

Для облегчения дальнейших рассуждений на заданную тему введём в рассмотрение (хотя бы временно) понятие крутизны процесса прерывистого резания с переменным сечением срезаемого слоя, оцениваемое значением угла контакта τ : чем больше численное значение угла τ , тем круче процесс. При этом крутым процессом прерывистого резания с переменным сечением срезаемого слоя будем считать процесс, в котором $\tau \geq 20^0$. Но вернёмся к графикам на рис. 4. Зависимость средней температуры стружки $\theta_{стр}^{cp}$ от угла μ поворота зуба фрезы имеет как бы два участка: на первом участке до значений $\mu = 15... 20^0$ наблюдается крутой почти линейный рост температуры стружки, на втором - довольно резкое снижение интенсивности её роста. Отсюда вытекает никем ещё не озвученный вывод: увеличение крутизны процесса прерывистого резания с переменным сечением срезаемого слоя таит в себе ряд скрытых производственных возможностей. Разъясним этот аспект более подробно. Крутизна прерывистого процесса резания тем больше, чем больше угол τ непрерывного контакта любой точки режущей кромки (например, вершины) с заготовкой во вращательном движении инструмента (например, при $\tau \geq 20^0$). Следовательно, чем больше этот показатель, тем эффективнее протекает процесс резания.

УДК 621.793

Кардаполова М.А., Девойно О.Г., Константинов В.М., Яцкевич О.К.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ С УЛУЧШЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ

Для получения покрытий в настоящее время используют широкую гамму материалов. Выбор конкретного материала определяется как требуемыми эксплуатационными параметрами поверхности, так и экономическими соображениями. Поэтому в настоящее время активно ведется разработка новых материалов, обладающих низкой стоимостью при высоком уровне обеспечиваемых свойств.

В этом отношении интерес представляют износостойкие покрытия из керамических материалов. Такие покрытия позволяют не только увеличить ресурс работы машины в агрессивных средах при высоких температурах, но и заменить дефицитные и дорогостоящие материалы более дешевыми. Керамические покрытия обладают высокой твердостью, износостойкостью, устойчивы к химически-активным средам, имеют высокую рабочую температуру, не образуют мостиков схватывания при трении. Недостатком керамических покрытий является высокая хрупкость, пористость, низкая адгезия и прочностные свойства в условиях динамических нагрузок [1].

Для расширения области применения керамических материалов необходимо постараться устранить присущие им недостатки. С этой целью нами проводится поиск эффективных методов улучшения комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств керамических.

В качестве объекта исследования были выбраны плазменные покрытия из оксида алюминия. Большим преимуществом данного материала является его доступность и дешевизна. Од-

Выводы

1. Физические показатели процесса резания (температура резания, силы, деформации и др.) не лимитируют повышение производительности обработки.
2. Отмеченные преимущества процесса прерывистого резания с переменным сечением срезаемого слоя можно перенести на токарную обработку.
3. На токарном станке этим процессом можно удалять сколь угодно большие припуски за один проход, что особенно актуально в тяжёлом и среднем машиностроении.
4. Имеется возможность повышать производительность обработки резанием путём размещения ряда лезвий на окружности вращения инструмента.
5. В условиях данного процесса снижаются температура резания и износ инструмента, улучшается отвод стружки (в виде коротких завитков) из зоны резания, повышается эффективность СОЖ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». - М: Машиностроение, 1990. - 288 с: ил.
2. Даниелян А.М. Износ инструмента и тепловые явления при резании металлов. - М.: Машгиз, 1946.

нако и ему присущи недостатки, общие для всех керамических покрытий, - низкая адгезия между покрытием и основой [2].

Применение оксида алюминия в композиции с другими материалами позволяет получить покрытия с улучшенными эксплуатационными свойствами. Порошки для нанесения защитных покрытий получают смешиванием порошков различных материалов, лакированием, конгломерированием, припеканием к поверхности частиц порошка основы более мелкодисперсных порошковых материалов, содержащих легирующие элементы.

Представленные методы связаны с использованием сложного технологического оборудования и со значительными материальными затратами [3]. Недостатком механических смесей является сегрегация частиц составляющих компонентов в процессе хранения, транспортировки и нанесения, которая в результате приводит к неравномерности химического состава, строения покрытия и, следовательно, к ухудшению эксплуатационных свойств. Кроме того, качественный и количественный подбор состава композиций требует трудоемких и сложных исследований [4].

Новым направлением получения материалов для композиционных покрытий является диффузионное легирование порошков. Данная технология в настоящее время получила распространение благодаря работам, проводимым в Полоцком Государственном университете [5].

Кардаполова Маргарита Анатольевна, к.т.н., ведущий научный сотрудник НИЧ Белорусского национального технического университета.

Девойно Олег Георгиевич, д.т.н., профессор каф. «Технология машиностроения», главный научный сотрудник НИИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.

Яцкевич Ольга Константиновна, аспирант каф. «Технология машиностроения», инженер каф. «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220050, г. Минск, пр-т Независимости, 65.

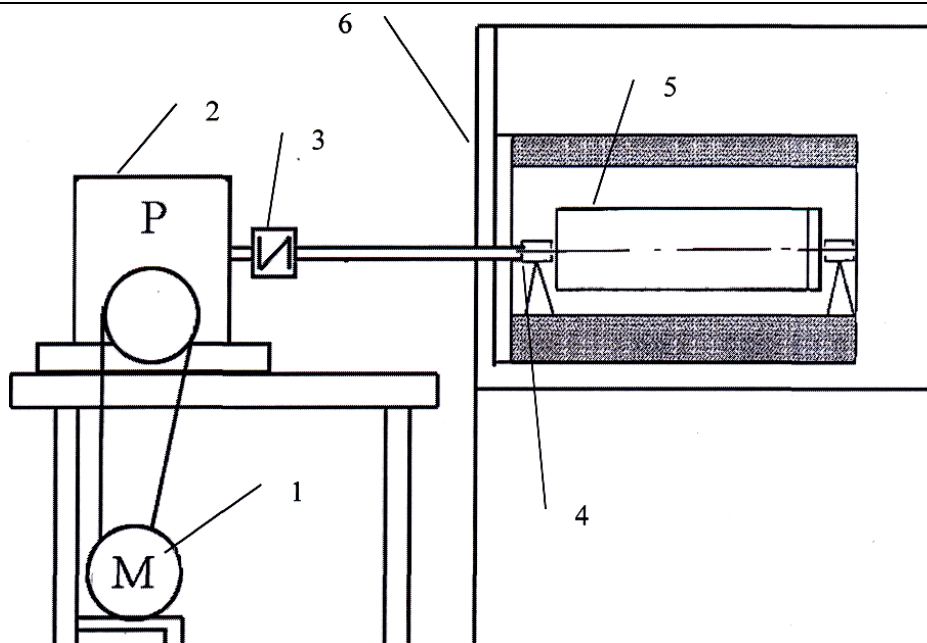


Рис. 1. Схема лабораторной установки для диффузионного легирования порошков во вращающемся контейнере: 1-двигатель; 2-редуктор, вариатор; 3-муфта карданная; 4-опоры; 5-контейнер; 6- печь сопротивления

При диффузионном легировании на поверхности каждой гранулометрически самостоятельной частицы формируется диффузионная оболочка. Частицы компонентов в порошке, полученном диффузионным легированием, имеют размеры, обеспечивающие оптимальные температурно-временные условия при прохождении через плазменную струю.

Технология получения диффузионно-легированного порошка включает в себя следующие стадии:

- сушка и рассев исходных материалов;
- смешивание материалов в определенном соотношении;
- герметизация и размещение контейнера с порошками в лабораторной установке (рис.1.);
- изотермическая выдержка в печи с вращением контейнера (50 - 100 мин⁻¹, 1100 - 1250°C, 1...2,5 часа).

Особенностью данного метода получения порошков является использование гравитационного способа для получения подвижной насыщающей смеси (кипящего или псевдокипящего слоя). В подвижной смеси происходит интенсификация диффузионного легирования порошков, что объясняется ускорением процессов тепломассопереноса вследствие постоянного движения, перемешивания и контактирования частиц рабочей смеси в процессе обработки. Интенсификация диффузионных процессов происходит также в результате пластического деформирования материала при перемешивании [5]. Полученные таким способом диффузионно-легированные порошки не имеют мировых аналогов.

В данной работе для формирования покрытий был использован порошок из оксида алюминия, диффузионно-легированный молибденом.

В качестве легирующего элемента был выбран молибден, так как он обладает хорошими фрикционными свойствами. Его введение приведет к пластификации покрытия и увеличению средней плотности [1].

Целью работы является изучение возможности повышения комплекса эксплуатационных характеристик покрытий на основе оксида алюминия путем легирования его молибденом и разработка технологического процесса получения таких покрытий.

Для плазменного напыления покрытий использовалась установка УПУ-3Д с плазматроном ПП-25. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа применялся азот. Расход газа – 3 м³/ч. Напряжение дуги 85...90 В, сила тока

варьировалась в пределах 170...400 А. Толщина напыленного слоя составляла 0,5...0,7 мм.

На первом этапе была проведена оптимизация режимов напыления покрытия из чистого оксида алюминия и легированного молибденом. Для этого была установлена зависимость между током дуги плазматрона, дистанцией напыления и адгезией покрытия. Планирование эксперимента проводилось по модели полного факторного эксперимента. Входные параметры, ток дуги и дистанция напыления, менялись на двух уровнях: минимальном и максимальном. Значения тока дуги составили 350А и 420А, дистанции напыления - 90мм и 110мм. Сравнение значений адгезии для легированного покрытия и покрытия из чистого оксида алюминия показало, что введение молибдена значительно снизило хрупкость оксида и повысило прочность сцепления покрытия с основой в 2 – 2,5 раза.

Математические модели для двух видов покрытий свидетельствуют о положительной корреляции между адгезией и током дуги плазматрона и отрицательной корреляции между адгезией и дистанцией напыления:

$$Y_1 = 20,02 + 1,38 X_1 - 4,67X_2, \quad (1)$$

$$Y_2 = 10,24 + 1,01X_1 - 1,71X_2, \quad (2)$$

где Y_1, Y_2 – адгезия соответственно легированного покрытия и покрытия из чистого оксида алюминия, МПа; X_1 – величина тока дуги, А; X_2 – дистанция напыления, мм.

Полученные результаты объясняются тем, что при малых токах дуги мощности плазменной струи недостаточно для удовлетворительной термоактивации частиц напыляемых материалов, в результате когезионная прочность покрытий оказывается низкой. При увеличении тока дуги прогрев частиц улучшается, достигая оптимальных значений, увеличивается плотность и когезионная прочность, в результате растет и износостойкость.

При слишком малых дистанциях напыления из-за сильного нагрева материала основы и покрытия, в последнем накапливаются большие внутренние напряжения, приводящие к массовому образованию трещин и пор. При больших дистанциях напыления частицы наносимого материала теряют свои термодинамические характеристики не достигнув основы. Когезионная прочность покрытия при этом снижается.

Таблица 1. Результаты рентгеноструктурного анализа после напыления

Наименование фазы	Количество линий		Концентрация фазы, %	
	покрытие Al_2O_3	покрытие Al_2O_3+Mo	покрытие Al_2O_3	покрытие Al_2O_3+Mo
$\gamma-Al_2O_3$	13	13	68,3	54,0
$\alpha-Al_2O_3$	6	6	31,0	28,5
Mo	-	4	-	10,6
MoO_3	-	2	-	5,1

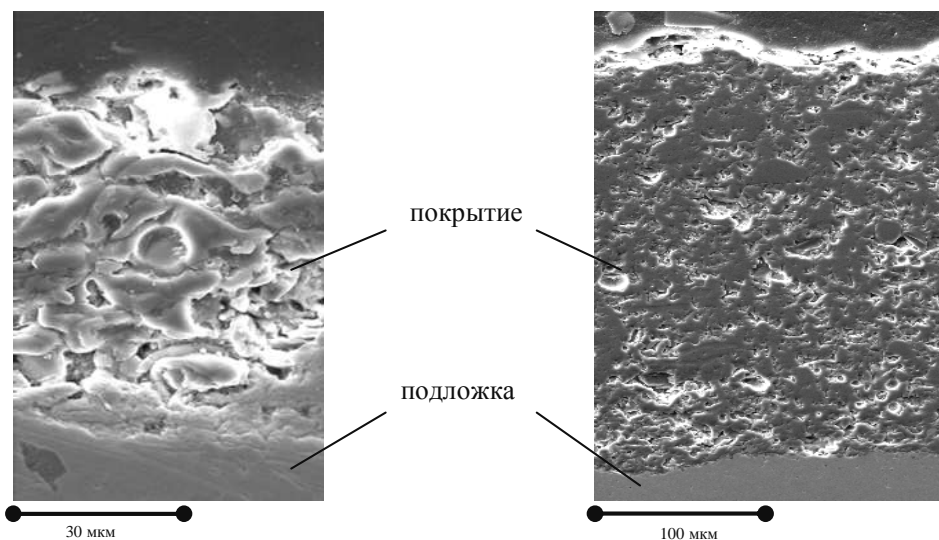


Рис. 2. Микроструктура покрытий: а) оксид алюминия, легированный молибденом; б) чистый оксид алюминия.

По полученным регрессионным моделям влияния параметров напыления на адгезию рекомендованы режимы плазменного напыления. Наибольшая адгезия легированного покрытия 26-27 МПа и нелегированного -10,5-11,2 МПа может быть получена при токе дуги плазмотрона 420 А, напряжении 80 В и дистанции напыления 90 мм. Полученные режимы использовались в дальнейшем при напылении образцов для последующих исследований.

Рентгеноструктурные исследования осуществлялись с использованием пакета прикладных программ «ARSANAL», который был разработан для автоматизированной обработки данных рентгеноструктурного анализа. Проведение съемок выполнялось в строго идентичных условиях на дифрактометре ДРОН-3,0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении; при этом в исследованном интервале углов толщина слоя 75%-ного поглощения энергии первичного пучка составила от 3 до 12 мкм (углы θ от 10 до 75°).

Рентгеноструктурный анализ полученных образцов показал, что как легированное так и нелегированное покрытия состоят из $\gamma-Al_2O_3$ и $\alpha-Al_2O_3$ примерно в одинаковых пропорциях (табл. 1).

Присутствие $\alpha-Al_2O_3$ увеличивает износостойкость и плотность покрытия. Наличие $\gamma-Al_2O_3$ повышает вязкость нанесенного покрытия, что в данном случае является благоприятным фактором. Молибден в легированном покрытии содержится в чистом виде в количестве около 10%. На рентгенограмме кроме линий чистого молибдена выявлены линии оксида молибдена MoO_3 . Данная фаза образуется в незначительном количестве в результате поверхностного окисления молибдена при прохождении частиц через плазменную струю.

Изучение структуры проводилось на сканирующем электронном микроскопе CAM SCAN-4 при увеличении 1500 и 2000 раз и разрешающей способности 4 нм. Энергодисперсионная система EDX-INCA-350 позволила количественно определить процентное содержание химических эле-

ментов в покрытии. Для получения распределения элементов в керамическом покрытии съемку производили в рентгеновских лучах $AlK\alpha$, $FeK\alpha$, $OK\alpha$, $CrK\alpha$, $MnK\alpha$, $MoK\alpha$.

Тонкие исследования структуры покрытий методом показывают, что у легированного молибденом покрытия граница с подложкой менее четкая в сравнении с покрытием из чистого оксида алюминия (рис. 2). Распределение молибдена по покрытию – неравномерное и предполагает, что частицы молибдена не только обволакивают частицу оксида, но и прилипают к ней целиком.

Исследования показали, что введение пластичного металла, в данном случае - молибдена, позволило уменьшить пористость керамического покрытия. Частицы молибдена в покрытии из легированного оксида алюминия выполняют роль уплотнителя при формировании покрытия и заполняет поры, которые возникают при использовании «чистого» оксида алюминия.

Пористость покрытия из легированной окиси уменьшилась в 2-2,4 раза по сравнению с пористостью покрытия из «чистого» оксида алюминия. В исследуемых покрытиях поры имеют неправильную форму. Площадь пор в сечении, нормальной границе раздела между покрытием и основой, меньше, чем в сечении, параллельном границе. Данный фактор обусловлен особенностями послойного формирования покрытий.

Микротвердость легированных покрытий снизилась и составила 3239 МПа, в то время как средняя микротвердость покрытия из чистой окиси алюминия составила 5640 МПа.

Чтобы понять, как это сказалось на трибологических свойствах, было проведено исследование износостойкости на машине трения для ускоренных сравнительных испытаний материалов на износ МТ – 1.

Испытания проводились в условиях сухого трения по схеме диск колодка. Линейная скорость вращения истирающего диска $V_{диск}=2,3$ м/с. Нагрузка на образец варьировалась в пределах 30 – 70 Н, время испытаний - 60 сек и 300 сек. Величина износа определялась по глубине лунки, вытираемой на образце.

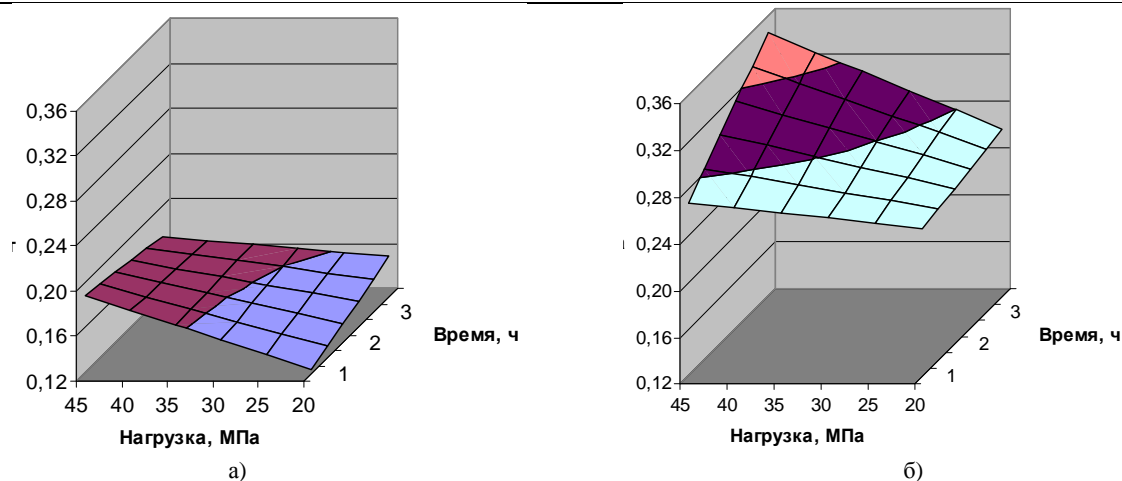


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от нагрузки и времени испытания при постоянной скорости вращения образца $V = 6$ м/мин: а) легированное покрытие, б) покрытие из оксида алюминия

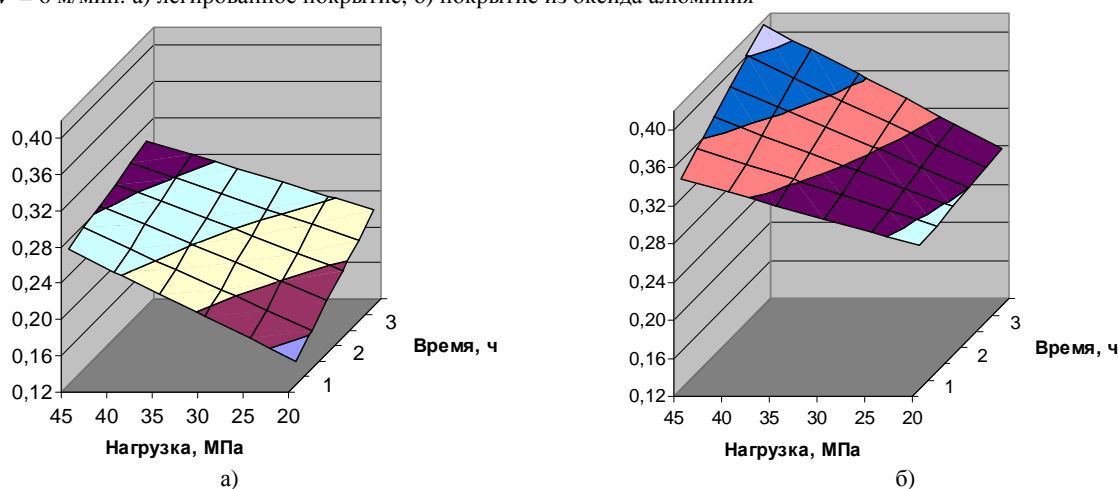


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения от нагрузки и времени испытания при постоянной скорости вращения образца $V = 10$ м/мин: а) легированное покрытие, б) покрытие из оксида алюминия

Были получены регрессионные модели, связывающие интенсивность изнашивания покрытия с величиной нагрузки и временем испытаний.

$$Y_1 = 3,91 + 0,46 X_1 - 0,39 X_2, \quad (3)$$

$$Y_2 = 3,75 + 0,40 X_1 - 0,32 X_2, \quad (4)$$

где Y_1, Y_2 – интенсивность изнашивания соответственно легированного покрытия и покрытия из чистого оксида алюминия; X_1 – величина нагрузки, кг А; X_2 – время испытания, с.

Было установлено, что интенсивность изнашивания двух покрытий отличается незначительно как при низких, так и при увеличении нагрузки до 70 Н, хотя микротвердость легированного покрытия меньше.

Исследование момента трения и коэффициента трения проводили на машине трения и износа типа Amsler. В этом случае исследования проводились на неподвижном контртеле (колодка) и вращающемся образце (диск). Материал контртела – закаленная сталь 45. Величина нагрузки варьировалась в пределах 20-40 МПа, скорость вращения образца 6-10 м/мин.

Для покрытия из чистой окиси алюминия коэффициент трения составляет 0,24-0,26. Введение молибдена позволило снизить коэффициент трения в 2-2,2 раза, его значения находятся в пределах 0,11-0,12.

Методом полного факторного эксперимента были получены математические модели, связывающие коэффициент трения покрытия с величиной нагрузки, скоростью вращения образца и временем испытаний.

Полученные математические зависимости имеют вид:

$$Y_1 = 0,1875 + 0,015 X_1 + 0,03 X_2 + 0,0325 X_3 - 0,0075 X_1 X_2 + 0,01 X_1 X_3 + 0,0117 X_2 X_3 \quad (5)$$

$$Y_2 = 0,2929 + 0,0163 X_1 + 0,0279 X_2 + 0,0213 X_3 - 0,0096 X_1 X_2 + 0,0096 X_2 X_3, \quad (6)$$

где Y_1, Y_2 – коэффициент трения соответственно легированного покрытия и покрытия из чистого оксида алюминия, МПа; X_1 – время испытания, ч; X_2 – величина нагрузки, МПа; X_3 – скорость вращения образца, м/мин.

Особенно заметна разница в коэффициентах трения легированного покрытия и оксида при больших давлениях в паре трения. При увеличении давления и относительной скорости скольжения в паре трения для обоих покрытий происходит интенсификация изнашивания, коэффициент трения увеличивается (рис. 3). Однако легированное покрытие при давлении 40 МПа имеет меньшую тенденцию к увеличению коэффициента трения.

Исследования влияния условий трения (контактного давления и скорости скольжения) на коэффициент трения показал, что при увеличении нагрузки от 20 до 40 МПа и скорости скольжения от 6 до 10 м/мин коэффициент трения у легированного покрытия увеличивается на 15-20% меньше, чем у оксида (рис. 4). Это говорит о том, что покрытие, сформированное из диффузионно-легированного порошка «оксид алюминия + молибден» можно рекомендовать для тяжелых условий трения.

Возможной областью применения покрытия может быть напыление штоков нефтяных насосов. Керамическое покрытие, которое в настоящее время наносится на цилиндрическую поверхность штока, обладает низкой адгезией и скалывается в процессе эксплуатации. Напыление легированного оксида алюминия позволит получить износостойкое покрытие с высокой адгезией.

Технологический процесс нанесения покрытия может включать в себя следующие стадии:

- подготовка поверхности для нанесения покрытия дробеструйной обработкой: давление воздуха 0,5 МПа, диаметр сопла 8 мм, дистанция 30 мм, использовалась чугунная колотая дробь ДЧК-1,5 ГОСТ 11964-81 со средним размером 1,5 мм;
- напыление покрытия: ток дуги плазматрона 420 А, напряжении 80 В, дистанция напыления 90 мм, плазмообразующий газ – азот, расход газа – 3 м³/ч. Толщина покрытия 0,5-0,7 мм.
- контроль качества покрытий.

Выводы

Введение молибдена оказало положительное влияние на физико-механические и эксплуатационные характеристики керамического покрытия. Значительно снизилась хрупкость и увеличилась адгезия покрытия с основой в 2-2,5 раза. Коэффициент трения легированного покрытия, в сравнении с покрытием из чистого оксида алюминия, снизился в 2-2,2 раза и составил 0,11-0,12.

Рентгеноструктурный анализ образцов из чистого оксида алюминия и легированного молибденом выявил в образцах обоих составов фазы α - Al₂O₃, γ -Al₂O₃. Легированный образец содержит дополнительно оксид молибдена MoO₃, и чистый молибден в количестве около 10%. Распределение молибдена

УДК 621.793

Константинов В.М., Авсиевич А.М.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ (ДЛС) ПОРОШКОВ

Введение. Одним из путей повышения эффективности технологии газотермического напыления защитных покрытий является использование порошковых материалов, прошедших химико-термическую обработку. Нарращивание серийного выпуска таких порошков столь известными фирмами как "Hoganas" (Швеция), "Kobe Seiko" (Япония), "Mannesmann Demang" (Германия) свидетельствует о том, что это является мировой тенденцией [1, 2]. Указанный путь открывает широкие дополнительные возможности для управления свойствами формируемых покрытий и позволяет существенно улучшить технологические свойства дисперсных материалов, применяемых для напыления.

На территории СНГ данное направление представлено технологией производства диффузионно-легированных самофлюсующихся (ДЛС) порошков [1, 3]. Сутью данной разработки является придание исходным порошкам преимущественно на основе железа флюсующих свойств. Частицы порошка в этом случае имеют композиционное строение и состоят из ядра и диффузионной оболочки, содержащей в высокой концентрации флюсующий элемент (бор, кремний). Применение бора предпочтительно ввиду его большего химического сродства к кис-

ло покрытие – гетерогенное, что вызвано структурными особенностями исходного порошка и предполагает, что частицы молибдена прилипают к частице оксида.

Представленные результаты показывают перспективность применения метода диффузионного легирования керамических порошков для получения покрытий с высокими эксплуатационными свойствами. Исследования в данном направлении будут продолжаться. В дальнейшем планируется установить влияние содержания молибдена в исходном порошке на физико-механические свойства покрытия, влияние пористости покрытия на его износостойкость, а также влияние режимов напыления на эксплуатационные характеристики. Кроме того, с использованием описанной технологии предполагается получить оксид алюминия, легированный не только молибденом, но и бором.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.А. Сидоренко, Е.Н. Ардаговская. – Киев.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
2. Аппен А.А. Температууроустойчивые неорганические покрытия – М.–Л.: Химия, 1976. – 296с.
3. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. – М.: Металлургия, 1973. – 400с.
4. Газотермическое напыление композиционных порошков/ Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мухин А.С., Никитин М.Д. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199с., ил.
5. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков: монография/ В.М. Константинов, Н.В. Спиридонов, О.Г. Девойно, А.М. Авсиевич; под ред. чл.-корр. НАНБ Ф.И. Пантелеенко – Мн. Технопринт, 2005. – 146с.

лороду [3]. При диффузионном насыщении бором порошков черных металлов в центре частицы сохраняется структура исходной стали или чугуна, а поверхностный слой представляет собой преимущественно боридную фазу [1, 3]. В процессе насыщения растущий боридный слой интенсивно оттесняет вглубь частицы присутствующие легирующие элементы [1]. Концентрация бора в приповерхностном слое частиц максимальна, что повышает флюсующую способность порошка. Толщина боридного слоя и, соответственно, содержание бора в частице зависит от технологических режимов процесса насыщения. Фактически такая частица имеет двухфазное строение: свойства поверхностного легированного слоя соответствуют свойствам бориды, а свойства ядра частицы - свойствам исходного материала на основе железа.

Постановка задачи. В отличие от известных плакированных порошков, в которых тонкая оболочка легкоплавкого металла покрывает основной материал, частицы ДЛС-порошков являются более сложной и разнородной системой. Теплофизические и химические свойства бориды их внешнего слоя значительно отличаются от свойств исходного металла сердцевинны. Это предопределяет особенности взаимодей-

Константинов Валерий Михайлович, к.т.н., доцент, зав. каф. «Материаловедение в машиностроении» Белорусского национального технического университета.

Авсиевич Андрей Михайлович, к.т.н., ст. преподаватель каф. «Теория механизмов и машин» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65.