокрытий имеет и недостатки. Основным недостатком всегда считалась низкая адгезионно-когезионная прочность покрытия. Вторым фактором, ограничивающим применение ЭДН, являлась невысокая по сравнению с наплавкой, твердость покрытия.

Несмотря на большое количество разработок в области ЭДН исследования развиваются активно и в настоящее время, причем они приобрели направленность на рациональное активирование процесса или последующее модифицирование.

**Факторы, оказывающие влияние на структурообразование и свойства покрытий.** ЭДН характеризуется большим числом факторов, оказывающих влияние на структурообразование и свойства покрытий. Целесообразно выделить первичные (технологические факторы), касающиеся технологии и условий напыления и вторичные, которые являются производными от технологических факторов.

К первичным факторам целесообразно отнести:

- факторы, касающиеся режимов напыления: величина сварочного тока, вид, давление и расход распыляющего газа, диаметр и форма сопла;
- факторы, касающиеся условий напыления: схема дутьевой системы; дистанция напыления, скорость перемещения металлатора;
- факторы, касающиеся напыляемого материала: диаметр проволоки, химический состав и строение проволоки, скорость подачи проволоки;
- факторы, касающиеся условий подготовки напыляемой поверхности: материал, способ подготовки, шероховатость поверхности, температура подогрева.
- факторы, касающиеся обработки напыленных покрытий.

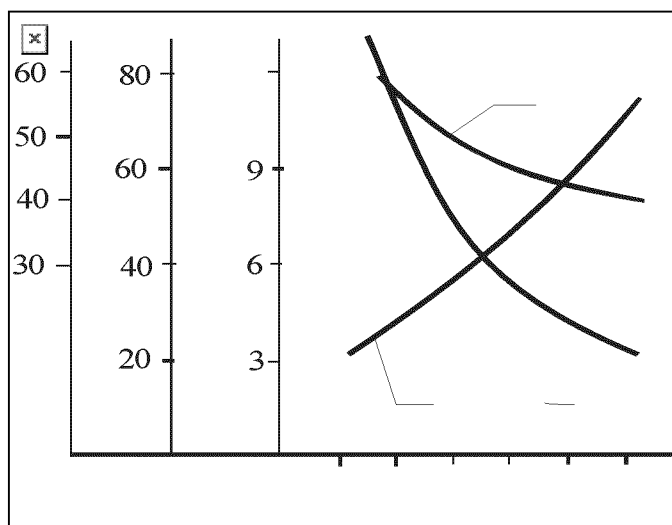
Вышеуказанные первичные факторы определяют вторичные факторы, которые оказывают влияние на кинетику и структурообразование покрытий. К ним можно отнести: диаметр, скорость и температура частиц, степень их окисления; степень активации, шероховатость и температура подложки. Необходимо отметить, что влияние большинства факторов на процесс ЭДН изучено различными исследователями.

**Исследования влияния режимов электродугового напыления на качество и свойства покрытий.** Качество покрытий и свойства в значительной степени зависят от давления распыляющего газа и дистанции напыления. Большинство исследователей сходятся во мнении, что повышение давления способствует увеличению адгезии покрытия и снижению пористости.

Исследования влияния режимов электродугового напыления на свойства покрытий показывают (рис. 1), что адгезия покрытия с увеличением скорости истечения воздуха, и,

следовательно, скорости истечения струи, повышается, а пористость снижается [1]. При истечении воздуха с дозвуковой скоростью размер расплавленных частиц в среднем составляет 200 мкм. С увеличением скорости истечения воздуха размер расплавленных частиц на 90 % находится в диапазоне 30–80 мкм. Однако такое уменьшение размера расплавленных частиц напыляемого материала ведет к более интенсивному выгоранию из них легирующих элементов, в первую очередь углерода, что обуславливает повышенную твердость покрытий при дозвуковых скоростях истечения воздуха. Содержание остальных легирующих элементов проволоки при увеличении скорости истечения воздуха из металлатора и тока дугового разряда изменяется в меньшей степени [2].

Одним из важных технологических фактор при ЭДН является дистанция напыления. С одной стороны повышение дистанции способствует повышению скорости частиц, с другой приводит к повышенному окислению частицы и снижению ее температуры. Оптимальный диапазон дистанции напыления согласно исследованиям [3] находится в диапазоне 80...150 мм (таблица 1).



1- пористость (П,%); 2- прочность сцепления ( $\sigma_{сц}$ , МПа); 3- твердость (HRC<sub>3</sub>)

Рисунок 1 – Влияние скорости истечения воздуха из сопла (V, м/с) на свойства покрытий при ЭДН

Таблица 1 – Свойства покрытий в зависимости от дистанции напыления

Свойства покрытия	Расстояние от сопла до детали, мм						
	30	50	75	100	120	200	300
Прочность сцепления, МПа	15	18	19	21	22	22	19
Содержание оксидов в покрытии, %	10	12	13	15	16	25	30

Путём совершенствования конструкции оборудования для электродугового напыления и повышения защитно-энергетического уровня факела распыла была решена задача повышения физико-механических свойств покрытий за счёт снижения окисления диспергированного металла в факеле распыла и повышения скорости полёта частиц. Для нанесения покрытий используются аппараты с различной дутьевой системой и геометрией сопла. В работе [4] отмечается преимущество аппаратов с закрытой схемой и дифференциальным соплом по

сравнению с открытой схемой центрального сопла. Поэтому исследования в данной диссертационной работе проводились на металлизаторе ЭМ-14 с диафрагменным соплом.

**Напыляемых материалы и их связь со свойствами покрытий.** При ЭДН применение любой марки проволоки, выпускаемой промышленностью, технологически возможно. При напылении малоуглеродистых нелегированных проволочных материалов покрытие имеет низкий уровень механических свойств. Твердость металла и оксидов различна и составляет – 210...280 HV и 400...560 HV соответственно. Покрытие характеризуется высокой внутренней хрупкостью из-за наличия большого количества оксидов (до 20%), высоким коэффициентом трения  $f=0,4...0,6$  и невысокой износостойкостью [5]. Прочность сцепления с подложкой не превышает 22...24 МПа. Пористость покрытия находится в диапазоне 13...18 %. Структура покрытий представляет собой слоистую систему, состоящую из вытянутых зерен (ламелей), фазовый состав которых соответствует твердому раствору хрома в  $\alpha$ -железе, с мелкодисперсными включениями сложнелегированных боридных соединений хрома и железа .

Как отмечено в литературе, относительно высокие свойства покрытий при электродуговом напылении (ЭДН) достигаются применением композиционных порошковых проволок. Анализ проблем прочностных и износостойких свойств покрытий также позволил сделать вывод, что для ЭДН необходимо использовать порошковые проволоки. Наибольшее применение находят композиционные порошковые проволоки (оболочка из сталей Св 08, Св 08 Г2С, 30ХГСА, Сталь 70, У8, У10, 20Х13, 40Х13, 65Г, наполнитель – ферросплавы, карбиды, карбобориды). К их числу можно отнести порошковую проволоку ПП-ТП-1, разработанную сотрудниками лаборатории ВНИИТВУД «Ремдеталь» (г. Москва, Россия) совместно с Мариупольским металлургическим институтом под руководством д.т.н. В.А.Роянова и д.т.н. В.Я.Зусина или ФМИ-2 разработанную учеными Физико-механического института им. Г.В.Карпенко НАН Украины (г. Львов, Украина) под руководством Похмурского В.И. [6, 7]. Защита от окисления и высокие свойства покрытий достигаются за счет взаимодействия компонентов порошковой шихты между собой, при этом происходят процессы восстановления оксидов и легирования стальной основы. Содержание феррохрома 16-19% и алюминия 14-17% в порошковой проволоке обеспечивали существенное повышение адгезионно-когезионной прочности. Твердость 50-58 HRC. Покрытия, полученные напылением порошковых проволок имеют большую твердость и износостойкость.

Практика применения порошковых композиционных проволок при газотермическом напылении показывает, что эксплуатационные свойства покрытий из порошковых проволок выше, чем из гомогенных. Преимущества порошковых проволок обуславливаются не только гетерогенной структурой покрытия после напыления, но и активным взаимодействием компонентов порошковой шихты друг с другом при напылении и с подложкой, что способствует повышению температуры частиц, раскислению оксидов на поверхности подложки, и как следствие повышение адгезии покрытия к подложке.

Однако наши исследования показали, что с повышением содержания углерода в расплавленной композиционной проволоке механические свойства покрытия повышаются, а прочность сцепления незначительно снижается. При напылении стали У8, твердость покрытия составляет 360...380 HV, прочность сцепления составляет 18...20 МПа.

Легированные и высоколегированные проволочные материалы позволяют получать наилучшие свойства ЭДН-покрытий из всех гомогенных проволочных материалов. Значительное повышение свойств обусловлено упрочняющим действием легирующих элементов в стали.

Хром способствует, при быстром охлаждении, повышению прокаливаемости стали, поэтому структура покрытий из хромистых сталей состоит в основном из мартенсита и продуктов его отпуска. При значительном содержании хрома в исходной проволоке в покрытии образуются карбиды  $Cr_{23}C_6$ , а также небольшое количество аустенита. Хром в значительной степени повышает коррозионную стойкость покрытий, а также адгезию

покрытия к смазке. На прочность сцепления покрытий хром в чистом виде влияние не оказывает. При электродуговом напылении хром практически не выгорает [8].

Никель находит широкое применение в сплавах для защитных покрытий. Он неограниченно растворим в железе, и является сильным аустенизирующим элементом [9]. Собственных высокотвердых фаз в сплавах железа никель не образует. Его влияние заключается в существенном повышении стойкости покрытий к ударным нагрузкам. С увеличением содержания никеля повышается вязкость сплава практически без ущерба для износостойкости. Никель - дорогой легирующий элемент, поэтому его количество в износостойких сплавах на основе железа ограничивают. Исключение составляют сплавы для коррозионно-стойких покрытий. В самофлюсующихся порошках никель применяют в качестве основы сплава. В этом случае достигаются высокие коррозионная и износостойкость, а также технологичность нанесения покрытия благодаря образованию в системе М-Сг-В гетерогенной структуры эвтектического типа с низкой температурой плавления (менее 1000°С).

Однако высоколегированные проволочные материалы по стоимости приближаются к порошковым проволочным материалам, тем не менее, уступая им по эффективности (таблица 2).

Согласно исследованиям, диаметр применяемой проволоки при ЭДН оказывает влияние на условия формирования металловоздушной струи. В работе [4] отмечается повышение турбулентности струи при повышении диаметра проволоки более 1,8 мм, а также повышение перепада давления в районе скрещивания проволок. При снижении диаметра проволоки менее 1,2 мм наблюдается ухудшение стабильности процесса из-за непостоянства положения точки скрещивания проволок. Оптимальным считается диапазон диаметров 1,2...1,8 мм.

**Влияние способа подготовки поверхности при ЭДН на прочность сцепления и эффективный коэффициент концентрации напряжений.** Предварительная обработка напыляемой поверхности необходима для обеспечения надежного контакта распыляемого материала и основного металла путем активации поверхностного слоя основы и удаления загрязнений. Предварительная обработка поверхности основного металла выполняется разнообразными технологическими методами. На первой стадии подготовки поверхности проводится обезжиривание для удаления различных загрязнений. Далее следует механическая обработка поверхности. Среди всех методов наиболее производительными являются обработка дробью, обдувка песком, нарезание рваной резьбы, нанесение различной формы насечек.

Обработка дробью перед напылением обеспечивает высокую адгезию (таблица 3), повышая предел выносливости основного металла. Поэтому при исследованиях образцы подвергались дробеструйной обработке стальной крошкой.

Таблица 2 –Технические и экономические характеристики распространенных марок стальных проволочных материалов

Марка проволоки	Химический состав	Назначение	Твердость после
-----------------	-------------------	------------	-----------------

			напыления, HV
Св08	C-0,08...0,1%	сварка низкоуглеродистых сталей	250...300
Св 08Г2С	C-0,08...0,1%, Mn- 1,5...2,0%, Si-0,8...1,2%	сварка низкоуглеродистых сталей	250...300
Нп 40	C-0,37...0,42%	износостойкая наплавка деталей машин	300...350
Нп 60	C-0,57...0,62%	износостойкая наплавка деталей машин	350...400
65Г	C-0,63...0,68%, Mn- 0,8...1,2%,	износостойкая наплавка деталей машин	350...400
У8	C-0,76...0,82%	износостойкая наплавка деталей машин	360...400
20Х13	C-0,18...0,22%, Cr-11...13%	износостойкая наплавка деталей машин	360...420
ПП- ТП1(порош- ковая)	C-0,67%, Cr-3,58%, Ni- 2,33%, Si-0,27%, Mn- 0,42%, Al-2,08%	электродуговое напыление и наплавка деталей трибосопряжений	400...450
НП-4 (порошковая)	Система легирования Fe-C-B-Cr	электродуговое напыление и наплавка деталей трибосопряжений	400...450

**Результаты экспериментальных исследований.** На первом этапе исследований оценивалось распределение по фракциям частиц, полученных при распылении порошковой проволоки (таблица 4, рис. 2).

Поскольку наиболее крупные фракции имеют минимальную долю в общей картине распределения, следовало ожидать, что напыленные слои будут достаточно плотными.

Таблица 3 – Влияние способа подготовки поверхности при ЭДН на прочность сцепления и эффективный коэффициент концентрации напряжений

Способ подготовки	Прочность сцепления с основой, МПа	Эффективный коэффициент концентрации напряжений [6]
-------------------	------------------------------------	---

Обработка дробью	22	0,78
Обдувка песком		1
Нарезание резьбы		3
Нанесение насечек		9
Электроискровая		8

Таблица 4 – Масс

№	Электронное изображение 1		ассовая доля, %
1			0,1
2			1,52
3			1,28
4			15,14
5			14
6	0,16...0,10	22,021	28
7	0,10...0,063	21,450	27,25
8	Менее 0,063	10,012	12,7

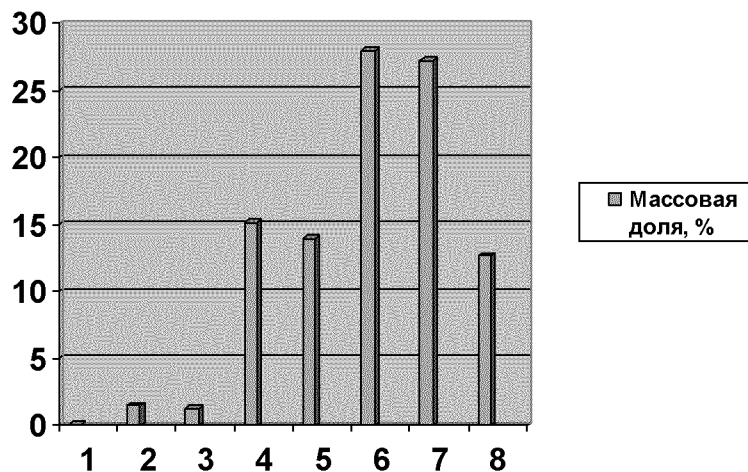


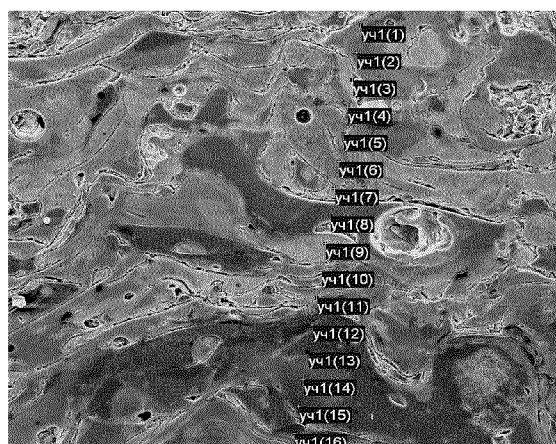
Рисунок 2 – Гистограмма распределения массовой доли частиц различной фракции

Структура напыленного покрытия представляла собой гетерофазную систему, состоящую из двух и более фаз, разделенных между собой границей раздела и отличающихся между собой по химическому составу и свойствам. Расплавленные частицы, транспортируемые высокоскоростной струей продуктов горения, в процессе столкновения с поверхностью подложки расплющиваются и перемешиваются. В результате формируется специфическая, волнистая микроструктура с остаточной пористостью. Напыленное покрытие имело ламелярную структуру закристаллизовавшихся частиц металла, оксидов и порошкового наполнителя, причем оксиды располагаются, как правило, по границам ламелей (рис. 3).

Рисунок 3 – Структура покрытия полученного электродуговым распылением порошковой проволоки марки ФМИ-2

Как и следовало из результатов исследования фракционного состава частиц распыленной порошковой проволоки, покрытия имели достаточно высокую плотность, (пористость не превышала 12-14%). Исследования, выполненные на электронном микроскопе JSM-840 и на световом микроскопе «MeF-3» фирмы "Reichert" (Австрия) показали, что порошковые частицы, входящие в распыляемую проволоку в виде наполнителя, полностью или частично сохраняются. На рисунке 4 показан фрагмент покрытия, полученного распылением порошковой проволоки ФМИ-2.

Рисунок 4 – Ф



зой проволоки ФМИ-2

**Обработка на** структурных особен электроконтактной об полученных при элек сформованных клеевым методом слоев особенностей напыленных покрытий:

появления возможных модифицированных и основании данных, данных порошков или

- сверхбыстрая кристаллизация напыленных капель расплава приводит к высокой концентрации дефектов кристаллической решетки (дислокаций, вакансий) в частицах покрытия;
- частицы покрытия имеют строение, отражающее условие гетерогенной кристаллизации с развитием фронта растущих кристаллов в направлении, противоположном отводу тепла, т.е. перпендикулярно к поверхности формирования слоя;
- напыленное покрытие имеет поры и разветвленную сеть границ;
- при напылении покрытий происходит интенсивное взаимодействие входящих в их состав элементов с окружающей средой и рабочими газами, в частности, кислородом, что приводит к существенному изменению фазового состава и свойств покрытий.

Несмотря на указанные особенности можно было ожидать, что произойдут следующие изменения структуры. В результате электроконтактной обработки напыленных покрытий из порошковых проволок в поверхностных слоях возможно образование



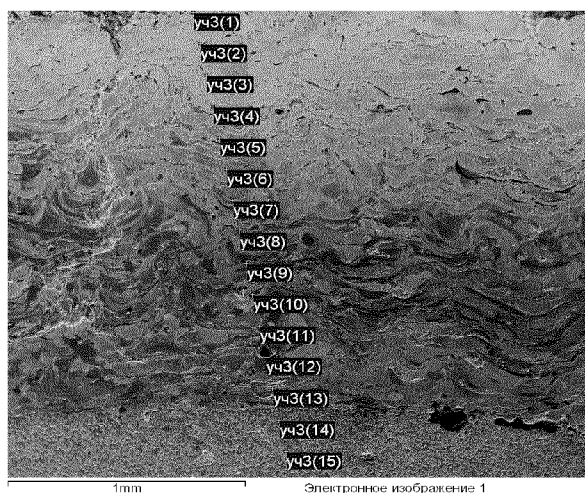
модифицированных градиентных структур, содержащих высокопрочную матричную ( $\gamma$ -фазу) (твердый раствор углерода в  $\gamma$ -Fe), а также включения карбидов и аустенита.

При этом присутствие в модифицированном слое повышенных количеств аустенита может способствовать повышению вязкости разрушения и абразивной стойкости покрытия [9, 10], а наличие в слое высокопрочных фаз (мартенсит и карбиды) должно обеспечить повышенную прочность, а также износостойкость газотермических покрытий в условиях граничного трения и трения без смазки. Кроме этого термосиловое воздействие в области повышенных температур может уменьшать пористость покрытия и увеличивать его адгезионную стойкость.

Металлографические исследования показали (рис. 5), что как и ожидалось, в результате термосилового воздействия происходит так называемое «залечивание» пор, отмеченное в работе [1, 1], плотность покрытий достаточно заметно повысилась (пористость составила 3–5 %). Количественный стереологический анализ пористости проводили по программе «Genias 26» на аттестованном автоматическом анализаторе изображения «Mini-Magiscan» фирмы "Jouze Loebel", Англия.

ДюрOMETрические исследования показали, что в процессе электроконтактной обработки происходит увеличение твердости поверхностного слоя, снижение микротвердости подповерхностных слоев и увеличение микротвердости в более глубоких слоях. Выдвинуто предположение, что происходит перезакалка поверхностного слоя газотермического покрытия. Закалка приводит к увеличению микротвердости, и высокий отпуск подповерхностных слоев, способствующий их разупрочнению. В более глубоких слоях в процессе электроконтактной обработки происходит распад остаточного аустенита, сопровождающийся повышением микротвердости (рис. 7). Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере "Micromet-II" с нагрузкой 100 г.

Рисунок 5 – Структура покрытия полученного электродуговым распылением порошковой ФМИ-2 после электроконтактной обработки



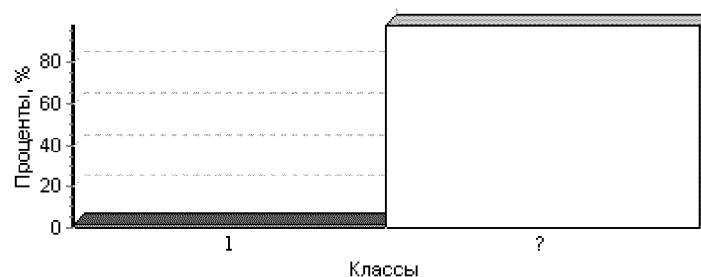


Рисунок 6 – Результаты количественного стереологического анализа пористости покрытия полученного электродуговым распылением порошковой ФМИ-2 после электроконтактной обработки

а)



б)

а – напыленное покрытие из порошковой проволоки ФМИ-2; б – напыленное покрытие из порошковой проволоки ФМИ-2 после электроконтактной обработки

Рисунок 7 – Распределение микротвердости по глубине напыленных покрытий от края поверхности покрытия к основе с захватом переходной зоны

**Выводы.** Обобщая результаты собственных исследований по влиянию факторов процесса электродугового напыления на структурообразование и свойства покрытий, а также, учитывая литературные данные, устанавливали при исследованиях следующие параметры процесса ЭДН:

- сила тока – 160...180 А;
- давление сжатого воздуха – 0,5...0,6 МПа;
- дистанция напыления – 100...130 мм;
- диаметр применяемой проволоки – 1,6...2 мм;
- диаметр отверстия сопла – 7 мм;
- метод подготовки поверхности перед напылением – дробеструйная обработка;
- способ обработки напыленных покрытий – электроконтактный.

## Список литературы

1. В.В. Сергеев, Ю.Л. Спиридонов, И.И. Фарахшин. Восстановление коленчатых валов отечественных и зарубежных дизельных двигателей электродуговой металллизацией// Сварочное производство. 2004. № 2, С.44-26

2. Роянов В.А. Плавнение электродов при электродуговой металлизации//Сварочное производство, 1990. №2, С.35-37
3. Поляк М. С. Технология упрочнения. В 2т. Т. 1. - М.: "Л. В. М. - СКРИПТ", "Машиностроение", 1995. - 832 с.
4. Нанесение слоев с высокой прочностью сцепления методами электродуговой металлизации. Е.Н.Матвейшин// Автоматическая сварка. №8, 2000.- С.20-22
5. Коробов Ю.С., Полякова А.М., Яковлева И.Л., Прядко А.С. Структура и свойства стальных покрытий, нанесенных методом активированной дуговой металлизацией // Сварочное производство, 1997, №1. С. 4-6.
6. Похмурский В. И., Студент М. М., Довгунык В. М. и др. Порошковые проволоки систем FeCrB+Al и FeCrB+Al+C для электродуговой металлизации // Автоматическая сварка. - 2002. - № 3. - С. 32-35.
7. Опыт применения порошковой проволоки ФМИ-2 для электрометаллизационного нанесения восстановительных покрытий. В. И. Похмурский, И. И. Сидорак, М. М. Студент. Автоматическая сварка. -2002., №2. С.3-4.
8. Белоцерковский М.А., Барановский В.Э. Активированное напыление покрытий комплексом «ТЕРКО» // Газотермическое напыление в промышленности-93. – С.-Петербург, 1993. – С. 74-77.
9. Восстановлению деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов. Под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. - 672 с.
10. Основы сварки плавлением. Ерохин А.А. М.: Машиностроение, 1973. -448 с.
11. Ярошевич В.К., Генкин Я.С., Верещагин В.А. Электроконтактное упрочнение. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 256 с.
12. Витязь П.А.Ю Азизов Р.О., Белоцерковский М.А. Упрочнение газотермических покрытий. – Мн.: Бестпринт, 2004. – 192 с. УДК 621.792.4

*А. Тамаргазин, Л. Лопата, Ю. Брусило, С. Довжук*

#### **Вплив факторів електродугового напилення на структуроутворення і властивості покриттів**

В статті розглянуті первинні (технологічні фактори), які стосуються технології і умов напилення і вторинні, які є похідними від технологічних чинників, що впливають на структуроутворення і властивості покриттів. Узагальнюючи результати досліджень по впливу чинників процесу електродугового напилення на структуроутворення і властивості покриттів, були установлені параметри процесу електродугового напилення, вибрані метод підготовки поверхні перед напиленням і спосіб обробки напилених покриттів.

*A.Tamargazin, L.Lopata, Y. Brusilo, S. Dovzh*

#### **Influence of factors of electric arc spraing on gelation and properties of coverages**

The primary (technological factors) are considered in the article, touching technology and terms of spraing and second, which are derivative from technological factors, influencing on gelation and properties of coverages. Summarizing the results of researches on influence of factors of process of electric arc spraing on gelation and properties of coverages, the parameters of process of electric arc spraing were set, chosen method of preparation of surface before of spraing and. method of treatment of spraing coverages.

Одержано 11.05.10