

ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

М.В. Радченко, Т.Б. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко

В настоящее время все более активно исследуются и часто промышленно применяются процессы создания упрочняющих и защитных покрытий на поверхности деталей машин и инструмента с использованием не только обычных, но и нетрадиционных высокоэнергетических источников энергии. Так, наряду с методами термической, химико-термической обработки поверхности известны работы по изучению сферы возможного использования для этих целей энергии солнечных лучей [1], воздействия высокочастотной плазмы [2], применения магнитного поля [3].

Известны работы, в которых рассматриваются структурные и металлофизические особенности процесса нанесения защитных покрытий с использованием ударных волн или энергии взрыва. При этом отмечается, что особенностью покрытий, полученных из расплава порошковых сталей типа X18N15, является высокая скорость охлаждения расплава - $10^4 \dots 10^6$ °C/с, что позволяет обеспечить их высокие эксплуатационные показатели [4].

Некоторые работы посвящены более изученным процессам поверхностного упрочнения, например, эрозионной обработке быстрорежущих инструментальных сталей типа P6M5 с энергией импульса 0,001...0,004 Дж и длительностью импульса 3...12 мкс [5]. Такие покрытия обладают малой толщиной (20...30 мкм) при закалке основного металла, а при использовании предварительно нанесенного защитного материала и его локального оплавления могут достигать толщин составляющих десятки доли миллиметра.

Наиболее заметны в этой области работы по использованию концентрированных потоков энергии (КПЭ), таких как ионные, плазменные, лазерные и электронные пучки. Так, метод ионно-лучевой обработки поверхности позволяет повысить износостойкость в довольно широком диапазоне: у среднеуглеродистых сталей - в 2...3 раза [6], а у фурм, изготовленных из штамповых сталей, для литья пластиков - в 20 раз [7].

Конкурентоспособность ионной имплантации обусловлена достаточно низкими температурами ведения процесса, отсутствием коробления и необходимости доводочных операций механической обработки. В зарубежной практике считается, что этот метод вышел за пределы лабораторных исследований и нашел применение для упрочнения конкретных изделий: волок из инструментальных сталей для волочения прутков, шнек, вырубной инструмент. Частично это отражено и в отечественной технической литературе. Но ввиду недостаточной изученности базовых технологических положений, сложности, высокой стоимости и незначительной распространенности оборудования эти процессы пока не получили широкого распространения в практике отечественных предприятий. К достаточно изученным и эффективным процессам нанесения защитных покрытий относится метод напыления композиционных покрытий прямым испарением материала в вакууме с использованием мощных электронных пучков [8,9]. Одним из достоинств этого метода является возможность получения жаростойких многокомпонентных покрытий, например системы Ni-Co-Cr-Al-Y, обладающих в диапазоне температур 750...850 °C высокими показателями термоциклической и циклической прочности в течение 10...15 тыс.ч. [8,9]. Это позволяет использовать метод осаждения покрытий из парогазовой фазы для защиты таких ответственных изделий, как лопатки газотурбинных установок. К достоинствам также можно отнести возможность использования не только специальных установок для электроннолучевого испарения материалов в вакууме, но и существующих достаточно распространенных в промышленности установок для электроннолучевой сварки и термообработки типа А.306.13 и других подобного типа, как с термонакальными, так и плазменными электроннолучевыми пушками. Аналогичные приемы использования существующей электроннолучевой аппаратуры отмечаются и за рубежом. Так, фирмой "ЛЭВ-Нахрихтен" совместно с

ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

научно-исследовательским институтом Манфреда фон Арденне в Дрездене создана установка для электроннолучевого напыления в вакууме на стальной прокат (ленту, проволоку, полосы) на базе установки типа ЕВА 150-80/80 с пушкой мощностью 80 кВт, используемой в Японии с 1985 г. Установка имеет широкие технологические возможности по нанесению разнообразных металлов и сплавов, как тугоплавких (Ta, Mo), так и легкоплавких (типа Al, Sn) в виде однослойного, многослойного, одностороннего, двухстороннего покрытий на ленте или проволоке.

Наряду с отмеченными положительными сторонами метода прямого электроннолучевого (ПЭЛ) испарения в вакууме, в работе [8] отмечается, что две возможные причины - нестабильность параметров процесса испарения и осаждения или избирательность массопереноса компонентов - могут служить причиной неоднородности в распределении концентраций элементов по глубине покрытий. Последняя причина приводит к неоднородности физико-механических и эксплуатационных свойств. Кроме того, этот способ до недавнего времени имел существенное ограничение по толщине создаваемых покрытий, которая составляла 20...50 мкм, и в редких случаях несколько больше.

Последние несколько лет стали появляться эпизодические публикации о разработке способов, позволяющих методом электроннолучевого испарения и осаждения из паровой фазы при производительности 10...15 кг/ч получать массивные заготовки, например, сплава Al-Cr-Fe толщиной до 150 мм, шириной до 1 м и массой до нескольких тонн, пригодные для прокатки и экструзии.

Однако, не подвергая сомнениям такую информацию, необходимо отметить это не более как частный случай в производстве защитных покрытий, не имеющих широкого распространения в практике предприятий и фирм. Кроме того, с учетом необходимости обеспечения большой мощности электронного пучка и длительности процесса испарения, а также осаждения композиционных материалов такой способ больше пригоден для специфических изделий, при изготовлении которых стоимость производственного процесса не имеет решающей роли, а используемый метод является единственно возможным.

Наряду с наличием в технической литературе сведений о рассмотренных способах создания упрочняющих и защитных покрытий, использующих интенсивные и КПЭ, по степени научной обоснованности технологических процессов, использующих порошковые материалы наиболее заметную роль имеют следующие:

- нанесение композиционных покрытий струйно-плазменным способом;
- газодетонационное напыление;
- холодное газодинамическое напыление;
- оплавление покрытий пламенем газовой горелки и струей плазмы;
- лазерное оплавление покрытий, предварительно нанесенных на защищаемую поверхность;
- электроннолучевое оплавление покрытий (плакирование).

В соответствии с вышеприведенной классификацией далее кратко рассмотрены основные виды создания защитных покрытий с использованием концентрированных потоков энергии.

Наибольшее количество публикаций относится к технологии создания защитных покрытий методом плазменного напыления [11...13], физические основы, которой активно разрабатываются СО РАН. При этом рассматриваются самые разнообразные показатели этого процесса: теплофизические [11], физико-механические [13], технологические [12].

Так, в работе [11] рассмотрен вопрос создания диалогового инженерного моделирующего комплекса плазмотрон-струя-покрытие, позволяющего расчетным путем прогнозировать физические процессы, происходящие при плазменном нанесении покрытий: нагрев и соударение частиц напыляемого порошкового материала, соударение частиц с основой и с их последующей кристаллизацией и др. Показано, что использование такого комплекса позволяет существенно сократить сроки периода экспериментальных исследований и отработки технологического процесса плазменного напыления покрытий.

Большинство исследователей изучают процессы напыления самофлюсующихся сплавов системы Ni-Cr-B-Si в исходном состоянии или с добавками других необходимых компонентов (Al, Ti) и упрочняющих фаз типа карбидов, боридов, карбоборидов тугоплавких металлов. Так, например, в ряде работ представлены

результаты исследования плотности (пористости) покрытия, износостойкости и прочности его сцепления с основой [14,15]. При этом отмечается, что, например, для сплава ПТ-ЮНХ15СР2 прочность сцепления составляет 180...200 МПа, а стойкость при гидроабразивном изнашивании в 2,5...3 раза выше стойкости стали 45. Обсуждаются проблемы создания технологического оборудования для поверхностного упрочнения путем плазменной закалки с одновременным нанесением порошкового покрытия на основе серийно выпускаемого плазмотрона ПС-3 [15].

Последние десять лет в исследованиях и практике в качестве жаропрочных, пластичных при повышенных температурах конструкционных материалов активно стали использоваться интерметаллиды, например систем Ti-Al, Ni-Al. Это нашло отражение в исследованиях возможности создания защитных покрытий плазменным напылением [16], особенно для таких целей, как защита труб и стенок паровых котлов от коррозионного высокотемпературного изнашивания [17].

При этом, отмечая хорошие защитные свойства самого материала, авторы указывают на существенный недостаток плазменных покрытий - в процессе работы при достаточно высоких температурах происходит растрескивание и отслоение защитного слоя от поверхности изделия. Поэтому такие покрытия в чистом виде, как правило, не используются и требуют дополнительной обработки для повышения адгезионной прочности.

Проблема пористости покрытия и прочности его сцепления с основой частично решается заменой метода напыления материалов плазменной струей на метод детонационного напыления. В этом случае при напылении сплава системы Ni-Cr-B-Si типа ПГ-СР4 удается получить покрытие с прочностью сцепления 140 МПа и пористостью менее 2 %. Это позволяет рекомендовать детонационное напыление в качестве альтернативного плазменному методу для создания защитных покрытий на изделиях в таких отраслях, как машиностроение, судостроение [18].

Однако широкое распространение метода детонационного напыления пока сдерживается малой изученностью теплофизических и технологических сторон этого процесса, недостаточной отработанностью конструкций установок для напыления

различных материалов. В настоящее время наиболее разработан процесс нанесения порошкового покрытия Al_2O_3 . Кроме того, прочность сцепления таких покрытий часто также недостаточна, особенно для работы в условиях циклического (или термоциклического) нагружения изнашиваемой поверхности, что вызывает необходимость дополнительной ее обработки другим способом. Например, оплавлением в термической печи, пламенем газовой горелки, плазмой, лазерным или электронным пучком.

Оплавление в термической печи покрытий, нанесенных плазменным способом, является достаточно длительным процессом, целесообразным с экономической точки зрения при массовом производстве деталей с покрытиями. Кроме того, необходимо учитывать, что, хотя и происходит увеличение твердости и адгезионной прочности до 800...900 МПа при низкотемпературном (1040 °С) нагреве [19] и до 160...200 МПа при высокотемпературном (1200 °С) нагреве, печной нагрев самого изделия не всегда допустим по конечным прочностным показателям, так как приводит к разупрочнению основы.

Более производительным процессом закрепления предварительно нанесенных покрытий является оплавление с помощью газопламенной горелки, что позволяет дополнительно придать покрытию однородность структуры, повышение твердости, снижение пористости [20].

Существуют технологические варианты нанесения и последующего оплавления покрытий тем же пламенем газовой горелки для восстановления изношенных и упрочнения новых деталей самофлюсующимися порошками типа ПГ-АН9, что обеспечивает твердость в диапазоне HRC 35...65 [21]. Отмечается, что стойкость деталей после нанесения и оплавления покрытий возрастает в 2...3 раза.

Однако при всей технологической простоте этого способа существует ряд факторов, которые ограничивают область его применения. Прежде всего, невысокая концентрация энергии в пятне нагрева вынуждает увеличивать длительность процесса до того времени, пока не произойдет плавление нанесенного покрытия, что приводит к сильному прогреву основы детали и изменению ее структуры и механических свойств. Кроме того, перегрев основы увеличивает вероятность коробления

детали и отслоения покрытия. Серьезным недостатком этого способа является окисление внутренних слоев металла в процессе оплавления газовым пламенем.

Наиболее близким к электронному пучку источником энергии, как отмечалось выше, является лазерный пучок. Метод лазерного оплавления предварительно напыленных газотермических покрытий с точки зрения теплофизических процессов, структурных превращений в покрытиях и практики использования в производстве является достаточно изученным. Однако, имея четко выраженную область своего применения, по ряду факторов этот процесс уступает оплавлению электронным пучком: значительно более низкий КПД, дополнительные затраты на защиту расплава от насыщения газами из атмосферы, более высокая стоимость оборудования при мощности более 2 кВт.

Вышеуказанные недостатки лазерного способа в сочетании с существующим в стране парком электроннолучевых установок являются причиной пристального интереса ученых и работников производства к использованию энергии электронных пучков для оплавления предварительно нанесенных на защищаемую поверхность материалов, как с использованием высокоэнергетических пучков в атмосфере, так и низкоэнергетических пучков в вакууме.

Основными предметами изучения в этом технологическом процессе являются изменения структуры и твердости разнообразных покрытий после электроннолучевого оплавления. Для создания таких покрытий преимущественно используются самофлюсующиеся порошковые сплавы системы Ni-Cr-B-Si [22], иногда с добавками карбидов вольфрама, других тугоплавких металлов или керамические материалы.

В технической литературе иногда приводятся сведения по классификации сплавов, используемых при создании покрытий для работы в условиях различного вида изнашивания. Так, в работе [23] приводятся данные по твердости, механическим свойствам, коэффициенту теплового расширения, теплопроводности, температурам твердых сплавов для наплавки. Показано, что твердые сплавы на основе Fe применяют чаще всего там, где требуется высокая абразивная износостойкость при обычных температурах эксплуатации. Твердые сплавы на основе Co

используются для создания покрытий для работы в условиях сочетания износостойкости и коррозионной стойкости. Наиболее распространенные в последние годы сплавы со связкой на основе Ni используются для создания эффективных износостойких покрытий [24]. По показателям коррозионной стойкости эти сплавы занимают промежуточное место между кобальтовыми, как наиболее стойкими, и сплавами на основе Fe.

Таким образом, комбинированные технологии с использованием электроннолучевого оплавления покрытий несомненно являются одними из наиболее высокоэффективных, так как высокая концентрация энергии в пятне нагрева и высокий КПД в сочетании с преимуществами вакуума как защитной среды и позволяет создавать покрытия с высокими эксплуатационными свойствами. В полной мере это относится к группе наименее изученных интерметаллидных материалов на основе Ni-Al и Ti-Al сплавов, приобретающих все большее распространение в современном отечественном и зарубежном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuiyi Z., Yingzong Q., Tongtam Z. Utwardzanie powierzchniowe stali przy wykorzystaniu energii slonecznej // *Metallozn. i obrob. ciepl.* – 1985. – № 75. – С.10-12.
2. Акаси К. Тенденции развития технологии поверхностного упрочнения // *Токусюко. Spec. Steel.* – 1986. – v.35. – N.12. – С.6-14.
3. Zmihorsky E. Termodynamiczna magnetostrykcja w zastosowaniu do nowoczesnej obrobki cieplnej // *Metalljzn., obrob., ciepl., inz. powierz.* – 1987. – № 90. – P. 8-10.
4. Каунов А. М., Букин В. М., Бурминская Л.Н. Структура и свойства покрытий из стали X18H15, полученные с помощью ударных волн // *Порошк. металлургия, Киев, 1989.* – № 2. – С. 35-38.
5. А.с. № 1353824. Способ поверхностного упрочнения быстрорежущей стали /Филиппов С.П., Попандоупло А.Н., Калинина В.И. и др. Оpubл. в Б.И., 1987. – № 43.
6. Травина Н.Т., Артамонова И.В., Потипалова Е.В. и др. Структура и свойства поверхностных слоев сталей и сплавов, модифицированных ионно-лучевой обработкой // *Поверхн. слой, точ. и эксплуат. свойства деталей машин: Тез. докл. семина., Москва, 25 мая, 1990.* – М., 1990. – С.60.
7. Barton D. Ion nitriding // *Automot. Technol. Int., 1989.* – London, 1989. – P. 473-475.

8. Шулов В.А., Стрыгин А.Э., Пастухов К.М. Исследование химического состава жаростойких покрытий Ni-Co-Cr-Al-Y, полученных методом прямого электроннолучевого испарения в вакууме // Поверхность. Физ. хим., механика. – 1988. – № 6. – С. 118-125.
9. Исследование свойств защитных покрытий направляющих лопаток ГТ-100 после длительной эксплуатации и оценка долговечности покрытий: Отчет о НИР (заключит.) / ПО «ЛМЗ»; Руководитель Анфимов А.И. – ГР № 01860113329. – 1986. – 30 с.
10. Разработка и исследование конденсированных покрытий для лопаток турбины ГТ-150: Отчет о НИР (заключит.) / НПО ЦКТИ; руководитель Рыбников А.И. – ГР № 01900003312. – 1990. – 119 с.
11. Солоненко О.П. Диалоговый инженерный моделирующий комплекс плазмотрон-струя-покрытие для оптимизации режимов напыления // Фундам. науки – нар. хозяйству. – М., 1990. – С. 550.
12. Стацера В.В., Моисеев В.А. Плазменная технология в машиностроении. Красноярск: Изд-во Красноярск. гос. ун-та, 1989. – 122 с.
13. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Батаев В.А., Гельтман И.С. Изнашивание защитных покрытий в условиях воздействия газоабразивной среды // Пробл. прочн. – 1988. – № 5. – С. 108-110.
14. Кобяков О.С., Гинзбург Е.Г., Ермоленко Л.М. Исследование износостойкости покрытий из терморезагирующих порошковых материалов // Машиностроение, Минск, 1989. – № 14. – С. 92-96.
15. Райчук Д.Ю., Ермаков С.А., Соснин Н.А. Тополянский П.А. Поверхностное упрочнение стали методом плазменной закалки с нанесением покрытия карбида кремния //Повыш. качества, надежн. и долговечн. изделий из конструкцион., жаропрочн., порошк. и инструмент. сталей и сплавов. Краткосроч. семин., 24-25 июня, Л., 1986. – С. 73-77.
16. Гузанов Б.Н., Обабков Н.В., Белянкина Н.Г. и др. Композиции Ni-Cr-Al для плазменного напыления // Защит. покрыт. на металл.-Киев, 1987. – № 21. – С.38-41.
17. Guzi C.E., Zellmer G.F., Trun D.P. Thermal spray coatings for recovery boiler waterwall corrosion protection // 5th Int. Symp. Corros. Pulp. and Pap. Ind., Vancouver, June 3-6, 1986. Montreal, 1986.- P. 209-217.
18. Разработка детонационнотехнологического комплекса с повышенной стабильностью свойств покрытий: Отчет о НИР / Новосиб. фил. Всесоюз. н.-и. и конструкт. ин-та хим. машиностроения (НИИХИММАШ), Новосибирск; Руководитель Мальцев В.Г.; ГР № 03880024975. – 1989. – 307 с.
19. Фоминых Е.В., Ключников О.И., Фоминых В.В. Изучение процессов взаимодействия между покрытием и основой // Поверх. слой, точ. и эксплуат. свойства деталей машин: семин., Москва, 25 мая, 1990. – М., 1990. – С. 49.
20. Борисов В.А., Александров А.Н. Цай В.Н. Лючев А.А.// Газотерм. способы нанесения защит. покрытий, Челябинск, 1986. – С. 75-78.
21. Поцелуйко В.Н., Максимович Б.И., Лейначук В.Е. Опыт газоплазменного напыления покрытий с одновременным их оплавлением при восстановлении деталей автомобилей // Автомат. сварка, 1987. – № 3. – С. 72-73.
22. Димитров Н., Томова Т., Коле К. Исследование свойств покрытий, полученных методом электроннолучевого оплавления // Соврем. достиж. в обл. техн. и применение газотерм. и вакуум. покрытий, АН УССР. ИЭС им. Е.О. Патона, Киев, 1991. – С.157-161.
23. Ortvann R., Nestler S. Werkstoffe zum verschleibschutz// Thyssen Edelstahl Techn., Berlin, 1988. – № 2. – P. 187-190.
24. Радченко М.В., Радченко В.Г., Шевцов Ю.О., Радченко Т.Б. Результаты исследований комбинированной технологии создания защитных покрытий на панелях котлов модульного типа// Вестник АНЦ САН. – 2003. – № 6. – Барнаул: Изд-во АГУ. – С. 70-78.