



ОСОБЕННОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ (Обзор)

Б. ВИЛАГЕ, К. РУППРЕХТ, инженеры, **А. ПОХМУРСКАЯ**, д-р техн. наук
(Ин-т материаловедения, Хемницкий техн. ун-т, Германия)

Рассмотрены методы изготовления и применения порошковых электродных проволок для газопламенного и электродугового напыления покрытий разного назначения. Отмечены возможности применения перспективных порошковых проволок диаметром 2,0 и 2,8 мм для электродугового нанесения покрытий. Показано, что посредством высокоскоростной фотосъемки можно получить важную информацию о характере протекания процесса напыления, который определяет качество покрытий.

Ключевые слова: газотермическое напыление, покрытия, порошковые проволоки, конструкции проволок, методы нанесения покрытий

Технология газотермического напыления нашла широкое промышленное применение, в частности, для нанесения износостойких и коррозионностойких покрытий. Согласно данным компании «Linde AG» [1] одним из наиболее распространенных расходных материалов для газотермического напыления является проволока, ежегодно ее используется более 50 тыс. т. Это позволило не только значительно расширить диапазон применения проволок для электродугового, плазменного и газопламенного термического напыления в сравнении со сплошными проволоками, но и изменять в нужном направлении свойства получаемых покрытий. В связи с этим объем производства порошковых проволок и их ассортимент ежегодно увеличивается.

Конструкция и материалы порошковых проволок. Порошковая проволока состоит из оболочки, изготавливаемой из металлической ленты

(стальной, никелевой, кобальтовой и т. д.), и сердечника, представляющего собой порошок одного или смеси порошков легирующих компонентов и упрочняющих частиц (ферросплавов, чистых металлов, карбидов, боридов и т. п.). Существует несколько конструкций порошковых проволок. На практике наиболее часто применяют порошковую проволоку трех типов: со стыком внахлестку, с плотным стыком и трубчатую.

Основные группы порошковых проволок, применяемых для напыления восстановительных, коррозионностойких и износостойких покрытий, приведены в таблице. В настоящее время на рынке доступны порошковые проволоки на основе железа, никеля, кобальта и алюминия. Главной областью применения покрытий из порошковых проволок является защита от разных видов износа, при этом в основном используют покрытия из высоколегированных сплавов или покрытия, содержащие твердые частицы, а также псевдосплавы.

Другой важной областью применения покрытий из порошковых проволок является защита от

Примеры применения порошковых проволок для газотермического напыления покрытий

Основа	Тип легирования	Свойства покрытий и примеры применения
Железо	FeCrNiMoSiC	Аустенитные сплавы для защиты от износа и коррозии
	FeCrAlSi	Защита от газовой коррозии при повышенных температурах, хорошая обрабатываемость резанием
	Fe + WSC/WC	Защита от абразивного износа
Никель	NiCr NiAl	Использование в качестве подслоя для обеспечения адгезии к основному металлу
	NiCrB NiCrBSi	Низкий коэффициент трения. Защита от износа при термических нагрузках, гидро-, газоабразивная защита, химическая стойкость
	Ni + WSC/WC	Повышенная стойкость к износу
Кобальт	CoCrWFeCSiMn	Защита от абразивного износа, граничного трения, кавитации и коррозии
	CoCrMoFeNiSiMnC	Покрытия с повышенной износостойкостью, термо- и коррозионной стойкостью
Другие	Al + Al ₂ O ₃	Противоскользкие покрытия
	Cu + BN	Покрытия с эффектом сухой смазки



коррозии, в том числе и защита от газовой коррозии при повышенных температурах, для чего в основном используют сплавы на основе никеля.

Функциональные покрытия, например, для улучшения фрикционных свойств поверхностей трения, получают распылением порошковых проволок, в шихту которых входят твердые смазки, например нитрид бора. В последнее время для защиты от износа и коррозии поверхностей деталей, изготовленных из магниевых сплавов, разработаны алюмокерамические покрытия, напыляемые из трубчатых порошковых проволок, шихта которых состоит из твердых частиц керамики. Последние могут также применяться как противоскользкие покрытия.

Химический и фазовый состав шихты порошковых проволок может широко варьироваться, что открывает значительные возможности для разработки новых систем покрытий и, таким образом, для дальнейшего расширения области их практического применения [2].

Методы нанесения покрытий из порошковых проволок. Газопламенное напыление. Для нанесения покрытий из порошковых проволок применяют горелки, предназначенные для напыления сплошными проволоками (рис. 1).

Процесс плавления порошковых проволок несколько отличается от плавления проволок сплошного сечения. С уменьшением толщины оболочки порошковой проволоки, равно как и с уменьшением плотности ее заполнения, заостренный вид оплавленного конца проволоки переходит в более короткий закругленный или срезанный (рис. 2, а, з).

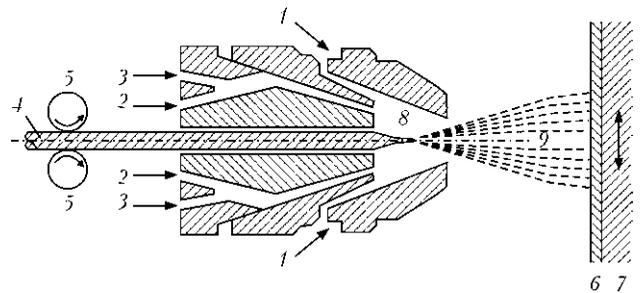


Рис. 1. Схема газопламенной горелки согласно норме DIN EN 657 [3]: 1 — сжатый воздух; 2 — горючий газ; 3 — кислород; 4 — проволока или пруток; 5 — протяжный механизм; 6 — напыляемое покрытие; 7 — подложка; 8 — оплавляемый конец проволоки; 9 — поток расплавленных частиц

Для обжимающего потока газа, который формируется в этой зоне, характерна повышенная турбулентность по сравнению с потоком, формирующимся при оплавлении проволоки сплошного сечения (рис. 2, б, д). Это приводит к расширению струи расплавленных частиц и, как следствие, к повышенной неоднородности микроструктуры напыленного покрытия (рис. 2, в, е). В микроструктуре покрытия, нанесенного сверхзвуковым газопламенным (HVOF) методом с использованием порошковой проволоки, соответствующей по химическому составу аустенитной нержавеющей стали AISI 316L (рис. 2, в), видны включения больших частиц материала оболочки (светлые области в покрытии), которые не успели полностью сплавиться с материалом шихты в дуге в процессе распыления. Такое увеличение неоднородности структуры покрытий может негативно сказываться на их эксплуатационных характеристиках [4].

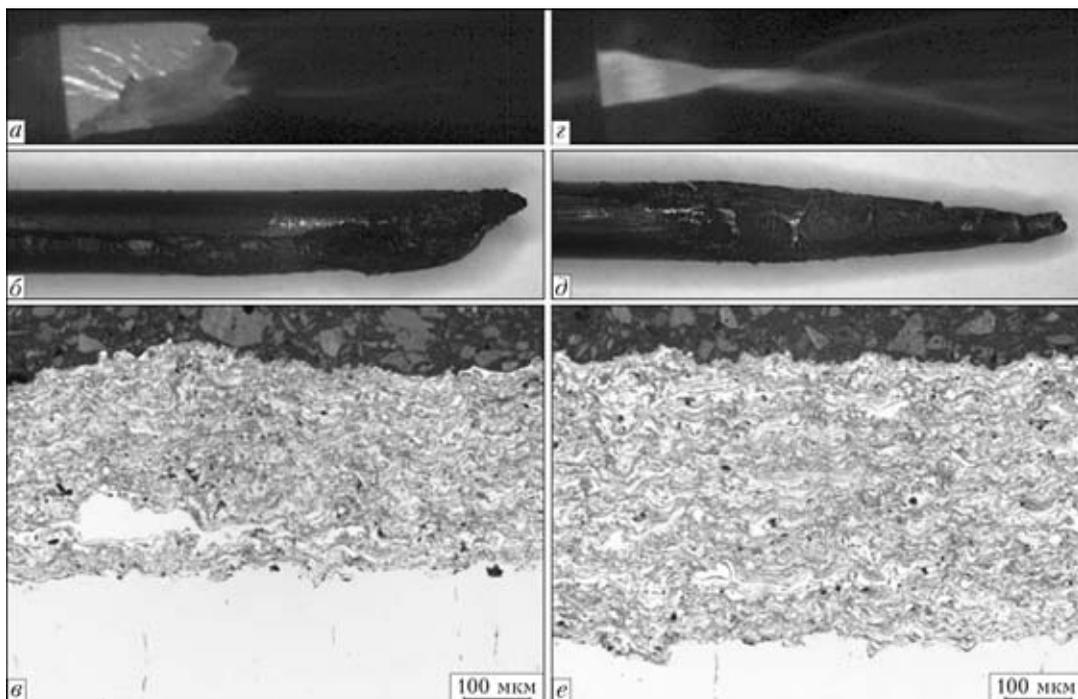


Рис. 2. Фрагменты высокоскоростной съемки процесса напыления (HVOF) порошковой проволокой AISI 316L (а) и проволокой сплошного сечения (з), вид оплавленных концов проволок (б, д) и микроструктуры покрытий (в, е)

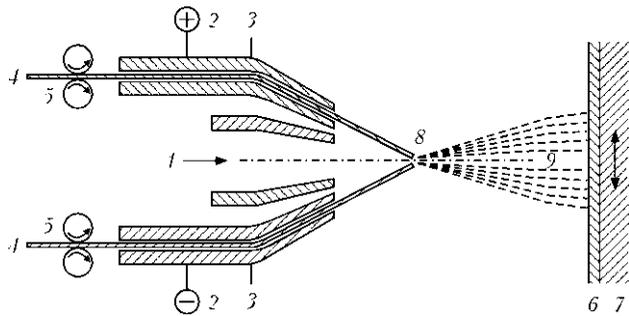


Рис. 3. Схема электродугового напыления порошковыми проволоками пистолетом согласно DIN EN 657 [3]: 1 — сжатый воздух; 2 — питание; 3 — контактные трубки; 4 — проволоки; 5 — протяжный механизм; 6 — напыляемое покрытие; 7 — подложка; 8 — оплавляемые концы проволок; 9 — поток расплавленных частиц

Анализ особенностей процесса напыления и соответствующей микроструктуры покрытий, напыленных методом высокоскоростного газопламенного напыления порошковых проволок состава AISI 316L различной конструкции (со стыком внахлестку, с плотным стыком и бесшовной трубчатой), а также сплошной проволоки, приведен в работе [4].

Электродуговое напыление. Для нанесения покрытий из порошковых проволок методом электродугового напыления (электродуговой металлизации) используют пистолеты, применяющиеся для распыления проволок сплошного сечения. На рис. 3 представлена схема электродугового напыления.

Метод электродугового напыления применим для напыления электропроводных материалов и соответственно может быть использован для нанесения покрытий из порошковых проволок в металлической оболочке. Существенным преимуществом

напыления порошковых проволок по сравнению с проволоками сплошного сечения является возможность введения в состав порошковой смеси компонентов, стабилизирующих горение электрической дуги, что позволяет улучшить качество напыляемого покрытия.

При напылении металла типа аустенитной нержавеющей стали AISI 316L как в виде сплошной, так и порошковой проволоки с соответствующей оптимизацией параметров процесса электродугового напыления, возможно нанесение покрытий хорошего качества с очень низкой пористостью (рис. 4).

Оптимизация электродугового напыления порошковых проволок большого диаметра. В настоящее время на рынке имеется широкий спектр порошковых проволок для напыления покрытий различного назначения. При этом почти все проволоки для газотермического нанесения износостойких покрытий выпускают диаметром 1,6 мм (например, продукция фирм «ТАФА», «Castolin», «Prahair», «Sultze Metco» и др). Сравнительно невысокий коэффициент заполнения проволоки такого диаметра шихтой ограничивает возможности введения в покрытие большей концентрации легирующих элементов и упрочняющих частиц. Поэтому для расширения возможностей создания новых композиционных составов порошковых проволок, а также с целью повышения производительности процесса электродугового напыления представляет интерес изучение особенностей распыления порошковых проволок большого диаметра.

В работе изучено влияние рабочего тока, дистанции напыления и других параметров на процесс структурообразования покрытия и окисление расплавленных частиц в процессе напыления. Ис-

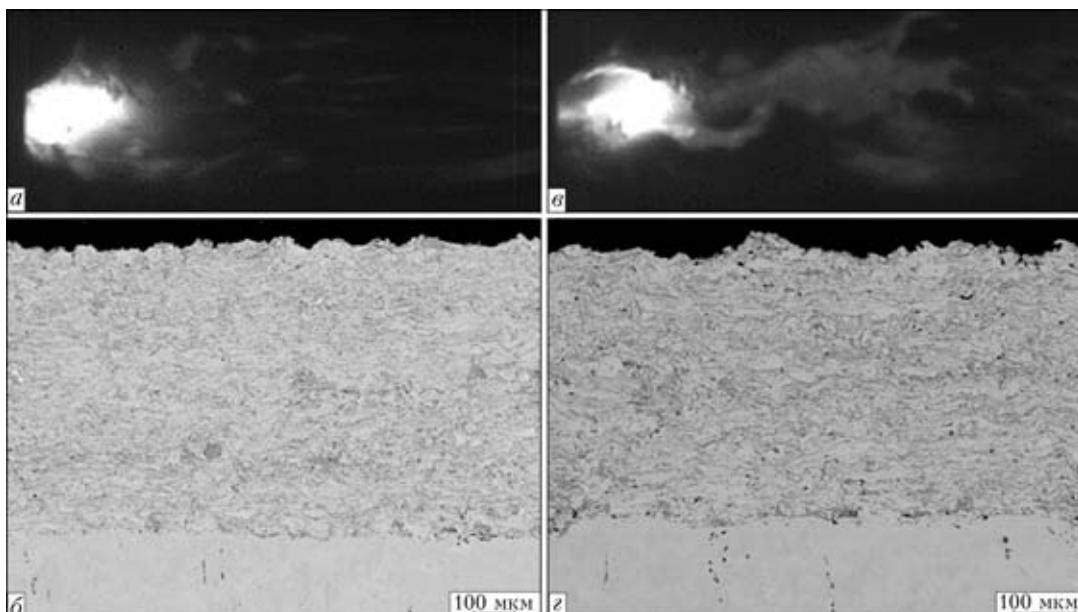


Рис. 4. Фрагмент высокоскоростной съемки процесса электродугового напыления порошковой AISI 316L (а) и проволокой сплошного сечения (в) и микроструктуры покрытия (б, г)

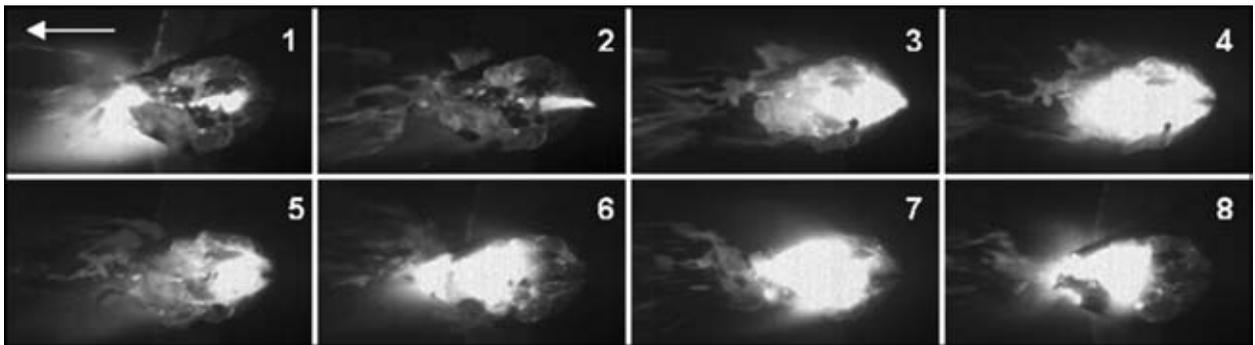


Рис. 5. Последовательность снимков высокоскоростной цифровой фотосъемки процесса электродугового напыления порошковой проволоки диаметром 2,8 мм (стрелка — направление напыления)

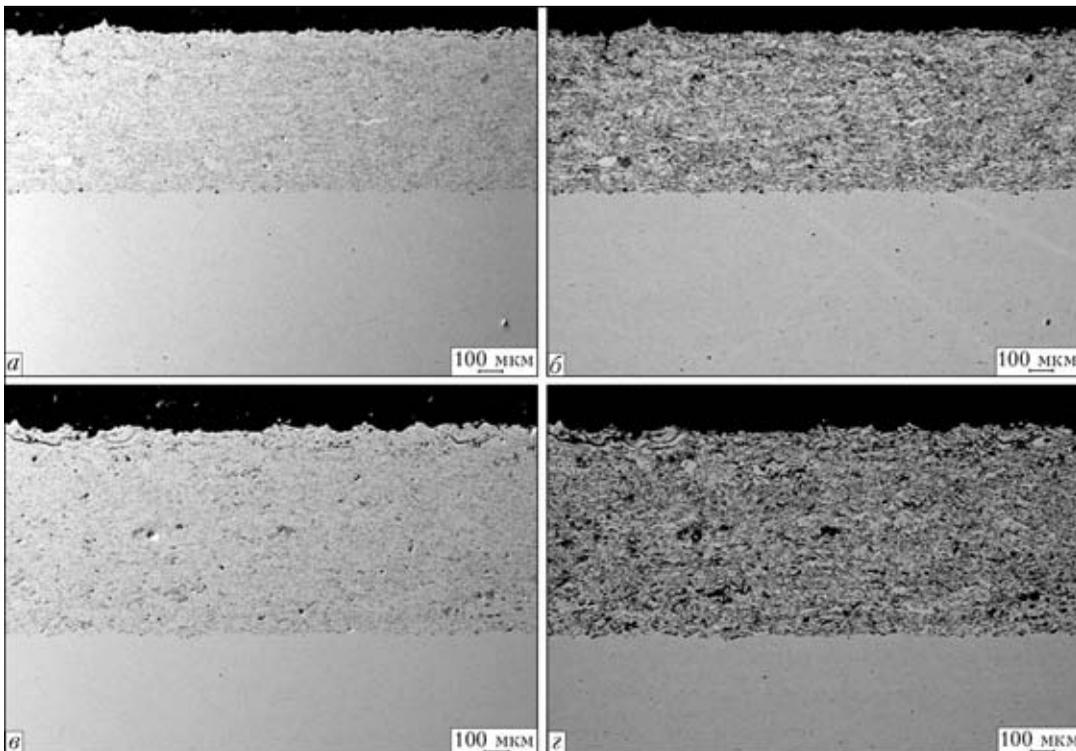


Рис. 6. Микроструктуры покрытий, полученных электродуговым напылением порошковых проволок диаметром 2,0 (а, б) и 2,8 мм (в, г), полученные с помощью электронной микроскопии во вторичных (а, в) и обратно-рассеянных электронах (б, г). Параметры напыления: дистанция напыления 120 мм; сила тока 150 А

пользовали порошковые проволоки диаметром 2,0 и 2,8 мм на основе железа для электродугового напыления, обеспечивающие следующий химический состав, мас. %: 6...7 Cr; <1 Mo; <1 V; 1% Al для диаметра проволоки 2,0 и 1...2 Al (2,8 мм); <1 (1...2) Si; 1(1...2) Mn. Порошковые проволоки диаметром 2,0 и 2,8 мм имели близкий химический состав, однако в проволоке большего диаметра содержалась небольшая добавка флюса.

Для электродугового напыления использован пистолет фирмы «OSU» с распылительной головкой LD/U2. В процессе напыления изменяли значение сварочного тока и дистанцию напыления при сохранении остальных параметров. Параметры электродугового напыления покрытий из порошковых проволок диаметром 2,0 и 2,8 мм следующие: сварочный ток 100...150 А; напряжение

25 В; давление распыляющего газа 35 МПа; дистанция напыления 80, 100, 120 мм. Поверхность стальной подложки перед напылением подвергали дробеструйной обработке [5]. При напылении обоих типов проволоки получили плотные покрытия с хорошей адгезией к подложке. Детальный анализ плавления проволок в процессе распыления в электрической дуге проводили с помощью высокоскоростной цифровой камеры. Показано, что процесс распыления порошковых проволок большего диаметра имеет стабильный характер. При этом на концах проволоки наблюдалось равномерное конвекционное перемешивание расплавленного материала с незначительными флуктуациями в потоке частиц. Благодаря высокой разрешающей способности фотосъемки (10000 кадр./с) установлено, что в процессе напыления

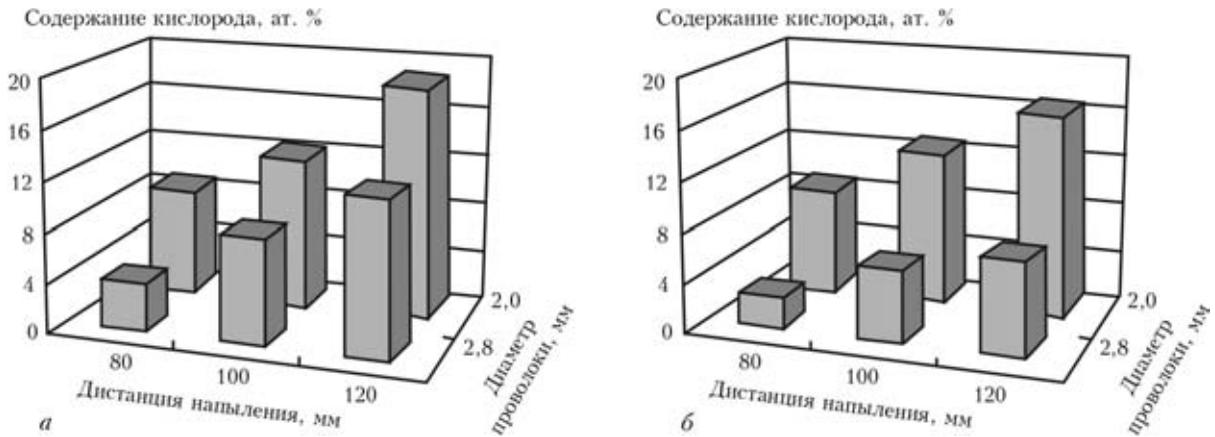


Рис. 7. Влияние силы тока (a — 100, b — 150 А) и дистанции напыления на содержание кислорода в покрытиях, полученных электродуговым напылением покрытий из порошковых проволок разного диаметра

толстых порошковых проволок наблюдается значительное переменное смещение точки основания дуги, что обеспечивает равномерный нагрев проволоки (рис. 5).

При распылении проволоки меньшего диаметра наблюдается тенденция к значительному изменению длины электрической дуги, особенно в моменты после отрыва крупных частиц металла, что увеличивает нестабильность процесса напыления.

При этом расстояние между концами порошковых проволок меньшего диаметра при напылении изменяется более заметно, чем при распылении порошковых проволок большего диаметра. Проволоки меньшего сечения привносят меньшее возмущение в потоке распыления частиц, что положительно влияет на дивергенцию распыляемого потока.

В результате проведенных исследований установлено, что использование порошковых проволок большего диаметра в электродуговом напылении не обязательно влечет за собой ухудшение качества покрытия. Более того, при распылении порошковой проволоки большего диаметра получена более однородная микроструктура покрытия. Характерной особенностью распыления порошковой проволоки большего диаметра является то, что расплав шихты и оболочки находится достаточно продолжительное время в объеме, ограниченном внешними краями проволоки, что способствует более полному расплаву материала и гомогенизации этого расплава, что в итоге приводит к снижению пористости покрытий (рис. 6).

Анализ химического состава напыленных покрытий, проведенный с помощью энергодиспер-

сионной рентгеновской спектроскопии, позволяет получить отчетливую зависимость склонности покрытий к окислению, которая выражается содержанием кислорода в покрытиях, полученных из порошковых проволок обоих диаметров, от параметров напыления (рис. 7).

Увеличение дистанции напыления приводит к более интенсивному окислению покрытий, поскольку время пребывания расплавленных частиц в распыляемом потоке увеличивается. В то же время влияние повышения силы тока на процесс окисления заметно только для проволоки большего диаметра, содержащей флюс.

В заключение можно отметить, что электродуговым напылением порошковых проволок на основе железа большего диаметра могут быть получены качественные бездефектные покрытия с гомогенной микроструктурой и низкой пористостью. С использованием высокоскоростной цифровой фотосъемки изучены особенности формирования расплава в процессе напыления и установлены закономерности структурообразования покрытий.

1. *Thermisches Spritzen* — Potenziale, Entwicklungen, Maerkte / B. Wielage, K. Bobzin, C. Rupprecht, M. Bruhl // *Thermal Spray Bulletin* 1. — DVS Verlag. — 2008. — S. 30–36.
2. *Lugscheider F.-W. Bach. Handbuch der thermischen Spritztechnik, Technologien-Werkstoffe-Fertigung, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 139* // Ibid. — 2002.
3. *DIN EN 657. Thermisches Spritzen* — Begriffe, Einteilung.
4. *Einsatzmoeglichkeiten des HVOF-Drahtspritzens, Tagungsband 7* / B. Wielage, K. Landes, C. Rupprecht, S. Zimmermann // *HVOF Kolloquium*. — 2006. — S. 81–88.
5. *DIN EN 13507. Thermisches Spritzen* — Vorbehandlung von Oberflaechen metallischer Werkstuecke und Bauteile fuer das thermische Spritzen.

Methods of manufacturing and application of flux-cored electrode wires for flame and electric arc spraying of various-purpose coatings are considered. Possibilities of application of promising flux-cored wires of 2.0 to 2.8 mm diameter for electric-arc deposition of coatings are considered. It is shown that high-speed filming can provide important information on the nature of running of the spraying process which determines the coating quality.