

УДК 621.793.7

А.И. Долматов, С.В. Сергеев

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”

АНИЗОТРОПНЫЕ ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Работа посвящена вопросу совершенствования технологии и оборудования, используемого для нанесения детонационно-газовых покрытий. Рассмотрены перспективы повышения эксплуатационных характеристик детонационных покрытий. Дано обоснование применения принципиально нового типа покрытий – анизотропных детонационных покрытий с повышенными характеристиками. Выполнен анализ требований к оборудованию, обеспечивающему нанесение покрытий нового типа. Приведен опыт создания детонационной установки, предназначенной для нанесения анизотропных покрытий.

детонационно-газовые покрытия, анизотропные покрытия

Непрерывно возрастающие требования к надежности, качеству и ресурсу изделий, вызванные современными экономическими условиями, в большой степени определяют актуальность внедрения в промышленность новых технологий, направленных на повышение конкурентоспособности продукции. Среди технологий, позволяющих в различных отраслях машиностроения обеспечить повышенные эксплуатационные характеристики изделий, важное место занимает технологии нанесения специальных функциональных покрытий на поверхности деталей.

К таким технологиям относится технология детонационного нанесения покрытий (ДНП), которая позволяет добиваться таких свойств покрытий, которые недостижимы другими методами. Достоинствами ДНП являются рекордно высокая адгезионная прочность покрытий, минимальная для газотермических покрытий пористость, широкий спектр материалов наносимых покрытий (от пластмасс до керамики), а также значительные величины толщины наносимых покрытий.

Однако данному методу присущ ряд недостатков, которые на сегодняшний день полностью не устранены [1, 2]. Для того, чтобы оценить меру важности недостатков технологии и их влияние на характеристики

покрытий является необходимым анализ современных возможностей метода ДНП на фоне его предельных возможностей.

Определяющей и наиболее важной характеристикой покрытия является его прочность [2]. Влияние прочности покрытия на усталостные характеристики, ресурс изделия и его надежность очевидно.

Ряд исследований в области высокоскоростного соударения тел дает возможность утверждать тот факт, что при определенной скорости соударения (критической скорости) происходит разрушение материала мишени на атомном уровне. Явление объясняется смещением электронных оболочек атомов при высоких скоростях удара, что приводит к значительному снижению энергии связей между атомами. Эффект наиболее существенно проявляется при повышении скорости удара и плотности метаемого тела. Следствием удара на критической скорости является высвобождение энергии межатомных связей, проявляющееся в виде взрывообразного разрушения соударяющихся тел.

Проведенные в лаборатории газотермических покрытий исследования подтвердили факт подобного разрушения метаемых частиц при высокоскоростном соударении. Разрушение частиц происходило на скоростях, соответствующих скорости звука в материале частиц метаемого порошка. Следствием приведенных выше фактов является следующее:

- 1) предельно возможная потенциальная энергия связи между частицами покрытия и подложки достижима на скоростях, не превышающих скорость звука в одном из материалов, участвующем в формировании покрытия;
- 2) на околокритических скоростях соударения возможна имплантация атомов материала частиц в подложку на значительную глубину, однако получение слоя покрытия затруднительно;
- 3) при увеличении скорости частиц до величин, приближающихся к величине скорости звука в одном из материалов, участвующем в формировании покрытия, следует ожидать значительного повышения потенциальной энергии связи между частицами покрытия и подложки.

Современные детонационные установки способны обеспечить скорость частиц около 1000 м/с, либо незначительно ее превысить. При этом достигается прочность покрытий порядка 200 мПа. Приближенная оценка ско-

рости звука в металле по зависимости $V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ для сталей составляет около 5000 м/с, т.е. существует потенциальная возможность для увеличения кинетической энергии частиц при ДНП на порядок (рис. 1), что соответствующим образом скажется на прочности покрытия.

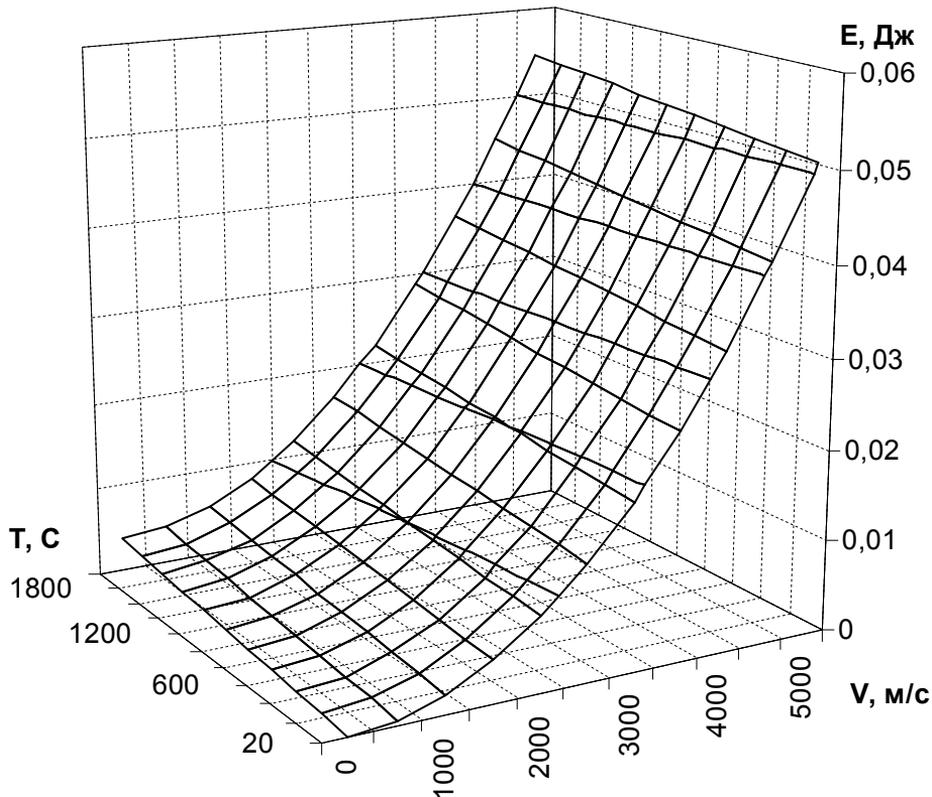


Рис. 1. Зависимость полной энергии частицы стали 45 (100 мкм) от скорости и температуры.

Однако современные применяемые энергоносители и конструкция детонационно-газовых установок (ДГУ) не позволяют обеспечить скорость частиц более 1500 м/с, поскольку энергетические характеристики газовых детонирующих смесей не позволят достичь более высоких скоростей детонации, следовательно, и скорости продуктов детонации, ускоряющих и нагревающих частицы.

Существуют несколько путей увеличения скорости частиц при ДНП.

1. Ускорение предварительно разогнанных продуктами детонации частиц в стволе установки направленным магнитным полем (рельсотроном). Этот метод пригоден только для электропроводящих материалов покрытия и поэтому не универсален.

2. Ускорение продуктов детонации за счет использования стволов особой формы (формирование пересжатой детонации).

Ускорение детонационной волны за счет подвода электрического заряда в тонкий проводящий слой детонационной волны, являющийся низкотемпературной плазмой, в которой значительная часть атомов ионизирована.

Наиболее эффективным представляется совмещение в ДГУ второго и третьего методов, т.е. формирование пересжатой детонационной волны в стволе особой формы, в которую подается электрический разряд, ускоряющий сам фронт детонационной волны. По проведенным расчетам использование комбинации ствола особой формы и подвода дополнительной энергии в детонационную волну способен обеспечить повышение скорости продуктов детонации в 5 – 6 раз по сравнению с традиционно используемыми энергоносителями и стволами цилиндрической формы. Тем самым обеспечивается повышение энергии частиц и прочности сцепления их с подложкой (деталью) в 8 – 10 раз, в большинстве случаев достигая уровня прочности материала самой детали [2, 3].

Вторым, общим для всех газотермических методов недостатком, является значительный уровень остаточных напряжений в покрытии. В отдельных случаях при определенных условиях потенциальная энергия остаточных напряжений достигает 100% уровня потенциальной энергии связей в покрытии или между покрытием и подложкой. При этом происходит либо растрескивание покрытия под воздействием растягивающих напряжений, либо отслаивание под воздействием сжимающих напряжений. Такое покрытие неспособно сопротивляться внешним воздействиям и разрушается под действием внутренних силовых факторов [2].

Поэтому вполне очевидна важность снижения интенсивности поля потенциальной энергии остаточных напряжений в приповерхностной зоне детали и в самом покрытии. В этой связи остаточные напряжения следует

рассматривать как резерв прочностных характеристик детали с покрытием.

Задача может быть решена и в настоящее время частично решается путем подбора технологических режимов и условий формирования покрытия, обеспечивающих минимум остаточных напряжений, особенно в опасных зонах покрытия, каковыми являются границы единичных пятен покрытия, и особенно граница покрытия с поверхностью детали. В большинстве случаев разрушение покрытий происходит именно по этой границе.

Подобные мероприятия способствуют значительному снижению уровня остаточных напряжений и повышению прочности сцепления покрытия с подложкой, но все же не позволяют решить эту проблему полностью.

Причина заключается в том, что, как правило, материалы детали и покрытия отличаются по своему составу, структуре и физико-механическим свойствам. При формировании покрытия создаются связи между атомами частиц и подложки, которые обеспечивают прочность покрытий. Однако при остывании частиц, формирующих покрытие, появляются остаточные напряжения, уровень которых на границе покрытия с подложкой в большинстве случаев определяет адгезионную прочность покрытия. Кроме этого, помимо термических остаточных напряжений, часто формируются фазовые остаточные напряжения, вызванные изменением кристаллической структуры материала покрытия и подложки [2].

Единственно возможный путь решения проблемы больших градиентов уровня остаточных напряжений состоит в уменьшении градиентов физико-механических свойств в области контакта материалов покрытия и подложки. Поскольку с одной стороны снижение градиентов свойств возможно исключительно за счет варьирования составом покрытия, а с другой стороны – покрытие чаще всего отличается по составу от детали, очевидно, что нанесенное покрытие должно обладать анизотропией физико-механических свойств, фазового и химического составов. В том случае, когда контактируют два однородных материала (подложка и покрытие), отличие их свойств минимально, и также минимален достижимый уровень остаточных напряжений. Более того, само понятие «границы контакта» (рис.2, а) между покрытием и подложкой теряет физический смысл в том

случае, когда прочность нанесенного покрытия достигает уровня прочности однородного с покрытием материала детали (рис.2, б).

Из рис. 2 видно, что при нанесении анизотропного покрытия граница контакта двух различных материалов исчезает; материал, находящийся по разные стороны границы в непосредственной близости к ней, идентичен по химическому составу, и может отличаться лишь пористостью, зернистостью и фазовым составом, т. е. теми свойствами, которыми достаточно легко варьировать за счет выбора фракции порошка и технологических режимов нанесения покрытия.

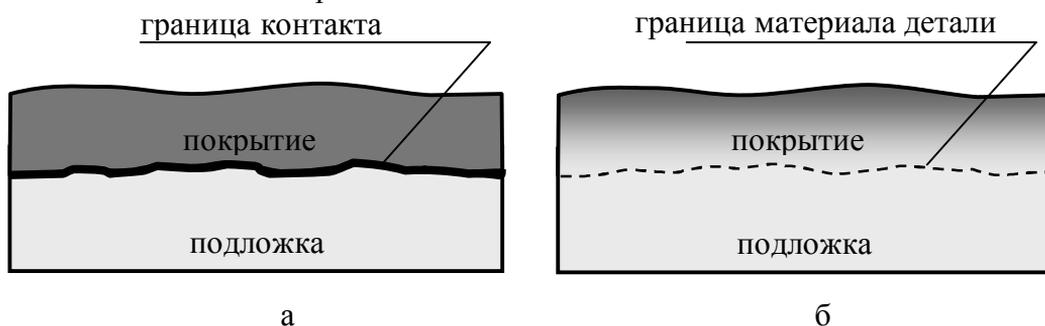


Рис. 2. Структура традиционного однослойного покрытия (а)
и анизотропного покрытия (б)

При формировании покрытия по мере наращивания слоя происходит изменение химического состава покрытия, следовательно, и его физико-механических свойств. Тем самым достигаются требуемые заданные характеристики поверхностного (функционального) слоя покрытия и одновременно с этим обеспечиваются наиболее благоприятные условия для повышения прочностных характеристик покрытия за счет оптимального управляемого распределения и минимизации уровня остаточных напряжений.

Следует заметить, что при нанесении покрытий по вышеуказанной схеме понятие адгезионной прочности теряет смысл, поскольку отсутствует граница контакта покрытия и подложки. Более уместно в данном случае говорить о прочностных характеристиках анизотропного материала и об их распределении по глубине покрытия и детали.

Таким образом, детонационные покрытия, обладающие анизотропией свойств, имеют значительные преимущества по сравнению с покрытиями,

наносимыми по традиционной схеме, благодаря тому, что:

- 1) уровень потенциальной энергии остаточных напряжений в покрытии и приповерхностном слое детали минимален;
- 2) концентратор напряжений и потенциально опасная в плане разрушения область – граница контакта покрытия и полочки – полностью отсутствует или значительно размыта по толщине;
- 3) контакт двух одинаковых материалов – частиц и подложки – обеспечивает наиболее благоприятные условия для формирования межатомных связей, определяющих прочность покрытия в целом;
- 4) возможность варьировать законом изменения состава покрытия по толщине обеспечивает широкие возможности управления напряженным состоянием покрытия.

Опираясь на изложенные выше выводы о возможностях и перспективах метода ДНП, а также учитывая перспективы применения и преимущества анизотропных детонационных покрытий, можно сформулировать следующие требования к детонационной установке, обеспечивающей нанесение подобных покрытий.

1. ДГУ должна быть оснащена стволом специальной формы, обеспечивающим эффект пересжатой детонации [2].

2. Для обеспечения повышенного уровня прочности покрытий в целом необходимо обеспечить возможность дополнительного подвода энергии (электрического разряда) в детонационную волну, что вместе с п.1 даст дополнительные возможности регулирования скорости и температуры частиц наносимого покрытия.

3. Для обеспечения оптимальных условий формирования покрытия в ДГУ должна быть реализована возможность оперативного (программного) управления глубиной загрузки порошка в ствол и длиной ствола в процессе нанесения покрытия.

4. ДГУ должна быть оснащена двумя или более устройствами подачи порошка в ствол установки, управляемыми программно, и предназначенными для различных компонентов покрытия.

Примером такой установки может служить ДГУ «Факел», разработанная в лаборатории газотермических покрытий НАКУ «ХАИ». Она изначально комплектуется системой программного управления, которая по-

зволяет ей работать в трех режимах: ручном, автоматическом и по заданной программе обработки. Система подачи рабочих газов, газораспределительный механизм, система подачи порошков в ствол, система охлаждения управляются дистанционно по программе в режиме реального времени. В основу установки положен комбинированный модульный ствол с настраиваемой геометрией. Установка впервые оснащена системой регулирования технологических параметров – длины ствола и глубины загрузки порошка, также управляемых программно. Система управления поддерживает до трех дозирующих устройств, работающих совместно. В состав установки могут входить приборы активного контроля параметров процесса – скорости и температуры частиц, а также толщины покрытия. Все управляемые и контролируемые параметры, данные диагностики, а также управляющая программа отображаются на дисплее, входящем в состав системы управления.

Такая конструкция установки обеспечивает не только абсолютную гибкость и универсальность при нанесении покрытий традиционным образом, но и позволяет осуществлять нанесение покрытий с градиентом физико-механических свойств и химического состава, принципиально новый тип детонационных покрытий – *анизотропные покрытия*.

Литература

1. Богуслаев В.А., Долматов А.И., Сергеев С.В. Перспективы развития метода детонационного нанесения покрытий // Технологические системы. – 2001. – С. 5 – 9.
2. Сергеев С.В. Исследование, разработка и внедрение высокопроизводительного оборудования и технологии для нанесения детонационно-газовых покрытий на детали авиационных двигателей и технологическую оснастку: Дисс. ... канд. техн. наук. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2001. – 214 с.
3. Долматов А.И., Сергеев С.В. Универсальный детонационный комплекс для нанесения защитных покрытий // Труды Междунар. научно-техн. конф. "Инженерия поверхности и реновация изделий". – Ялта. – 2002. – С. 32 – 39.

Поступила в редакцию 6.04.2005