

## РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОСЛЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА

*Квашнин Б.Н., Лихачева Л.Б., Литвинов Е.В., До Мань Зунг, Матвеева Е.В.*  
*Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж*

**Ключевые слова:** плазматрон, восстановление поверхности, газотермическое напыление, порошковые материалы.

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы восстановления поверхностей деталей машин после износа. Предложена методика газотермического напыления, с целью увеличения износостойкости. Разработаны требования на усовершенствование технологического процесса напыления. Проведен рентгеноструктурный и металлографический анализы полученных покрытий. Рассмотрены некоторые самофлюсующиеся порошковые сплавы российских и зарубежных производителей.

## DEVELOPMENT OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES THAT ENSURE THE RELIABILITY OF OPERATION AFTER REPAIR

*Kvashnin B.N., Likhacheva L.B., Litvinov E.V., Do Man Zung, Matveeva E.V.*  
*Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh*

**Keywords:** plasmatron, surface restoration, gas thermal spraying, powder materials.

**Abstract.** The paper considers the issues of restoring the surfaces of machine parts after wear. The technique of gas thermal spraying is proposed in order to increase wear resistance. Requirements for the improvement of the technological process of spraying have been developed. X-ray structural and metallographic analyses of the obtained coatings were carried out. Some self-fluxing powder alloys of Russian and foreign manufacturers are considered.

Восстановление изношенных деталей машин является актуальнейшей проблемой машиностроения, так как около 70% деталей выходят из строя из-за износа, составляющего сотые доли процента от их общей массы.

За последние 20...30 лет за рубежом и в России большое распространение получили процессы газотермического напыления покрытий с использованием воздуха, азота и их смесей с другими газами в качестве плазмообразующего газа. Широкое применение процесс воздушно-плазменного напыления получил при восстановлении изношенных деталей машин и механизмов. Технология газотермического напыления позволяет получать равномерные покрытия с различными эксплуатационными и физико – механическими свойствами [1-7].

Для газотермического напыления применяются отечественные установки: УПУ-3, УМП-6 и УПУ-3Д; а также иностранных фирм: «Кастолин», «Плазмотехник» Швейцария, «Метко» Италия, «Плазмадайн» США и ряд других с применением плазмотронов различной конструкции [5].

В зависимости от вида нагрева частиц и состава газовой струи метод газотермического напыления (ГТН) реализуется несколькими способами. Это – электродуговая металлизация, газопламенное, детонационное, высокоскоростное, высокочастотное, лазерное и плазменное напыление.

В настоящее время в стране имеется достаточное количество участков воздушно–плазменного напыления с применением различных плазмотронов. Мы в своей работе использовали для напыления плазмотроны постоянного тока типа ПНВ с фиксированной длиной дуги (рис. 1).

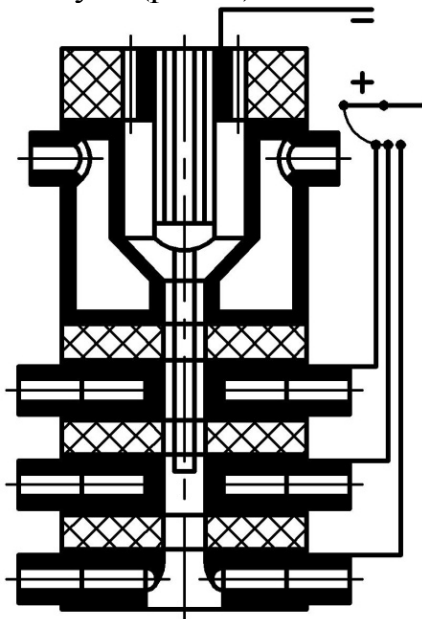


Рис. 1. Схема плазмотрона типа ПНВ с фиксированной длиной дуги

Для этих плазмотронов характерны фиксация определенной длины электрической дуги межэлектродными вставками и использование термохимического гафниевого катода. Плазмотроны типа ПНВ позволяют применять в качестве плазмообразующих газов воздух, азот и их смеси с другими газами, а наличие секционированной межэлектродной вставки обеспечивает получение стабильной и высокоэнтальпийной плазменной струи в диапазоне токов дуги 100...250 А.

Технологической особенностью воздушно-дуговых плазмотронов является более полное проплавление частиц порошкового материала, чем при напылении в аргононе. Это вызвано увеличением коэффициента теплоотдачи от воздушной плазмы к частицам и удлинением плазменной струи.

Окислительное действие воздушной плазмы является немаловажным фактором при напылении покрытий из металлических порошков. Как показал сравнительный химический анализ покрытий, напыленных в аргоновой и воздушной плазме, содержание кислорода в воздушно-плазменных покрытиях незначительно выше, а для некоторых материалов такого же порядка, как и в аргоно – плазменных покрытиях. При этом определяющее влияние на содержание кислорода в покрытиях оказывает размер частиц напыляемого материала. При воздушно-плазменном напылении размер частиц может быть увеличен до 200 мкм по сравнению с 50...60 мкм при аргоно – плазменном напылении. В этом случае удельная поверхность напыляемых порошков уменьшается, что ведет к уменьшению процентного содержания кислорода. Таким образом, воздушно – плазменное напыление позволяет получать покрытия с широкими пределами регулирования содержания кислорода. Последнее наиболее целесообразно при напылении износостойких покрытий.

Одним из перспективных методов создания материалов с комплексом новых физико-механических свойств является использование сверхвысоких скоростей охлаждения и получение металлических сплавов в некристаллическом состоянии. Сплавы в аморфном состоянии получают плазменным распылением. Этот метод дает возможность изготавливать быстроохлажденные материалы в большом объеме. В связи с интенсивным применением плазменного напыления для восстановления изношенных и упрочнения новых деталей большой теоретический и практический интерес представляет исследование возможности нанесения покрытий, в частности самофлюсующимися сплавами на основе никеля (Ni–Cr–Fe–B–Si–C) в аморфном или аморфнокристаллическом состояниях, резко повышающих служебные характеристики изделий.

Напыление проводили на стандартной установке УПУ-3Д в аргоно-азотной плазме. Напыляемый материал – порошки марок, приведенных в таблицах 1 и 2.

Табл. 1. Самофлюсующиеся порошковые сплавы, выпускаемые в России (НПО «Тулачермет», АП «Легированные порошки и сплавы»)

№	Марка	Химический состав, %							HRC	T, °C
		Ni	C	Cr	Si	B	Fe<	другие		
1	ПР-Н80Х13С2Р	осн.	0,3	13	2,4	1,5	5		32	1070
2	ПР-Н77Х15С3Р2	осн.	0,5	15	3,2	2	5		40	1050
3	ПР-Н73Х16С3Р3	осн.	0,7	16	3,2	2,7	5		47,5	1050
4	ПР-Н70Х17С4Р4	осн.	1,0	17	4,1	3,6	5		57	990
5	ПР-Н67Х18С5Р4	осн.	1,2	17,5	4,5	4,3	5	Mn 1	61	1000

В таблице 2 представлены характеристики некоторых порошков самофлюсующихся сплавов на никелевой основе, выпускаемых в странах СНГ и дальнего зарубежья.

Табл. 2. Самофлюсы, выпускаемые в странах СНГ и дальнего зарубежья

№	Марка	Химический состав, %							HRC	T, °C
		Ni	C	Cr	Si	B	Fe<	другие		
1	Колмоной 30 (США)	осн.	0,3	6	2,5	1,6	1,9		25-30	1085
2	1-45 (1245) Швеция, «Hoganas»	осн.	0,35	8,5	3,7	1,8	1,7		45	1000
3	ПГ-АН9	осн.	0,5-15	6-10	1,5- 3,5	2,8- 3,8	3		48-57	–
4	MSFN12 (Япон.)	осн.	0,5	9-11	2-3,5	1,5- 2,5	4		30-40	–
5	MSFN15 (Япон.)	осн.	0,5-1,1	15-20	2-5	3-4,5	5		55-65	–

Рентгеноструктурный анализ плазменных покрытий проводили на установке ДРОН-3М в медном и молибденовом  $K_{\alpha}$ -излучениях с точностью  $\pm 5\%$ . Для этой цели были изготовлены поверхностные и поперечные шлифы образцов с покрытиями после травления их смесью плавиковой кислоты и глицерина. Металлографический анализ проводили на микроскопе «Неофот-21». Материалы

для покрытий используют в виде порошков, проволоки, шнуров и стержней. Наиболее широко используют порошки размером частиц 5...300 мкм.

Порошки характеризуются формой (морфологией), гранулометрическим составом, текучестью и насыпной плотностью. По форме порошки делятся на сферические, округлые, призматические, пластинчатые и игольчатые.

Распространенными порошковыми материалами являются порошки сплавов, получаемых в защитной атмосфере на Горезском заводе наплавочных твердых сплавов и НПО «Тулачермет». К этим порошковым материалам относятся самофлюсующиеся сплавы на основе никеля, получившие название самофлюсы. Это износостойкие сплавы на никельхромовой основе, содержащие кремний и бор. В и Si восстанавливают оксиды и образуют жидкую фазу, в которой при оплавлении покрытия распределяются более тугоплавкие твердые соединения. Высокая износостойкость обусловлена наличием в матрице никелевого раствора твердых упрочняющих фаз: карбидов, боридов, силицидов. Высокая коррозионная стойкость объясняется плотностью слоя, предохраняющего подложку от окисления. Жидкотекучесть расплава покрытия и относительно невысокая температура его плавления являются основой технологичности самофлюсов.

Твердость и износостойкость никелевых сплавов возрастает, а сопротивление удару падает по мере увеличения в них содержания углерода, бора и кремния.

Химический состав и свойства российских самофлюсов приведены в таблице 1, а импортных в таблице 2.

Никелевые сплавы (табл. 1, №1-5) применяются для восстановления и упрочнения деталей из углеродистой легированной стали и чугуна. В парах трения и при значительных ударных нагрузках лучше использовать сплавы с меньшим содержанием твердой фазы, т.е. 1, 2. При плазменном напылении частицы наносимого материала разогреваются до температур плавления или близких к ним величин. Перенос частиц от среза плазматрона или горелки до поверхности обрабатываемой детали происходит в газовой среде, содержащей значительное число компонентов воздушной массы ( $O_2$ ,  $N_2$ ), засасываемой из атмосферы в силу высокотемпературного турбулентного истечения газовой струи и образования за срезом сопла разряженной зоны. При электродуговом и высокочастотном плазменном методах напыления расплавленные капли переносятся на поверхность изделия струей сжатого воздуха, в результате него создаются условия для окисления частиц или капель наносимого материала в газовой струе. Напыляемые частицы могут взаимодействовать также с азотом, образуя нитриды.

Известно, что основную роль в формировании и развитии эвтектических колоний и росте упрочняющих фаз играют диффузионные процессы, протекающие в жидкой фазе между участками расплава, прилегающими к твердым кристаллам, в данном случае  $Ni_3B$  и  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля. Поэтому вероятность образования этих избыточных фаз и полнота протекания эвтектической реакции определяются степенью отклонения

температуры нагрева от равновесных условий, скоростью нагрева и охлаждения, а также переохлаждением сплава.

При этом в зависимости от условий охлаждения могут формироваться сплавы с преимущественным содержанием той или иной структурной составляющей покрытия. Образование эвтектики происходит тогда, когда скорость ее возникновения выше скорости образования отдельных фаз  $\gamma$ -твердого раствора и  $Ni_3B$ . В противном случае быстро развивающийся процесс образования указанных отдельных фаз не позволяет расти эвтектическим колониям. По мере увеличения температуры нагрева в области линии солидус сплава и времени выдержки при этой температуре размер эвтектических колоний, формирующихся при охлаждении, увеличивается, и их строение может представлять собой единое разветвленное образование, пронизывающее почти весь объем покрытия, и создавать своего рода каркас. Такое покрытие имеет высокую твердость и пониженную пластичность. Это связано с тем, что содержание упрочняющей фазы  $Ni_3B$  в эвтектике очень высоко и она в значительной мере определяет физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий, поскольку твердость эвтектики почти в 2 раза выше твердости  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля. Именно поэтому свойства покрытий во многом зависят от соотношения их структурных составляющих.

При протекании процесса кристаллизации сплава определенного состава и больших степенях переохлаждения происходит почти полное подавление процессов образования избыточных фаз ( $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля и  $Ni_3B$ ) и наблюдается фиксация эвтектики ( $\gamma-Ni+Ni_3B$ ), скорость образования которой для расплава данного состава оказывается выше. Значительное увеличение скорости охлаждения композиции «покрытие-основа» сжатым воздухом, спреером в жидкости способствует измельчению структуры сплава покрытия, однако вызывает рост внутренних напряжений и вероятность образования микротрещин. При эффективном использовании интенсивных источников нагрева, как правило, также формируются структуры более тонкого строения по сравнению с печным нагревом, хотя закономерности формирования структурных составляющих сохраняют свою силу. При этом в структуре таких сплавов мало эвтектики, в них, как правило, формируется доэвтектическая структура со столбчатыми зернами  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля. При высоких скоростях охлаждения композиций в покрытиях также фиксируется малое содержание упрочняющих фаз.

#### Список литературы

1. Фролов В.А., Поклад В.А., Викторенков Д.В. Технология нанесения термозащитных покрытий методами газотермического напыления (обзор) // Сварочное производство. – 2005. – №1. – С. 51-54.
2. Фролов В.А., Поклад В.А., Рябенко Б.В., Викторенков Д.В. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (обзор) // Сварочное производство. – 2006. – №11. – С. 38-47.
3. Гордеев А.Ф., Гордеева Р.В. Материалы для газотермического напыления покрытий (ГТНП) // Технология металлов. – 2006. – №9. – С. 43-56; №10. – С. 47-55; 2007. – №3. – С. 48-54.

4. Гордеев, А.Ф., Гордеева Р.В. Технология газотермического напыления // Технология металлов. – 2007. – №7. – С. 48-53; №9. – С. 53-55; №10. – С. 51-55; №11. – С. 49-56.
5. Баладев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А. и др. Газотермическое напыление. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
6. Гордеев А.Ф. Материалы для газотермического напыления покрытий (ГТНП) // Технология металлов. – 2005. – №4. – С. 51-55; №5. – С. 51-56.
7. Гадалов В.Н., Болдырев Ю.В., Горякин И.М., Иванова Е.В., Романенко Д.Н., Статинов В.В., Шкодкин В.И. Исследование влияния комбинированной обработки на инструменты из быстрорежущих сталей. Материалы для электрофизического нанесения покрытий // Материалы и упрочняющие технологии – 2007: сборник материалов XIV Российской науч.-техн. конф. с международным участием. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2007. – С. 55-73.

Сведения об авторах:

*Квашин Борис Николаевич* – к.т.н., доцент, доцент кафедры технической механики;

*Лихачева Людмила Борисовна* – к.т.н., доцент, доцент кафедры технической механики;

*Литвинов Евгений Викторовича* – к.т.н., доцент кафедры технической механики;

*До Мань Зунг* – аспирант;

*Матвеева Екатерина Владимировна* – к.т.н., доцент, доцент кафедры технической механики.