

Технология изготовления режущих пластин из керамики повышенной прочности с многофункциональными покрытиями для высокоэффективной обработки закаленных подшипниковых сталей

М. А. Волосова

Рассмотрены новые технологические принципы конструирования вакуумно-плазменных покрытий для керамики на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ и Si_3N_4 и требования, предъявляемые к покрытиям. Исследованы покрытия: $(\text{Zr}, \text{Hf}, \text{Cr})\text{N}$; $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{N}$; ZrN , обладающие специфическими особенностями, которые могут существенно улучшить работоспособность керамики в различных условиях ее эксплуатации. Разработан технологический процесс и оборудование для нанесения покрытий на керамические образцы и режущие пластины из керамики. Проведенные исследования покрытий, нанесенных в соответствии с разработанными технологическими принципами, показали способность покрытий значительно увеличить прочность на изгиб образцов из оксидно-карбидной и нитридной керамики. Приведены результаты трибологических и прочностных испытаний. Показана возможность замены операции шлифования деталей подшипников из закаленных сталей типа ШХ15СГ (62 – 65HRC) на токарную обработку инструментами, оснащенными пластинами из керамики $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ с покрытием $(\text{Zr}, \text{Hf}, \text{Cr})\text{N}$.

Ключевые слова: нитридная керамика, оксидно-карбидная керамика, подшипниковые стали, износостойкость, нитридное покрытие.

Введение

Производственный опыт промышленно развитых стран показывает, что эксплуатационные качества подшипников во многом зависят от качества обработки элементов (деталей) подшипника и точности их изготовления. Детали в подшипнике работают в условиях многократного нагружения рабочих поверхностей. Участки поверхностей, на которых концентрируются нагрузки, очень небольшие, вследствие чего в них возникают высокие (порядка 3000 – 5000 Н/мм²) локальные напряжения переменного характера, которые распространяются на значительную глубину и в итоге приводят к усталостному разрушению деталей подшипников [1]. Усталостное разрушение начинается с образования микротрещин с последующим их распространением вглубь материала. Образование и развитие усталостных трещин происходит в наиболее напряженных

микрообъемах металла подшипника, ослабленных поверхностными и подповерхностными концентраторами напряжений. Очагами разрушения могут быть дефекты металлургического и технологического характера. Дефекты второго вида закладываются на операциях термической и механической обработки [2 – 4]. При изготовлении деталей крупногабаритных подшипников, в первую очередь колец, в процессе их термообработки происходят существенные деформации, поэтому возникает необходимость в назначении больших припусков на шлифование — до 2 мм на сторону. Столь большие припуски приводят к усложнению операции шлифования, а также к повышенному расходу абразивного инструмента. Одновременно с этим, операция шлифования сама является одним из основных источников технологических дефектов, при которых на поверхности детали образуются локальные пятна отпуска (прижоги) [5].

На рис. 1 представлена иллюстрирующая выше-сказанное характерная кривая распределения твердости в поверхностном слое детали из закаленной стали (HRC 61 – 63) после шлифования. Там же приведена кривая распределения твердости после токарной обработки инструментом, оснащенным пластиной из керамики на основе Al_2O_3 .

Мировая практика показывает, что сегодня одно из основных направлений совершенствования производства подшипников — замена шлифования на токарную обработку инструментами, оснащенными пластинами из керамики и сверхтвердых материалов (СТМ) [6 – 10]. Главной проблемой для реализации этого, является низкая прочность и теплопроводность керамики, а также различные дефекты объема и поверхностного слоя (микротрещины, поры, а также растягивающие напряжения, образующиеся при шлифовании пластин) и, как следствие, пониженная надежность. Например, в некоторых случаях при обработке поверхности кольца большого диаметра приходится сменять до 2 – 3 режущих кромок (вершин) пластины. Поэтому все технологические направления совершенствования керамики связаны с улучшением ее прочностных свойств, в том числе за счет минимизации дефектов, образующихся на различных этапах изготовления пластин, и повышением ее теплопроводности [9, 11, 12].

Нанесение износостойких вакуумно-плазменных покрытий, как метод повышения эксплуатационных показателей различных видов режущего инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, получил широкое распространение во всем мире. Высокие эксплуатационные показатели инструмента с покрытием обеспечиваются оптимальным сочета-

нием поверхностных свойств (высоких значений твердости, теплостойкости, пассивности по отношению к обрабатываемому материалу и т.д.) и объемных свойств (достаточно высокой прочности при изгибе, ударной вязкости, трещиностойкости и т.д.) [13 – 15].

Однако применение к керамическому инструменту принципов нанесения покрытий, использующихся для твердосплавного и быстрорежущего инструмента, не позволяет достичь существенного эффекта в связи с особенностями физико-механических свойств инструментальной керамики — прежде всего, чрезвычайно низкой электропроводности [16].

Цель настоящей работы — рассмотрение новых технологических принципов конструирования вакуумно-плазменных покрытий для керамики.

Выбор состава износостойких покрытий для режущих пластин из керамики на основе теории конфигурационной модели вещества (КМВ)

Известно, что для быстрорежущего и твердосплавного инструмента главный эффект от нанесения вакуумно-плазменных покрытий заключается в повышении микротвердости контактных площадок режущего инструмента и снижении их адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом [17, 18]. Режущая керамика сама по себе обладает высокими значениями твердости (до 94 HRA) и низкой склонностью к взаимодействию с обрабатываемым материалом. Поэтому и эффекты от нанесения покрытий на режущую керамику проявляются в другом: при нанесении покрытий обеспечивается “эффект залечивания” дефектов (микротрещин, пор и т.д.), формируемых в поверхностном слое керамики на различных этапах ее производства (главным образом, при алмазном шлифовании); покрытие, нанесенное на поверхность керамики, является своего рода “тормозом” для распространения фронта трещин, идущих в направлении поверхности.

Выбор состава износостойких покрытий для режущих пластин из керамики достаточно сложная и неоднозначная задача. Необходимо выбрать или разработать такой состав покрытия, который в комплексе с основным керамическим материалом будут создавать совместимую и практически полезную систему.

Первое требование, которому должно удовлетворять покрытие — это способность сопротивляться разрушению при контактных напряжениях до 3500 МПа и сохранять свои свойства при температурах 500 – 1100 °С, возникающих в процессе резания

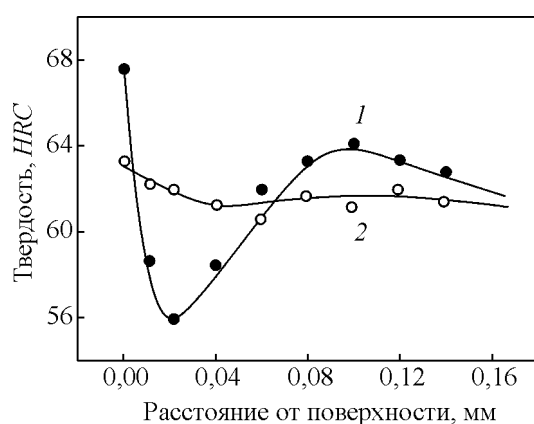


Рис. 1. Характерная кривая распределения твердости в поверхностном слое детали из закаленной стали после различных видов механической обработки: 1 — шлифование, 2 — точение керамикой.

керамическим инструментом. При этом необходимо учитывать разную зависимость свойств (модуля упругости, коэффициентов Пуассона и линейного расширения, твердости др.) покрытия и керамики от температуры. Если с ростом температуры изменение физико-механических и теплофизических свойств материала керамики и покрытия будет происходить неодинаково, покрытие может разрушиться. Если керамический инструмент с покрытием будет эксплуатироваться в условиях прерывистого резания (фрезерования, строгания), то дополнительным требованием к покрытию является нечувствительность к воздействию циклических силовых и температурных нагрузок [17, 19].

Необходимо понимать, что эффекты, которые достигаются нанесением покрытий на керамику, существенно отличаются от тех, которые имеют место при нанесении на быстрорежущие стали и твердые сплавы. Известно, что для быстрорежущего и твердосплавного инструмента главным результатом нанесения покрытий является повышение микротвердости контактных площадок инструмента и снижение их адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом. Керамика изначально обладает высокими значениями твердости и достаточно низкой склонностью к адгезионному взаимодействию со многими обрабатываемыми материалами, но имеет низкие прочностные характеристики. Поэтому главной целью нанесения покрытий является повышение ее прочности. Это может быть достигнуто за счет следующих эффектов.

В настоящее время среди соединений, используемых в качестве покрытий для режущего инструмента, наибольшее распространение получили карбиды, нитриды, карбонитриды и оксиды тугоплавких металлов IV – VI групп Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. К сожалению, на сегодняшний день не существует универсальных теорий и методик для выбора оптимального состава покрытия для инструмента [18, 19]. Для анализа свойств различных соединений, которые могут быть применены в качестве покрытий, наиболее эффективно использовать теорию КМВ [20]. Эта теория объясняет свойства различных соединений с позиции их электронного строения и позволяет сделать теоретическую оценку практически всех наиболее важных свойств покрытий: прочности адгезионной связи с инструментальной основой, склонности к взаимодействию с обрабатываемым материалом, твердости, хрупкости и пластичности, диффузионной активности и теплопроводности.

Опираясь на теорию КМВ, можно сделать вывод о том, что по сравнению с карбидами, карбонитри-

дами и оксидами, нитриды тугоплавких металлов являются наиболее эффективными для применения в качестве покрытий для керамического инструмента, так как сочетают в себе целый комплекс свойств. Конфигурационное строение нитридов свидетельствует об их высокой пассивности по отношению к обрабатываемому материалу (низкая склонность к твердо- и жидкофазным диффузионным реакциям) и достаточно высокой термодинамической устойчивостью (высокое сопротивление высокотемпературному окислению и коррозии). Кроме того, нитриды обладают сравнительно высокой пластичностью, что снижает вероятность их хрупкого разрушения в процессе резания. Естественно, что в зависимости от конкретного используемого металла, свойства нитрида будут существенно различаться [21].

Оценка нитридов тугоплавких металлов, позволила выявить следующие соединения наименее склонные к диффузионным реакциям с обрабатываемыми материалами (в порядке увеличения склонности): $\text{HfN} \rightarrow \text{TaN} \rightarrow \text{TiN} \rightarrow \text{ZrN} \rightarrow \text{NbN} \rightarrow \text{CrN} \rightarrow \text{MoN} \rightarrow \text{WN}$. То есть указанные соединения эффективно использовать при повышенных скоростях резания, когда интенсифицируются диффузионные процессы. В условиях действия адгезионных и адгезионно-усталостных процессов, максимальной устойчивостью обладают следующие соединения (в порядке убывания): $\text{MoN} \rightarrow \text{CrN} \rightarrow \text{NbN} \rightarrow \text{TaN} \rightarrow \text{HfN} \rightarrow \text{ZrN} \rightarrow \text{TiN}$. Максимальной сопротивляемостью зарождению и росту трещин в условиях циклических нагрузок обладают соединения: $\text{TiN} \rightarrow \text{ZrN} \rightarrow \text{HfN} \rightarrow \text{NbN} \rightarrow \text{MoN} \rightarrow \text{CrN}$.

Таким образом, практически все соединения, которые могут быть использованы в качестве покрытий, в одних условиях будут иметь высокие эксплуатационные характеристики, а в других — наоборот, низкие. Создание композиционных покрытий, содержащих два и более элемента, позволяет в одном покрытии сочетать самые разнообразные свойства. В составе композиционного покрытия целесообразно использовать соединения, обладающие большим подобием структур, которые обеспечивают наличие значительных областей их взаимной растворимости: $\text{TiN} - \text{ZrN}$, $\text{ZrN} - \text{HfN}$; $\text{TiN} - \text{HfN}$ и др.

Еще одним важным критерием, который учитывается при выборе металла, входящего в состав покрытия, является его способность к образованию капельной фазы в процессе осаждения. Главной причиной образования капельной фазы при осаждении покрытий методом конденсации в вакууме с ионной бомбардировкой, является поглощение газов металлами с частичным образованием жидкого

раствора. Эти капли являются источниками локальных напряжений в покрытиях и наиболее вероятными местами, с которых начинается их разрушение в процессе резания. Поэтому выбор состава покрытия и режимов его нанесения должен проводиться исходя из условий минимального образования капельной фазы. Например, осаждение покрытий, содержащих алюминий, практически всегда сопровождается образованием капельной фазы. Для ее исключения или минимизации, необходимо применять дополнительные, зачастую дорогостоящие устройства — специальные сепараторы.

Химический состав обрабатываемого материала наряду с рассмотренными выше факторами оказывает огромное влияние на выбор состава покрытия. В настоящей работе не стояло задачи разработки покрытий для какого-то конкретного обрабатываемого материала, а были разработаны такие составы покрытий, которые, по мнению автора, должны обеспечивать повышение эксплуатационных показателей керамики в наиболее типовых условиях ее эксплуатации — высокоскоростной обработке, обработке никелевых сплавов и закаленных конструкционных сталей.

Для нанесения покрытий на керамику на основе $Al_2O_3 - TiC$ и Si_3N_4 были использованы три различные по составу покрытия: $(Zr, Hf, Cr)N$; $(Ti, Cr)N$; ZrN . Каждое из этих покрытий обладает специфическими особенностями, которые могут существенно улучшить работоспособность керамики в разных условиях ее эксплуатации.

Покрытие $(Zr, Hf, Cr)N$ обладает очень высокой термодинамической устойчивостью и способно сохранять свою твердость при больших температурах резания. Все три элемента, входящие в покрытие, имеют существенные дефекты на внутренних электронных орбитах, что делает их весьма восприимчивыми к образованию связей с атомами азота. Кроме того, это покрытие имеет аналогичное керамике изменение коэффициента линейного расширения при нагреве, что также позволяет рассчитывать на высокие эксплуатационные характеристики данного покрытия.

Покрытие $(Ti, Cr)N$ наряду с достаточно высокой пластичностью, обладает высоким сопротивлением адгезионным и адгезионно-усталостным процессам. Микротвердость этого покрытия находится на уровне твердости керамической подложки, что исключает формирование на границе раздела “керамика — покрытие” высоких остаточных напряжений из-за различия их свойств. Кроме того, важное достоинство указанного покрытия — невысокая стоимость исходных материалов, входящих в его состав.

Покрытие ZrN обладает достаточно высокой термодинамической устойчивостью и сопротивляемостью к зарождению и росту трещин, что связано с высокой энергией связи в кристаллической решетке этого покрытия. Еще одна характерная особенность покрытия ZrN — практически полное отсутствие капельной фазы.

Технологический процесс и оборудование для нанесения покрытий на керамический режущий инструмент

Для реализации процесса осаждения перечисленных выше покрытий на керамику на основе $Al_2O_3 - TiC$ и Si_3N_4 , была разработана и создана уникальная вакуумно-плазменная установка (рис. 2).

Нанесение покрытий осуществляется в вакуумной камере 1, изготовленной из аустенитной хромоникелевой стали и выполненной в виде восьмигранной призмы с вертикальной осью. Испарение металла (материала катода) и его ионизация проводится с помощью токоподводящих электродов (вакуумно-дуговых испарителей). Принцип работы испарителя заключается в эрозии материала катода из движущихся катодных пятен, возникающих в процессе горения электрической дуги. Покрываемые изделия устанавливаются на опорно-поворотном столе 5, который приводится в движение механизмом вращения. Вращение стола и сателлитов обеспечивает вращение каждого из изделий вокруг своей оси и оси стола (планетарное вращение). На стол устанавливается экран на изоляторах, который защищает стол от перегрева и запыления в процессе нанесения покрытий. Загрузка изделий в камеру осуществляется через боковую дверь. Создание вакуума в камере установки осуществляется с помощью вакуумной системы, содержащей механический, форвакуумный и диффузионный насосы и комплект вакуумных затворов и клапанов. С целью предохранения камеры от перегрева в процессе нанесения используется система водоохлаждения. Для создания в рабочем объеме установки реакционной смеси газов с заданным объемным соотношением и суммарным давлением используется трехканальная система газонапуска.

Установка имеет перемещаемую заслонку 6 с пневмоприводом и системой коммутации ниточников питания дуговых испарителей с источником напряжения смещения. В зависимости от положения заслонки и коммутации источников в установки могут быть реализованы различные варианты вакуумно-плазменной обработки изделий: режим обработки ионами металла; режим обработки ионами газа.

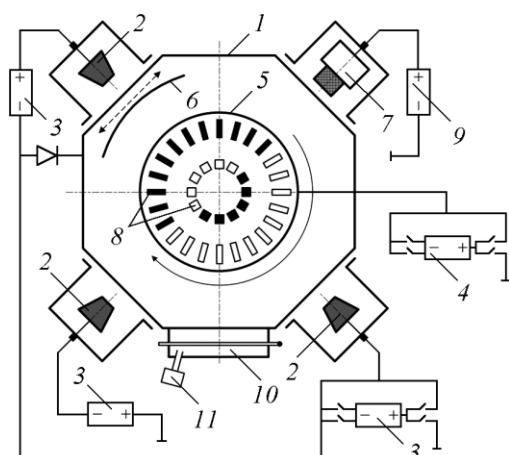


Рис. 2. Принципиальная схема автоматизированной вакуумно-плазменной установки для нанесения покрытий на образцы из керамики: 1 — вакуумная камера; 2 — вакуумно-дуговые испарители с катодами; 3 — источники питания испарителей; 4 — источник питания стола; 5 — опорно-поворотный стол; 6 — перемещаемая заслонка; 7 — источник пучка быстрых нейтральных молекул; 8 — образцы из керамики; 9 — источник питания пучка; 10 — дверь вакуумной камеры; 11 — инфракрасный пирометр.

Режим обработки изделия ионами металла, при котором происходит бомбардировка поверхности изделия и/или осаждение износостойких покрытий реализуется при открытом положении заслонки. В случае, когда заслонка закрыта, микрокапли, атомы и ионы металла не проникают в рабочий объем камеры, а проникают только их электроны, которые, перемещаясь под действием электрического поля к дополнительному аноду, ионизируют газ в рабочем пространстве камеры. Таким путем образуется не содержащая металлических частиц газовая плазма, которая используется для очистки образцов перед нанесением покрытий. В этом случае в качестве дополнительного анода используется катод испарителя.

Обработку изделий из диэлектрических материалов необходимо осуществлять с использованием источника пучка быстрых нейтральных молекул 7, оснащенного источником питания 9. Необходимость применения этого источника определяется тем, что керамика обладает низкой электропроводностью. Это делает подачу на нее отрицательного напряжения менее эффективной, чем на токопроводящие материалы (например, быстрорежущие стали и твердые сплавы). В результате этого распыление поверхности керамики при очистке происходит менее интенсивно, а при конденсации покрытия из-за недостаточной активации поверхности могут форми-

роваться покрытия низкой плотности и с невысокой прочностью адгезионной связи [15]. С целью исключения этих проблем, целесообразно использовать ускоренные частицы (быстрые нейтральные молекулы), которые отдают свою кинетическую энергию приповерхностным атомам изделия и существенно повышают их подвижность. Это существенно повышает эффективность распыления диэлектрических материалов и активации поверхности перед нанесением покрытий. Скорость обработки пучком ускоренных частиц не зависит от потенциала поверхности изделия, а на его однородность и энергию не влияют электрические и магнитные поля, а также другие источники плазмы (электродуговые испарители), работающие одновременно с ним. Для дистанционного бесконтактного измерения температуры поверхности обрабатываемых изделий, помещенных в вакуумную камеру, в установке используется инфракрасный пирометр 11.

Для контроля и управления процессом нанесения покрытий, установка оборудована системой управления. Она представляет собой программируемый контроллер, обеспечивающий управление технологическим оборудованием, входящим в состав установки, через дискретные и аналоговые входы и выходы, а также через стандартные серийные интерфейсы. Система управления установкой обеспечивает режим как ручного, так и автоматического управления.

Разработанный технологический процесс нанесения покрытий на керамические образцы и пластины из керамики $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ и Si_3N_4 включает в себя 4 этапа.

1. Входной контроль и подготовка образцов. Все мероприятия, выполняемые в рамках этого этапа, проводят вне камеры вакуумно-плазменной установки. Они чрезвычайно важны для получения покрытий с высокими эксплуатационными свойствами. Практика показывает, что недостаточная прочность адгезионной связи покрытия с основой и отслоения покрытия в процессе эксплуатации зачастую является следствием некачественного входного контроля и неудовлетворительной подготовки поверхности образцов перед нанесением покрытия [16].

Этот этап включает в себя измерение и контроль геометрических параметров и шероховатости поверхности образцов, макроанализ поверхности на наличие механических дефектов (трещин, сколов) и химических дефектов (прижогов, окисдных пленок).

После входного контроля изделий осуществляется многоступенчатый процесс их очистки, состоящий из следующих операций: промывка в ультразвуковой ванне с применением горячего обезжири-

вающего раствора; промывка в проточной воде при температуре 60–80 °С для удаления следов моющего раствора; промывка в холодной деминерализованной или дистиллированной воде; сушка в специальном шкафу; промывка в ванне с ректификованным этиловым спиртом; сушка в шкафу.

Описанный процесс очистки изделий позволяет эффективно удалять с их поверхности пыль, частицы абразивного материала (порошка или пасты), оксидные пленки, остатки смазочно-охлаждающих жидкостей, применяемых при шлифовании изделий и т.д.

Заключительной стадией подготовительных операций перед нанесением покрытий является разработка и изготовление специальной оснастки, на которой будут размещаться покрываемые изделия. Технологическая оснастка должна обеспечивать надежное крепление изделий, одинаковое удаление всех обрабатываемых изделий от торца катода вакуумно-дугового испарителя, преимущественную ориентацию покрываемой поверхности изделий перпендикулярно направлению плазменного потока. Кроме того, материал оснастки должен выдерживать высокую температуру без деформаций и охрупчивания.

2. Очистка образцов. В отличие от предшествующей ультразвуковой очистки, цель которой — удаление загрязнений с поверхности изделий, процесс ионной и/или молекулярной очистки, который осуществляется на данном этапе, предусматривает травление очень тонкого поверхностного слоя изделия.

Этот этап начинается с загрузки оснастки с закрепленными на ней изделиями в камеру вакуумно-плазменной установки через боковую дверь, после чего проводится откачка вакуумной камеры до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па и запускается механизм планетарного вращения.

Далее после откачки вакуумной камеры и подачи в нее нейтрального газа (аргона) до рабочих давлений, следует предварительная непродолжительная очистка изделий ионами газа (при закрытом положении заслонки).

Заключительной и наиболее важной стадией очистки перед нанесением покрытий является продолжительная обработка керамических изделий источником пучка быстрых нейтральных молекул газа (аргона). В процессе очистки происходит интенсивное травление и активация поверхности изделия в

Таблица 1

Технологические режимы процесса нанесения покрытий на керамику

Процесс		Технологические режимы процесса	Значения режимов при нанесении различных по составу покрытий		
			(Zr,Hf,Cr)N	(Ti,Cr)N	ZrN
Очистка	в газовой плазме (ионами аргона)	Ток дуги на катоде, I , А	100		
		Напряжение смещения, U , В	600 – 800		
		Давление инертного газа, P_{Ar} , Па	$1,0 \cdot 10^{-1}$		
		Время очистки, τ , мин	10		
	быстрыми нейтральными молекулами аргона	Ток пучка, I , А	0,7		
		Разрядное напряжение, U , В	300		
		Давление инертного газа, P_{Ar} , Па	$4,0 \cdot 10^{-1}$		
Конденсация покрытия	бомбардировка ионами металла	Время очистки, τ , мин	40		
		Количество и материал катодов	1 ZrHf + 1 Cr	2 Ti + 1 Cr	2 Zr
		Токи дуги на катодах, I , А	$I_{ZrHf} = 100$ $I_{Cr} = 80$	$I_{Ti} = 110$ $I_{Cr} = 90$	$I_{Zr} = 100$
		Напряжение смещения, U , В	950		
		Время ионной бомбардировки, τ , мин	8		
	осаждение покрытий	Количество и материал катодов	1 ZrHf + 1 Cr	2 Ti + 1 Cr	2 Zr
		Токи дуги на катодах, I , А	$I_{ZrHf} = 100$ $I_{Cr} = 80$	$I_{Ti} = 110$ $I_{Cr} = 90$	$I_{Zr} = 100$
		Напряжение смещения, U , В	300		
		Давление реакционного газа P_{N_2+Ar} , Па	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$
		Время осаждения, τ , мин:			
		для прямоугольных образцов №1 ($h = 3,5$ мкм)	45	30	45
		для прямоугольных образцов №2 ($h = 6$ мкм)	75	60	75
		для квадратных режущих пластин ($h = 2,5$ мкм)	30	20	30
	ассистирование пучком	Ток пучка, I , А	0,7		
		Разрядное напряжение, U , В	300		

Таблица 2

Значения прочности на изгиб керамических пластин с различными видами покрытий

Керамика	Прочность на изгиб, $\sigma_{изг}$ (среднее), МПа с покрытием				Схема изгиба
	исходная	ZrN	(Ti,Cr)N	(Zr,Hf,Cr)N	
Оксидно-карбидная	541	550	589	638	
Нитридная	680	684	719	779	

результате которых может происходить частичное или полное удаление дефектов, присутствующих в поверхностном слое образцов.

3. Конденсация покрытий. Процесс конденсации покрытия начинается с прогрева и активации поверхностного слоя покрываемых изделий. Необходимый прогрев и активация поверхностного слоя диэлектриков достигается при одновременном сочетании двух видов воздействия — ускоренными молекулами газа (источником быстрых нейтральных молекул) и бомбардировкой ионами металла (с использованием вакуумно-дуговых испарителей). При бомбардировке ионами металла кроме прогрева и активации поверхностного слоя, достигается еще один существенный эффект — формируется тонкий подслой, состоящий из материала катода. Его формирование позволяет улучшить прочность адгезионной связи покрытия к керамике [10, 13, 15].

После прогрева изделий до рабочих температур приступают непосредственно к процессу конденсации покрытия, который проводится двумя или тремя вакуумно-дуговыми испарителями в зависимости от состава наносимого покрытия.

Испарение материалов катодов в рабочее пространство камеры с одновременной подачей в камеру реакционного газа (в зависимости вида наносимого покрытия — N_2 , CH_4 + Ar, CH_4 и др.) ведет к протеканию плазмохимических реакций. В результате образуется тугоплавкое соединение, которое конденсируется на керамических изделиях в условиях бомбардировки поверхности последних ионами материала катода. При этом весь процесс конденсации покрытия происходит в режиме ассистирования источником пучка быстрых нейтральных молекул.

После окончания процесса конденсации, включают механизм вращения и охлаждают образцы до комнатной температуры. После охлаждения проводится разгерметизация камеры и выгрузка изделий.

В табл. 1 представлены подробные сведения о технологических режимах, которые задавали при нанесении покрытий выбранного состава.

4. Выходной контроль. На этом этапе осуществляется контроль качества нанесенных покрытий — оценивается наличие отслоений и толщина по-

крытий. Для оценки образцов с покрытиями на предмет наличия отслоений они подвергаются макроанализу, а оценка толщины покрытий про-

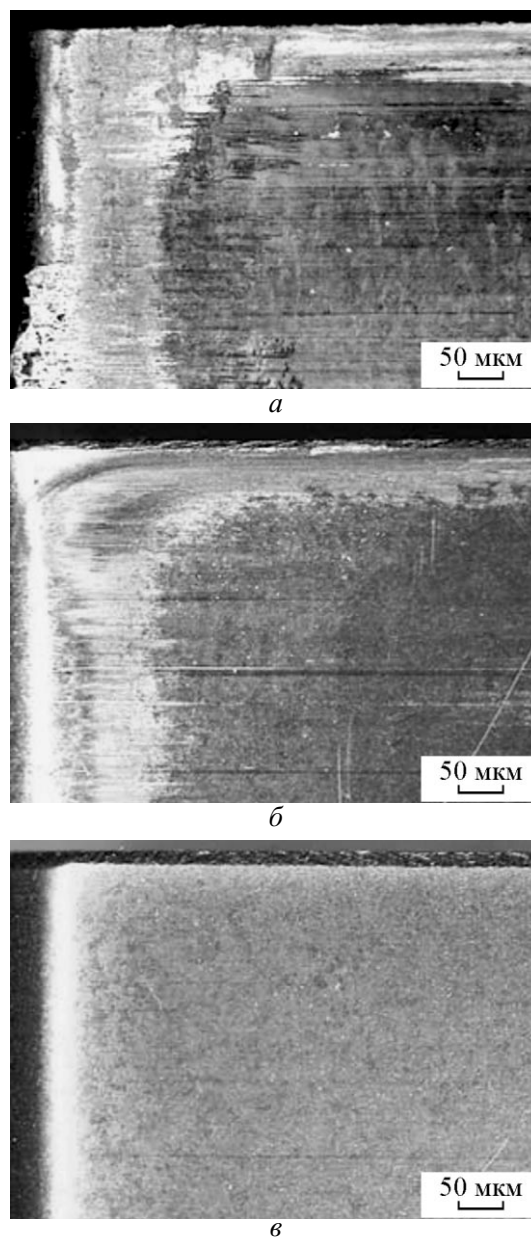


Рис. 3. Вид задней поверхности керамической пластины с различными покрытиями: а — ZrN, б — (Ti,Cr)N, в — (Zr,Hf,Cr)N, после трибологических испытаний.

Таблица 3

Результаты испытаний пластин из керамики при обработке кольца подшипника из закаленной стали ШХ15СГ

Характеристика	Образцы керамики					
	1	2	3	4	5	6
<i>Оксидно-карбидная керамика (исходная)</i>						
Режим резания	$V = 160$ м/мин; $S = 0,2$ мм/об.; $t = 1$ мм					
Стойкость, T , мин	—	14	18	10	15	12
Причина отказа	Скол	Выкрашивание	$h_3 = 0,3$	Выкрашивание	$h_3 = 0,3$	Выкрашивание
Режим резания	$V = 200$ м/мин; $S = 0,08$ мм/об.; $t = 0,5$ мм					
Стойкость, T , мин	20	23	14	26	16	24
Причина отказа	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$	Выкрашивание	$h_3 = 0,3$	Выкрашивание	$h_3 = 0,3$
<i>Оксидно-карбидная керамика после нанесения покрытий (Zr,Hf,Cr)N</i>						
Режим резания	$V = 200$ м/мин; $S = 0,08$ мм/об.; $t = 0,5$ мм					
Стойкость, T , мин	23	27	21	23	25	26
Причина отказа	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$	Выкрашивание	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$
Режим резания	$V = 200$ м/мин; $S = 0,08$ мм/об.; $t = 0,5$ мм					
Стойкость, T , мин	35	32	29	34	30	35
Причина отказа	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$	$h_3 = 0,3$

Примечание: Износ по задней поверхности $h_3 = 0,3$ – максимально допустимый.

водится на образце-свидетеле, который находился в камере вместе с керамическими образцами в процессе нанесения покрытий.

Обсуждение результатов экспериментов

Как показали результаты проведенных исследований, нанесение покрытий в соответствии с разработанными технологическими принципами позволяет значительно увеличить прочность на изгиб образцов из оксидно-карбидной и нитридной керамики. В табл. 2 представлены результаты измерения прочности по схеме четырехточечного изгиба керамических образцов прямоугольной формы ($50 \times 5 \times 4$ мм) до и после нанесения покрытий. Среднее значение прочности рассчитывали по результатам испытаний 20 образцов каждой группы. Из представленных данных видно, что покрытие ZrN практически не оказывает влияния на прочность керамики, покрытие Ti,Cr)N незначительно повышает указанный показатель, а покрытие (Zr,Hf,Cr)N показывает существенное увеличение прочности — на 17% для оксидно-карбидной и на 15% для нитридной керамики, а также снижение разброса ее значений.

Результаты трибологических испытаний (рис. 3) керамических пластин с различными покрытиями хорошо коррелируют с результатами прочностных испытаний — покрытие (Zr,Hf,Cr)N, показывает наибольшее увеличение прочностных характеристик образцов и наименьшую интенсивность изнашивания. Макроанализ состояния задней поверхности керамической пластины с покрытием ZrN после испытаний на изнашивание показывает, что наряду

с образованием кратеров вблизи главной режущей кромки, на рабочей задней поверхности пластины видны следы абразивного и адгезионного износов в виде многочисленных бороздок трения. Исследование образца с покрытием (Ti,Cr)N позволило выявить следы адгезионного износа и высокую интенсивность его нарастания. Наиболее высокую эффективность (наименьшую интенсивность изнашивания) имел образец с покрытием (Zr,Hf,Cr)N, которое и было выбрано для последующих эксплуатационных испытаний.

Заключительным этапом работы были эксплуатационные испытания квадратных пластин из оксидно-карбидной керамики $Al_2O_3 - TiC$, используемых в подшипниковой промышленности для чистовой и получистовой обработки закаленных сталей, и тех же пластин, прошедших нанесение покрытий в соответствии с предлагаемой технологией.

Испытания проводили на токарном станке с ЧПУ при точении наружного диаметра внутреннего кольца подшипника из закаленной стали ШХ15СГ (62 – 65 HRC). Обработку проводили пластинами квадратной формы с передним углом $\gamma = -10^\circ$ и задним углом $\alpha = 10^\circ$.

В табл. 3 представлены режимы испытаний и их результаты.

Заключение

На основе обработки результатов эксплуатационных испытаний установлено, что применение разработанных принципов нанесения покрытий заметно увеличивает стойкость керамических пластин при обработке закаленных сталей.

Установлено, что покрытие повышает надежность процесса резания — при точении большинство всех отказов сводится к отказам, связанным с достижением износа по задней поверхности пластины установленной величины.

Таким образом, при обработке деталей подшипников из закаленных сталей типа ШХ15СГ (62–65HRC) может быть рекомендована замена шлифования на токарную обработку инструментами, оснащенными пластинами из керамики Al_2O_3 – TiC с покрытием (Zr,Hf,Cr)N.

Данная работа финансировалась Министерством образования и науки РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Suslov D.N., Abramov A.P. Vibroacoustic diagnostics of spindle bearings in high-speed machine tools. Russian Engineering Research, 2010, v. 30, no. 9, p. 944 – 947.
2. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Боровский В.Г. Повышение работоспособности керамического инструмента при обработке закаленных сталей. СТИН (Станки Инструмент), 2005, № 9, с. 14 – 19.
3. Маслов А.Р. Диагностирование и контроль процесса резания по предельному состоянию качества обработанной поверхности. Контроль. Диагностика, 2011, № 9, с. 49 – 51.
4. Григорьев С.Н., Маслов А.Р., Завгородний В.И. Обеспечение заданного качества деталей при высокоскоростной обработке. Вестник МГТУ Станкин, 2010, № 1, с. 38 – 40.
5. Григорьев С.Н., Гречишников В.А., Маслов А.Р., Схиртладзе А.Г. Современные инструментальные материалы. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2011, 104 с.
6. Grigor'ev S.N., Kuzin V.V. Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working. Glass and Ceramics, 2011, v. 68, no. 7 – 8, p. 253 – 257.
7. Kuzin V.V. Technology for machining high-refractory ceramic-parts based on silicon nitride. Refractories and Industrial Ceramics, 2006, v. 47, no. 4, p. 204 – 208.
8. Kuzin V.V. Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools. Refractories and Industrial Ceramics, 2011, v. 51, no. 6, p. 421 – 426.
9. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. Precision Machining Vi. Ed. M.N. Morgan et al. Key Engineering Materials, 2012, v. 496, p. 67 – 74.
10. Uhlmann E., Huhns T., Richarz S., Reimers W., Grigoriev S. Development and application of coated ceramic cutting tools. Industrial Ceramics, 2009, v. 29, no. 2, p. 113 – 118.
11. Volosova M.A., Kuzin V.V. Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics. Metal

- Science and Heat Treatment, 2012, v. 54, no. 1 – 2, p. 41 – 46.
12. Kuzin V.V. A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process. Precision Machining Vi. Ed. M.N. Morgan et al. Key Engineering Materials, 2012, p. 127 – 131.
13. Sobol O.V., Andreev A.A., Grigoriev S.N., Volosova M.A., Gorban V.F. Vacuum-arc multilayer nanostructured TiN/Ti coatings: structure, stress state, properties. Metal Science and Heat Treatment, 2012, v. 54, no. 1 – 2, p. 28 – 33.
14. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings. Procedia CIRP: Fifth Cirp Conference on High Performance Cutting 2012, 2012, v. 1, p. 301 – 306.
15. Волосова М.А. Технологические принципы нанесения износостойких вакуумно-плазменных покрытий на режущий инструмент из керамики. Справочник. Инженерный журнал с приложением, 2005, № 8, с. 46 – 50.
16. Волосова М.А., Григорьев С.Н. Режущие пластины из керамики: влияние абразивной обработки и покрытий на их эксплуатационные показатели. Вестник МГТУ Станкин, 2011, № 2, с. 68 – 74.
17. Волосова М.А. Вакуумно-плазменные технологии: получение наноструктурных покрытий триботехнического и инструментального назначения. Вестник МГТУ Станкин, 2010, № 4, с. 66 – 73.
18. Волосова М.А., Туманов А.А. Систематизация методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущего инструмента и алгоритм их выбора. Вестник МГТУ Станкин, 2011, № 3, с. 78 – 83.
19. Sobol' O.V., Andreev A.A., Grigoriev S.N., Gorban' V.F., Volosova M.A., Aleshin S.V., Stolbovoy V.A. Physical characteristics, structure and stress state of vacuum-arc tin coating, deposition on the substrate when applying high-voltage pulse during the deposition. Problems of Atomic Science and Technology, 2011, p. 174.
20. Прядко Л.Ф., Ристич М.М. Конфигурационная модель вещества и ее роль в теоретическом материаловедении. Порошковая металлургия, 2008, №1 – 2, с. 29 – 36.
21. Metel A.S., Grigoriev S.N., Melnik Y.A., Prudnikov V.V. Glow discharge with electrostatic confinement of electrons in a chamber bombarded by fast electrons. Plasma Physics Reports, 2011, v. 37, no. 7, p. 628 – 637.

References

1. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Suslov D.N., Abramov A.P. Vibroacoustic. Diagnostics of spindle bearings in high-speed machine tools. Russian engineering research. 2010, vol. 30, no. 9, pp. 944 – 947.
2. Grigoryev S.N., Volosova M.A., Borovsky V.G. Povysheniye rabotosposobnosti keramicheskogo instrumenta pri obrabotke zakalennykh staley [Improving fitness of working ceramics tools under processing of hardened steels]. STIN stanki, instrument — Machine, tool. 2005, no. 9, pp. 14 – 19.

3. Maslov A.R. Diagnostirovaniye i kontrol protsessa rezaniya po predelnomu sostoyaniyu kachestva obrabotannoy poverkhnosti [Diagnosis and control of cutting process by limited state of surface quality]. *Kontrol. Diagnostika — Control. Diagnostics*. 2011, no. 9, pp. 49 – 51.
4. Grigoryev S.N., Maslov A.R., Zavgorodny V.I. Obespecheniye zadannogo kachestva detaley pri vysokoskorostnoy obrabotke [Ensure the specified quality of parts under high-speed treatment]. *Vestnik MGTU Stankin — Herald of Stankin Univ.*, 2010, no. 1, pp. 38 – 40.
5. Grigoryev S.N., Grechishnikov V.A., Maslov A.R., Skhirtladze A.G. Sovremennyye instrumentalnye materialy [Modern tool materials]. Moscow, 2011, Stankin Univ. Publ., 104 p.
6. Grigor'ev S.N., Kuzin V.V. Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working. *Glass and Ceramics*. 2011, vol. 68, no. 7 – 8, pp. 253 – 257.
7. Kuzin V.V. Technology for machining high-refractory ceramic-parts based on silicon nitride. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2006, vol. 47, no. 4, pp. 204 – 208.
8. Kuzin V.V. Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011, vol. 51, no. 6, pp. 421 – 426.
9. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. *Precision Machining*. Morgan M. N. at all. 2012, pp. 67 – 74.
10. Uhlmann E., Huhns T., Richarz S., Reimers W., Grigoriev S. Development and application of coated ceramic cutting tools. *Industrial Ceramics*. 2009, vol. 29, no. 2, pp. 113 – 118.
11. Volosova M.A., Kuzin V.V. Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics. *Metal science and heat treatment*. 2012, vol. 54, no. 1 – 2, pp. 41 – 46.
12. Kuzin V.V. A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process. *Key engineering materials*. 2012, vol. 496, pp. 127 – 131.
13. Sobol O.V., Andreev A.A., Grigoriev S.N., Volosova M.A., Gorban V.F. Vacuum-arc multilayer nanostructured TiN/Ti coatings: structure, stress state, properties. *Metal science and heat treatment*. 2012, vol. 54, no. 1 – 2, pp. 28 – 33.
14. Grigoriev S.N., Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings. *Procedia CIRP: Fifth Cirp Conference on High Performance Cutting 2012*. 2012, vol. 1, pp. 301 – 306.
15. Volosova M.A. Tekhnologicheskiye printsipy naneseniya iznosostoykikh vakuumno-plazmennyykh pokryty na rezhushchy instrument iz keramiki [Technological principles of wear-resistant vacuum-plasma coatings deposition on cutting tools made from ceramics]. *Spravochnik. Inzhenerny zhurnal – Handbook. An engineering journal*. 2005, no. 8, pp. 46 – 50.
16. Volosova M.A., Grigoryev S.N. Rezhushchiye plastiny iz keramiki: vliyaniye abrazivnoy obrabotki i pokryty na ikh ekspluatatsionnye pokazateli [Cutting plates made from ceramics: effect of abrasive treatment and coatings on their operational performance]. *Vestnik MGTU Stankin — Herald of Stankin Univ.*, 2011, no. 2, pp. 68 – 74.
17. Volosova M.A. Vakuumno-plazmennyye tekhnologii: polucheniye nanostrukturnykh pokryty tribotekhnicheskogo i instrumentalnogo naznacheniya [Vacuum plasma technology: preparation of nanostructured coatings of tribological and instrumental appointment]. *Vestnik MGTU Stankin — Herald of Stankin Univ.*, 2010, no. 4, pp. 66 – 73.
18. Volosova M.A., Tumanov A.A. Sistematizatsiya metodov naneseniya pokryty i modifikatsii rabochikh poverkhnostey rezhushchego instrumenta i algoritm ikh vybora [Systematization of coating deposition methods and modifications of cutting tool working surfaces and their selection algorithm]. *Vestnik MGTU Stankin — Herald of Stankin Univ.*, 2011, no. 3, pp. 78 – 83.
19. Sobol O.V., Andreev A.A., Grigoriev S.N., Gorban V.F., Volosova M.A., Aleshin S.V., Stolbovoy V.A. Physical characteristics, structure and stress state of vacuum-arc TiN coating, deposition on the substrate when applying high-voltage pulse during the deposition. *Problems of atomic science and technology*. 2011, p. 174.
20. Pryadko L.F., Ristich M.M. Konfiguratsionnaya model veshchestva i yeye rol v teoreticheskom materialovedenii [Configuration model of matter and its role in theoretical materials science]. *Poroshkova metallurgiya — Powder metallurgy*, 2008, no. 1 – 2, pp. 29 – 36.
21. Metel A.S., Grigoriev S.N., Melnik Y.A., Prudnikov V.V. Glow discharge with electrostatic confinement of electrons in a chamber bombarded by fast electrons. *Plasma physics reports*. 2011, vol. 37, no. 7, pp. 628 – 637.

Статья поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Волосова Марина Александровна — ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», кандидат технических наук, доцент, специалист в области вакуумно-плазменных технологий нанесения покрытий. E-mail: m.volosova@stankin.ru.

Technological principles of manufacturing of ceramic cutting tool inserts of increased strength for highly effective processing of tempered bearing steels

M. A. Volosova

New technological principles of designing of vacuum-plasma coatings on cutting ceramic on the basis of $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ and Si_3N_4 and the demands made to them are considered. There are investigated coatings: (Zr, Hf, Cr) N; (Ti, Cr) N; ZrN. Each of these coatings has specific features which can significantly improve working capacity of ceramics in various operation conditions. Technological process and the equipment for deposition of coating on ceramic samples and cutting plates are developed. The investigated coatings deposited according to the developed technological principles, show ability to increase considerably beam strength of the samples from oxide-carbide and nitride ceramics. Results of tribological and strength tests are given. Possibility to replace grinding operation of details of bearings from tempered steels like ShH15SG type (62 – 65 HRC) on turning by the cutting tools equipped with plates from $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ ceramics with a coating (Zr, Hf, Cr)N is shown.

Keywords: nitride ceramic, oxide-carbide ceramic, bearing steels, wear resistance, nitride coating.

Volosova Marina — Moscow State University of Technology “STANKIN” (Moscow, Russian Federation), PhD. E-mail: m.volosova@stankin.ru.