

УДК 621. 793. 71

ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Харламов Ю.А., Полонский Л.Г.

THERMAL SPRAYING. CURRENT STATUS AND FURTHER DEVELOPMENT

Kharlamov Yu.A., Polonsky L.G.

В статье показано, что одним из необходимых условий повышения конкурентоспособности машиностроения является использование методов и средств инженерии поверхности. особый интерес представляют методы газотермического напыления. Рассмотрены основные этапы истории развития этих методов. Интенсивное развитие теории и практики газотермического напыления связано с прогрессом в наукоемких отраслях промышленности. Тогда же наметилась тенденция к проведению наряду с прикладными фундаментальных исследований по газотермическому напылению. Рассмотрены современные газотермические покрытия, их получение и области применения. Кратко рассмотрены основные методы напыления.

Ключевые слова: газотермическое напыление, исследования, история техники, поверхность, покрытия.

1. Введение. Необходимым условием обеспечения конкурентоспособности продукции машиностроения является широкое внедрение технологий обработки поверхности для получения поверхностей деталей машин, стойких к износу, коррозии и старению, придания и сохранения ими трибологических, электрических, оптических, термических и иных функциональных свойств в течение длительного периода эксплуатации. Технологии поверхностной обработки и осаждения покрытий являются составляющими крупного научно-технического направления «инженерия поверхности» [1 – 5]. Технологии покрытий позволяют осаждавать поверхностные слои из материалов со свойствами, совершенно отличающимися от основного материала детали. Различают сухие и «мокрые» процессы осаждения покрытий. С экологической точки зрения предпочтительны сухие методы получения покрытий. Важным параметром методов получения покрытий является диапазон толщин осаждаемых покрытий. Покрытия с толщиной порядка нескольких микрометров называют тонкими, в то время как покрытия с толщиной выше нескольких

десятков микрометров и ниже нескольких миллиметров – толстыми.

Сухие методы осаждения тонких покрытий [1, 3 – 11] основаны на конденсации газовой или паровой фазы, включая химическое осаждение (CVD), физическое осаждение (PVD), или пульсирующее лазерное осаждение (PLD). Получение металлических покрытий PVD и CVD методами появилось в конце XIX века, тогда как технологии получения толстых металлических покрытий появились в начале XX века, в т.ч. методами наплавки и газотермического напыления покрытий (ГТНП).

ГТНП объединяет группу родственных процессов нанесения покрытий из различных материалов с помощью потоков газов, обычно высокотемпературных. Газотермические покрытия (ГТП) улучшают функциональные свойства поверхностей изделий (защита от износа, коррозии, агрессивных и высокотемпературных сред, для ремонта и восстановления деталей). Универсальность технологии ГТНП позволяет использовать ее практически для любых деталей и компонентов изделий машиностроения.

На начальной стадии развития методов ГТНП преимущественно использовалась техника тигельного, газопламенного и электродугового напыления и ее практическое применение достаточно полно рассмотрено в литературе [12 – 14]. Однако в настоящее время широкое промышленное применение получили ряд новых методов ГТНП: плазменное, высокоскоростное газопламенное, холодное газодинамическое и др., существенно расширяются области их применения.

Целью данной статьи является выявление и анализ общих тенденций развития технологии газотермического напыления и ее современного состояния, а также перспектив дальнейшего развития и применения.

2. История создания техники газотермического напыления. Изобретателем, впервые реализовавшим методы газотермического напыления покрытий (ГТНП), является д-р М. Шооп (Max Ulrich Schoop, Цюрих, Швейцария), который на стыке 19-го и 20-го веков с коллегами работал над разработкой оборудования, способного расплавлять и перемещать металлы в виде капель расплава в направлении покрываемой поверхности для осаждения покрытий. На начальной стадии осаждали металлы с низкой температурой плавления (например, олово и свинец) и процесс получил наименование «металлизации» [14, 15]. Первый металлизационный аппарат был изготовлен в 1910 г. В нем расплавленный металл с низкой температурой плавления (свинец, олово и др.) расплавлялся в тигле и подавался в струю горячего воздуха, в которой расплылся на мелкие частицы и переносился на поверхность детали для образования покрытия.

Через несколько лет, получив ряд патентов, д-р М. Шооп с коллегами создали первое термическое распылительное устройство для напыления металлическими проволоками. Эта система была основана на плавлении металлической проволоки в пламени, генерируемом при сгорании смеси горючего с кислородом. Затем расплавленный металл расплылся струей сжатого газа, который переносил металлические капли на поверхность изделия для формирования покрытия. Эта технология в настоящее время известна как газопламенное напыление и явилась основой для разработки более совершенной технологии как, например, высокоскоростное газопламенное напыление (ВГПН) в конце 1970-х годов и создать группу достаточно распространенных методов газотермического напыления, основанную на процессах горения.

Понимая необходимость расширения номенклатуры напыляемых металлов для антикоррозионной защиты, группа д-ра М. Шоопа впервые применила электрическую дугу в качестве источника энергии для металлизации. Электрическая дуга позволила напылять металлы и сплавы с более высокой температурой плавления (например, сталь, цинк и нержавеющей сталь), и инициировала разработку второй группы методов ГТНП, основанной на использовании электрической энергии.

Роль д-ра М. Шоопа в развитии ГТНП хорошо описана в работах Berndt [16] и Knight [17], где проанализированы его основные патенты. В этих патентах, а также в некоторых обзорных статьях M.U. Schoop предвосхитил многие из будущих разработок. В ранних патентах он описал распыление жидких металлов струей сжатого воздуха или инертного газа [18], использование металлических или керамических порошков, нагреваемых пламенем [19], использование проволок и прутков различных материалов в

патенте Morf [20], описал процесс электродугового напыления двумя проволоками [21]. Следует упомянуть, что он признавал важную роль скорости капель и температуры осаждаемого покрытия, таким образом прогнозируя создание высокоскоростных методов напыления (например, высокоскоростного газопламенного и холодного): «При давлении газа 20 атм, например, получают покрытия, плотность и твердость которых выше нормальных значений; при давлении газа только 5 атм плотность и твердость ниже нормальных значений» [18].

На начальной стадии развития ГТНП потребность в покрытиях была незначительной. До 1950-х годов в основном применяли газопламенное напыление. В 1917 г. М. Шоопом был создан проволочный дуговой аппарат, а в 1921 г. – порошковый металлизационный аппарат. Таким образом, фактическая история создания и развития методов ГТНП начинается с первого десятилетия XX века.

После начального периода ГТНП в первой половине двадцатого века с разработкой большого количества изобретений по методам металлизации с использованием процессов сгорания или на основе электричества (дуга), большой прогресс произошел после второй мировой войны в связи с потребностями и развитием аэрокосмической отрасли. В этот период потребовалась техника ГТНП, способная генерировать газовые потоки с более высокой температурой для получения покрытий из тугоплавких материалов (керамики и тугоплавких металлов). Это был период, когда технология ГТНП получила наибольшее развитие как в отношении оборудования, так и материалов, как исходных, так и вспомогательных.

Методы ГТНП, например, газопламенное напыление керамическими прутками, детонационное напыление и плазменное напыление были разработаны в 1940–1950-е годы в связи с потребностью получать надежные прочные покрытия деталей, эксплуатируемых при высоких температурах в двигателях. Эти разработки стали возможными в значительной мере благодаря прогрессу в развитии исходных материалов покрытий.

В середине 1950-х годов был разработан первый плазменный пистолет фирмой Thermal Dynamics Corporation, а затем последовали разработки фирм Metco и Plasmadyne, и эти пистолеты явились базой для создания многих новых конструкций, в т.ч. используемых в настоящее время.

Третья группа методов ГТНП разработана в 1980-е годы и относится к методам напыления материалов в твердой фазе. Здесь исходный материал переносится на поверхность изделия для получения покрытия высокоскоростными потоками газа. В напылительных устройствах процессы горения и электрическая энергия могут использоваться для вспомогательных целей,

например, для подогрева газа, порошка, но не для генерирования напылительной струи. Представителем этой третьей группы является так называемое «холодное газодинамическое напыление». Этот метод в последние десятилетия интенсивно изучается, в том числе и в отношении процессов и явлений, определяющих механизм формирования покрытий.

Ряд традиционных методов ГТНП, использующих горение, были адаптированы к принципам холодного напыления и в последние годы появились низкотемпературные методы ГТНП, (например, теплое напыление и высокоскоростное воздушно-топливное). Однако только холодное газодинамическое напыление можно рассматривать как технологию напыления твердыми частицами (без расплавления исходного материала в напылительной струе), поскольку другие методы используют высокотемпературные продукты сгорания. Целью холодного напыления является, главным образом, нанесение металлических покрытий без изменения микроструктуры исходного материала и, таким образом, сохранение низкой степени окисления и первоначальной структуры и свойств исходного материала.

В настоящее время известно много методов ГТНП, но к основным, широко применяемым в промышленности, относятся [5, 17, 22]: высокоскоростное кислородно-топливное (ВГКН), детонационное (ДН), плазменное на открытом воздухе (ПН), плазменное в вакууме (ВПН), плазменное при низком давлении (ПННД), холодное газодинамическое (ХН), высокоскоростное воздушно-топливное (ВГВН) и теплое напыление (ТН).

3. Внедрение методов ГТНП в наукоемкие отрасли промышленности. После начального периода истории ГТНП, относящегося к первой половине 20-го века и связанного с патентованием многих изобретений по технике металлизации с использованием процессов горения или электрической дуги, существенное развитие ГТНП получило после второй мировой войны в связи с резким и поступательным развитием аэрокосмической промышленности. В этот период возросла потребность в технике ГТНП, способной генерировать пламена и газовые потоки с более высокой температурой для нанесения покрытий из тугоплавких материалов (керамики и тугоплавких металлов). Это был период, когда техника ГТНП получила наибольшее развитие как в отношении оборудования, так и материалов (как материалов покрытий, так и вспомогательных). Такие методы ГТНП, как газопламенное напыление керамическими прутками, детонационное и плазменное появились в 1940-е – 1950-е годы для удовлетворения запросов промышленности на получение надежных прочных покрытий для

высокотемпературной защиты деталей в двигателях. Эти достижения стали возможными в большей степени благодаря прогрессу в исходных материалах покрытий (порошков и проволоки).

Продажи оборудования и исходных материалов ГТНП и доля отраслей промышленности, использующих технику ГТНП, увеличивались экспоненциально после 1950-х годов параллельно с разработкой новых видов оборудования, материалов и технологий и проведением исследований в индустриально развитых странах мира. К тому же, создание и использование диагностических средств (например, наблюдение за отдельными частицами в полете), оптимизация параметров напыления, моделирование, нанотехнологии и вопросы экологии внесли существенный вклад в развитие ГТНП.

В настоящее время основными наукоемкими отраслями промышленности, широко применяющими технологии ГТНП, являются такие как аэрокосмическая, турбиностроение, автомобильная, биомедицинская, нефтегазовая, судостроение, обрабатывающая, текстильная, металлообрабатывающая и др. Это связано с возможностями методов ГТНП получать покрытия для защиты от износа, для восстановления размеров и ремонта, теплоизоляции, повышения стойкости к коррозии и окислению, обеспечения самосмазываемости, биосовместимости и пр. Новые разработки как исходных материалов, так и методов и технологий, еще больше расширяют возможности ГТНП для новых применений и освоения новых рынков.

4. Развитие научных исследований в сфере ГТНП. Широкое промышленное применение ГТНП получило только в 1960-е. На это время приходится переход к завершению начального этапа развития методов ГТНП, на котором разработка технологических процессов осуществлялась эмпирическим путем. Почти до 1980-х разработка технологии ГТНП [15, 23] осуществлялась методом проб и ошибок, обычно в следующей последовательности: 1) варьирование операционных параметров напыления для порошка с частицами данной морфологии и дисперсионного состава для различных методов ГТНП; 2) определение свойств полученных покрытий и оценка их эксплуатационных свойств при использовании в специфических условиях. Эта процедура повторяется до получения требуемых параметров покрытий и фиксации соответствующего набора операционных параметров ГТНП [24]. Этот подход позволял разрабатывать эффективные покрытия и получать достаточно надежные с высокой повторяемостью при изготовлении изделий с покрытиями, а также контролировать макроскопические параметры процесса напыления, исходные материалы (морфологию частиц и

дисперсионный состав), и согласовывать эти параметры между различными рабочими местами и участками. Однако существенными недостатками такого подхода являются: высокая трудоемкость, большие затраты ресурсов и длительность периода разработки.

В конце 1980-х и в 1990-х г.г. появилось два новых подхода:

1. Разработка и использование коммерчески доступных компьютеризованных систем напыления, что позволило непрерывно отслеживать в реальном времени основные макроскопические параметры процесса на рабочем месте напыления, такие как напряжение дуги, расход транспортирующего порошок газа для используемого инжектора в заданной позиции, температуру и расход охлаждающей воды, определение места утечки воды и пр. Компьютеры на панели управления также обеспечивают мониторинг старения системы напыления, например, эрозию электродов плазмотрона, вызывающей снижение напряжения дуги, которое может автоматически корректироваться путем увеличения расхода плазмообразующего газа для подъема напряжения обратно до начального установленного значения.

2. Развитие фундаментальных представлений о теплофизических и динамических процессах при ГТНП и совершенствование техники лабораторных экспериментов и методов измерения параметров процесса ГТНП и его отдельных стадий [27 – 40]:

- генерация напылительных высоко-температурных и – скоростных газовых струй и определение их параметров;
- плавление и распыление исходных материалов компактной формы, ускорение и перенос образующихся частиц;
- ввод частиц порошка в напылительные газовые струи, их ускорение и нагрев;
- распределение температуры и скорости напыляемых частиц в газовых струях;
- распределение траекторий частиц в напылительных струях и влияние расхода транспортирующего газа на эти траектории;
- распределение скорости и температуры частиц при ударе с подложкой;
- взаимодействие частиц порошка с поверхностью детали (деформирование частиц и подложки, схватывание взаимодействующих материалов, формирование структуры покрытия);
- теплообмен и напряженно-деформированное состояние в системе «покрытие-подложка».

Обобщению результатов исследований в области теории и практики методов ГТНП во многом способствовало регулярное проведение Международных и национальных конференций по газотермическому напылению [41 – 44 и др.], а также организация и издание специализированного

международного журнала по технологии газотермического напыления «Journal of Thermal Spray Technology» с 1992 г. Однако много результатов исследований по ГТНП публикуется в других международных и отечественных научно-технических журналах, например, «Автоматическая сварка» (ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины), «Порошковая металлургия» (ИПМ НАН Украины), «Физико-химическая механика материалов» (Львов, НАН Украины), «Физика и химия обработки материалов», «Сварочное производство», «Упрочняющие технологии и покрытия», «Surface & Coatings Technology», «Applied Surface Science», «Science and Technology of Advanced Materials» и многих других.

Современные системы автоматизированного проектирования позволяют при минимальных затратах времени и материальных средств изучать и исследовать процессы ГТНП. Поэтому разработка математических и программных средств для компьютерного моделирования ГТНП получила широкое распространение. Программные средства разработаны для комплексного моделирования процессов плазменного, высокоскоростного газопламенного, электродугового, детонационного и др. методов напыления [45 – 47]. Использование экспериментальных измерений и расчетов по моделям обеспечивает постепенный переход от метода проб и ошибок к научному подходу, постепенно трансформируя воспроизведение и управление реальными процессами ГТНП от ремесла к научно обоснованным решениям.

В течение начального периода много усилий уделялось стандартизации средств для определения свойств покрытий и контроля эксплуатационных свойств покрытий в заданных условиях.

В конце 1990-х были разработаны менее совершенные, но достаточно простые и надежные датчики, работоспособные в жестких условиях процессов ГТНП [48, 49]. Интенсивные исследования взаимосвязей между параметрами частиц в полете и свойствами покрытий [49 – 52] привело к более глубокому пониманию механизмов формирования покрытий и соответствующего улучшению технологической воспроизводимости и надежности покрытий [52]. Однако выявление связей операционных параметров ГТНП со свойствами покрытий еще далеко от завершения [52].

В 1990-е дальнейшее развитие ГТНП стимулировало разработку сенсоров для лабораторных исследований, которые стали основой для разработки датчиков, менее сложных, проще и надежнее, способные работать в жестких условиях кабин для напыления [23, 53]. Параллельно были разработаны коммерчески доступные компьютеризованные системы, обеспечивающие непрерывный контроль в реальном времени

макроскопических параметров в процессе напыления в кабинах. Стандартизация средств для контроля качества покрытий, разработка компьютеризированных систем контроля процесса напыления, панелей контроля и датчиков существенно повысило воспроизводимость и надежность ГТП.

5. Современные газотермические покрытия и их получение. На ранней стадии развития технология ГТН использовалась главным образом для ремонта, восстановления, подгонки, защиты поверхностей от коррозии, эрозии и износа [23, 53]. В 1970-е – 1980-е годы благодаря разработке измерениям в промышленных условиях и моделированию в лабораториях было достигнуто лучшее понимание явлений при ГТНП. Параллельно широкое признание технологии ГТНП в промышленных масштабах привело к началу применения покрытий на компонентах с высокой добавленной стоимостью в аэрокосмической, атомной и др. отраслях промышленности. В конце 1980-х и начале 1990-х г.г. стал доступным широкий ряд промышленных процессов модифицирования поверхности. В этот период газотермические покрытия главным образом развивались в авиационной, автомобильной, машиностроении, полиграфической, целлюлозно-бумажной, стекольной, медицинской и др. отраслях, для защиты от коррозии в различных средах. ГТП применяют для решения широкого диапазона различных функциональных задач: трибологические и износостойкие покрытия, включая износостойкие, антифрикционные, самосмазывающиеся и пр., для защиты от коррозии и окисления, высокотемпературные покрытия, формообразование тонкостенных изделий из тугоплавких и других материалов со специальными свойствами, покрытия со специальными электрическими и оптическими свойствами, для экранирования от электромагнитных излучений, электрической изоляции, герметизирующие и уплотнительные, для биомедицинских применений, в производстве сверхпроводящей керамики, компонентов с контролируемым коэффициентом термического расширения, магнитные покрытия, топливные элементы, для замены «мокрых» процессов, например, гальванического хромирования, декоративные покрытия и многие др.

На современном этапе известно большое количество разнообразных процессов и технологий получения как покрытий, так и материалов, доступных на рынке. Методы ГТНП отличаются между собой качественными и количественными показателями свойств газотермических покрытий, диапазоном их толщины и точностью, условиями формирования покрытий, например, температуры поверхности изделия в процессе осаждения, составом и структурой получаемых покрытий.

Универсальность и высокая гибкость методов ГТНП достигается благодаря широкому ряду технологий и оборудования, доступных на рынке, а также проведению непрерывных разработок и исследований, возможности напыления большого разнообразия материалов, в т.ч. композиционных, а также большому разнообразию известных и перспективных областей применения.

Выбор покрытий и процессов ГТН для заданных условий эксплуатации определяется техническими и экономическими требованиями. Выбор и конструирование покрытий часто на практике фактически затрудняется тем, что поверхности детали нуждаются в обеспечении не одного, а нескольких функциональных требований, например, одновременной стойкости к износу и коррозии, электрической или термической изоляции. В таких случаях применяют многофункциональные покрытия. В различных доступных процессах ГТНП в основном дополняют друг друга и не конкурируют между собой и взаимное перекрытие их областей применения не очень широко. Для выбора метода напыления важно знать преимущества и недостатки каждого из методов ГТНП и сделать правильный выбор метода для конкретного применения. В ряде случаев решающее значение приобретают экономические факторы.

Основные виды техники ГТНП, их характеристики, напыляемые материалы, свойства и применение покрытий рассматривалось в работах [15, 22].

5.1. Образование газотермических покрытий. Развитие методов ГТНП непосредственно связано с изучением физико-химических явлений, сопутствующих образованию покрытий, и механизмов, ответственных за формирование их свойств. Процесс образования ГТП заключается в тонком распылении исходного материала (в случае его компактного состояния) на мелкие частицы, нагреве частиц до расплавленного или пластичного состояния и перемещении их до соударения с поверхностью изделия. Нагретые и ускоренные частицы соударяются с поверхностью подложки, расплющиваются и образуют тонкие частицы (сплэты), схватывающиеся с поверхностью детали. Сплэты в итоге охлаждаются и последовательным наращиванием друг на друга образуют покрытие со слоистой структурой. Структура, механические, теплофизические и иные свойства покрытий, прочность сцепления их с основным материалом определяются структурой и свойствами исходного материала покрытия и превращениями в нем в рабочей среде и в процессе соударения частиц с поверхностью детали, в том числе контактного взаимодействия материалов.

Формируемые ГТП, как правило, имеют неомогенную структуру, так как применяемые

исходные материалы (обычно порошок), с распределением частиц по размерам, могут иметь различные фазы с различным химическим составом. Распыляемый исходный материал (проволока) также образует частицы с отличающимися размерами. Это ведет к различию скорости и температуры частиц при соударении с поверхностью детали и, следовательно, к их различному физическому состоянию (расплавленному, полу-расплавленному или твердому). Окончательная структура покрытия может содержать поры вследствие плохого анкерного сцепления частиц различного размера, или насыщения газами, образования сплэтов различного размера, сплэтов с различной фазовой микроструктурой, образованием при ГТНП новых фаз (например, оксидов) и трещины, образующиеся вследствие аккумуляции напряжений. К тому же слоистая структура ГТП приводит к анизотропии свойств в продольном и поперечном направлениях.

Газотермическому напылению подвергаются практически любые материалы, которые не разлагаются при высоких температурах (вблизи температуры плавления). Фактически все виды материалов, полимеры, металлы и керамика (и их комбинации) могут напыляться при правильном выборе техники газотермического напыления и операционных параметров ГТНП. До настоящего времени имеются ограничения по напылению керамик, не имеющих постоянной температуры плавления (например, карбид и нитрид кремния), вследствие их возможности сублимировать или разлагаться в процессе напыления на воздухе. Эти ограничения недавно были обойдены разработкой новой технологии для защиты керамических порошков при ГТНП. Эта технология позволяет ГТН керамик, не имеющих постоянной температуры плавления, путем защиты каждой индивидуальной керамической частицы нанослоем материала, выполняющего роль теплового барьера [53].

5.2. Материалы современных газотермических покрытий. В табл. 1 представлены наиболее типичные материалы, используемые для газотермического напыления и основные области их применения. Выбор надлежащего материала для определенных применений является трудной задачей и требует соответствующих профессиональных знаний и квалификации и знание материалов. Не только химические, механические и физические свойства материалов являются основными факторами, влияющими на работоспособность покрытий, но важны также характеристики исходных материалов. Поэтому, во многих случаях, управление микроструктурой и свойствами покрытий является ноу-хау разработчиков и обладателей соответствующих технологий.

Таблица 1

Типичные газотермически напыляемые материалы и области их применения

Материал покрытия	Максимальная рабочая температура, °C	Области применения
Al	400	Коррозионная стойкость
Zn	250	
Ni	500	
Mo	320	Пары скольжения
Al-Mg	200	Коррозионная стойкость
Нерж.сталь	~500	Коррозионная стойкость, износ
Co-Al ₂ O ₃ и Cr ₂ O ₃	~1000	Стойкость к окислению и износу
CoMoSi (Трибалой)	~1000	Износостойкость при скольжении
NiAl, NiCr	950	Подслой, ремонт
Ni-графит	950	Поверхности скольжения
MCrAlY (M=Fe, Co, Ni)	~1000	Стойкость к коррозии и окислению
Бронза	<200	Износостойкость при скольжении
TiB ₂ , ZrB ₂		Износостойкость
TiC, Cr ₃ C ₂ , NbC, TaC, WC	400-500	
WC-TiC	800	
TaC-NbC	800	
Cr ₃ C ₂ -NiCr	800	Коррозия, износ, скольжение
WC-Co	500	Износостойкость при скольжении
Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂	>1000	Износостойкость, тепловой барьер
AlO ₃ -TiO ₂ , Al ₂ O ₃ -MgO	>1000	
Cr ₂ O ₃ -TiO ₂ , Cr ₂ O ₃	>1000	
ZrO ₂ -MgO, ZrO ₂ -CaO, ZrO ₂ -SiO ₂	>1000	

5.3. Методы газотермического напыления.

Существует много различных видов оборудования и процессов для газотермического напыления. Достаточно подробный обзор приведен в работах [15, 22]. В табл. 2 обобщены основные методы ГТН и их некоторые характеристики, а также получаемых покрытий.

5.3.1. Газопламенное напыление.

Газопламенное напыление (ГПН) является одним из простейших среди современных методов ГТНП. Это дешевый и удобный в управлении метод, использующий исходные материалы различной формы и состояния: порошки, прутки, проволоку и др. Впервые разработан в 1910-е годы, но затем многократно усовершенствован. Источником энергии является пламя сгорания смеси горючего (ацетилен, пропан, водород) с кислородом. Подача напыляемого материала может быть осевой или радиальной в зависимости от типа пистолета.

Таблица 2
Сравнительные характеристики методов газотермического напыления

Метод ГТНП (рабочие газы)	Параметры газовой струи (Т, °С/V, м/с)	Мощность газовой струи, кВт	Напыляемый материал, T _{max} , °С/V _р , м/с	Покрытие: Пористость, % / Толщина, мкм
Газопламенное (кислород, ацетилен, пропан, водород)	3500 / 80-100	20	2500 / 50-100	10-15; 0 (для самофлюсующихся сплавов) / 100-2500 мкм
Электродуговое (воздух, азот, аргон)	>6000 / 50-100	5...10	>3800 / 50...150	10-20 / 100-2000 мкм
Детонационное (кислород, ацетилен, водород, пропан, бутан)	>4000 / >2500	-	- / 750...1000	<2 / 100...400
Высокоскоростное газопламенное (кислород, природный газ, этилен, пропилен, пропан, керосин, водород)	2500-3000 / 500-2000	150-300	3300 / 200...1000	<2 / 50...2000
Плазменное напыление на открытом воздухе (аргон, гелий, водород, азот, смеси)	10000...15000 / 300...1000	40...200	>3800 / 50...100	5...10 / 100...1500
Холодное напыление	0...700 (предварительный нагрев) / 300...1200	-	250 / 500	<5 / 250...600

Основные операционные параметры ГТНП: дистанция напыления 120 – 250 мм; напыление на открытом воздухе; максимальная температура поверхности детали 250 °С (и до 1000 °С при оплавлении покрытий горелкой покрытий из самофлюсующихся сплавов).

5.3.2. Детонационно-газовое напыление. Этот метод ГТНП впервые разработан американской фирмой Union Carbide (сейчас Praxair) в связи с необходимостью получения плотных покрытий с высокой прочностью сцепления с основой. Эта техника напоминает газопламенное напыление, поскольку в качестве источника энергии использует процесс сгорания горючей смеси. Процесс независимо разработан в бывшем СССР, главным образом в Украине [54 – 57]. Однако сгорание происходит в длинном стволе (450-1350 мм), где исходный материал (порошок) нагревается продуктами сгорания. Сгорание происходит в

детонационном режиме, поэтому это циклический процесс. Классические детонационные пушки выполняют 1-15 циклов напыления (выстрелов) в секунду, но недавно разработаны детонационные системы, выполняющие до 100 циклов в сек [58].

Основные параметры процесса: дистанция напыления 100 – 300 мм; напыление на открытом воздухе; размер частиц порошка в диапазоне 5 – 60 мкм.

5.3.3. Высокоскоростное газопламенное напыление (ВГПН). Впервые метод ВГПН разработан фирмой Union Carbide в середине 1950-х годов.

Широкому распространению метода способствовало успешное создание в конце 1970-х, начале 1980-х годов системы Jet Kote. Она подобна детонационной системе, поскольку сгорание происходит в камере под давлением и частицы ускоряются в стволе.

Однако в отличие от детонационно-газовых пушек устройство ВГПН работает в непрерывном режиме сгорания, что обеспечивает его более высокую производительность. Этот метод стал ведущим в наукоемких отраслях для напыления керметных (керамико-металлических, таких как WC-Co) материалов. Этот метод использует исходные материалы в виде порошков, которые подаются в напылительную струю соосно или радиально в зависимости от типа пистолета. Газы подаются в камеру сгорания под давлением (0,3 – 0,4 МПа). Продукты сгорания затем ускоряются в стволе до сверхзвуковых скоростей пламени. Порошок, вводимый в ствол транспортирующим газом (азотом или аргонном) ускоряется до очень высоких скоростей.

Основные параметры процесса: дистанция напыления в диапазоне 150 – 300 мм, напыление на открытом воздухе; размер частиц порошка 5 – 45 мкм.

5.3.4. Электродуговое напыление. Технология электродугового напыления (ЭДН) первоначально изобретена и запатентована д-ром Шоопом в 1910-е годы и приобрела вновь повышенный интерес после 1960-х годов. В этом методе используют электрическую дугу, инициируемую между двумя расходными электродными проволоками, непрерывно подаваемыми в распылительный пистолет. Электрическая дуга, горящая между двумя концами проволоки, расплавляет их, а высокоскоростная воздушная струя распыляет их и переносит расплавленные частицы металла на поверхность изделия, образуя покрытие. Расход сжатого воздуха составляет от 0,8 до 1,8 м³/мин. Термический КПД ЭДН значительно выше, чем у других методов ГТНП.

Основные параметры процесса: дистанция напыления в диапазоне 50-170 мм; напыление на открытом воздухе, в контролируемой атмосфере или в вакууме электропроводных материалов (например, Zn, Al, Mo и NiCr-сплавов) или порошковых

проволок, содержащих керамические фазы, таких как карбид вольфрама (WC). Пористость покрытий может быть улучшена после-напылительной обработкой.

5.3.5. Плазменное напыление. Плазменное напыление заключается в использовании для нагрева и ускорения исходного материала ионизированного газа (или смесей газов). Для ионизации газов и получения термической плазмы и плазменных дуг используют электрические поля. Плазменной струей частицы исходного материала нагреваются и перемещаются на поверхность изделия. В плазматронах плазменный факел генерируется анодом (медь или графит) и катодом (торированный вольфрам). Электрический дуговой разряд, генерируемый между анодом и катодом, ионизирует газ, который расширяется в атмосфере, образуя струю. Исходный материал (порошок) подается в струю, ускоряя частицы и перемещая их в направлении поверхности изделия.

Основные параметры процесса: дистанция напыления в диапазоне 60 – 130 мм; напыление на открытом воздухе (ПН), в контролируемой атмосфере или в вакууме; размер частиц порошка в диапазоне 20-90 мкм. Температура поверхности изделия должна поддерживаться низкой (100 – 200 °С) при напылении керамических материалов во избежание остаточных напряжений в покрытиях. Последующая после напыления обработка может быть использована для улучшения плотности покрытий (отжиг, лазерная обработка).

5.3.6. Холодное напыление. Разработанный в конце 1980-х годов этот метод ГТНП предназначен для получения покрытий путем использования высокой кинетической энергии частиц без их расплавления в процессе напыления. Это осуществляется с помощью струй, формируемых без участия горения и ионизации газов. Газ или смесь газов, используемые при ХН, сжимаются до 3,5 МПа и нагреваются до 700 °С. Этот нагретый газ затем вводится в сопло Лаваля, где расширяется до сверхзвуковых скоростей. Порошок исходного материала подается в сопло и частицы ускоряются при температуре значительно ниже их точки плавления. Температура газа и расход порошка оптимизированы для получения благоприятной микроструктуры покрытия. Состав, температура и давление газа являются параметрами, управляющими свойствами покрытий и варьируются в зависимости от типа исходного материала.

Основные параметры процесса: дистанция напыления в диапазоне 10 – 50 мм; напыление на открытом воздухе; исходный порошок с размером частиц в диапазоне 5 – 20 мкм. Критериями пригодности порошка для ХН являются способность частиц пластически деформироваться и (или) иметь низкую температуру плавления.

6. Рынок газотермического напыления.

Согласно обзора, опубликованного в 2013 г. [59],

объем рынка ГТНП в аэрокосмической и автомобильной промышленности и в производстве промышленных турбин занимают 75 % общего рынка ГТНП, который оценочно составляет 6,5 млрд. долл. США, из которых 77 % приходится на покрытия и услуги, 19 % на материалы и 4 % на оборудование. По отдельным сегментам: около 60 % общего рынка принадлежат турбостроению, 15 % – автомобильной промышленности, и остальные 25 % распределены между большим количеством других отраслей. Ожидается, что турбостроение будет ведущей в развитии технологии ГТНП в последующие годы. Большинство этих рынков (две третьих) находится в Европе, на Ближнем Востоке и в Северной Америке. Однако наибольшие темпы роста наблюдались в Азии [60] и ожидаются в Южной Африке в связи с ростом промышленного производства в этих странах. Однако, и другие отрасли и рынки, как, например, нефтегазовая, целлюлозно-бумажная, металлообрабатывающая и биомедицинская, могут получить преимущества при использовании газотермических покрытий и выдвинуть запросы для новых разработок в технологии и применении ГТНП. Например, ХН и технологии напыления суспензиями и растворами представляют интерес для этих отраслей.

Однако имеется большой потенциал как в отраслях, в которых ГТНП уже интенсивно внедряется, так и в тех, где сейчас применение ГТН незначительно. К потенциальным рынкам относятся следующие [61]:

– Материалы для электронных приборов и других изделий электронной техники, таких как датчики, электропроводки, антенны, накопители энергии и др. Преимуществами термического и холодного напыления являются: широкая номенклатура материалов, которые могут осаждаться на изделия различной формы, отсутствие в необходимости последующей после напыления обработки, высокая скорость осаждения, и проведение процессов осаждения в контролируемой среде.

– автомобильная промышленность: удовлетворение экологических требований, уменьшение трения, износа и расхода смазочных масел, повышение работоспособности ДВС и других агрегатов, создание и применение теплозащитных покрытий, покрытий со специальными функциональными свойствами и др.

– стационарные и вторично стационарно используемые авиационные турбины: более совершенные конструкции и составы теплозащитных покрытий, работоспособных при более высоких температурах, с более высоким сроком службы и в различных средах, парах воды и повышенной стойкости к эрозии, повышение эффективности осаждения покрытий, повышение роботизации и компьютеризации технологических систем ГТНПи пр.

– создание износо- и коррозионно- стойких покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами, особенно для экстремальных условий (температура, давление и окружающая среда), на основе фундаментальных исследований для лучшего понимания и управления процессами формирования покрытий.

– распространение и широкое внедрение современных разработок в сфере ГТНП в нефтегазовой, целлюлозно-бумажной, металлообрабатывающей, биомедицинской и др. отраслях.

Некоторые из применений современной техники ГТНП в аэрокосмической, автомобильной промышленности и турбостроении рассмотрены в [15]. Отличительной особенностью этих применений является общая тенденция преимущественного использования классических методов ГТНП – газопламенного и плазменного. В аэрокосмической промышленности и турбостроении плазменное напыление применяют для многих деталей, поскольку наиболее распространены керамические покрытия. Однако, на многие детали самолетов и турбин напыляют также металлы и керметы. Распространенными покрытиями в этих трех сегментах рынка являются теплозащитные, износостойкие, уплотнительные.

Наиболее распространенными в ведущих отраслях являются следующие типы покрытий:

1. Теплозащитные: $ZrO_2-Y_2O_3$ (YSZ- частично стабилизированный диоксид циркония); $ZrO_2-25CeO_2-Y_2O_3$; CeO_2-YSZ ; $CaTiO_3$. В качестве подслоя для лучшего сцепления используется $MCrAlY$ ($M = Co, Ni$).

В аэрокосмической промышленности их применяют на деталях турбин; в автомобильной – на головках поршней, крышках цилиндров, клапанах, выпускных каналах, коллекторах, турбокомпрессорах, опорных дисках тормозов; в турбостроении – для облицовки камер сгорания, на переходных кольцах, отражательных щитках, топливных форсунках.

2. Уплотнительные (на сопрягаемых поверхностях):

(а) Ni-графит; $MCrAlY$ ($M = Co, Ni$) – В аэрокосмической промышленности применяют для напыления вращающихся деталей турбин; в турбостроении – корпусов компрессора.

(б) Полиэстер; NiAl – полиэстер; Al; бронза; баббит; AlSi с полиэстером; полиимид и BN – в турбостроении – корпуса компрессоров.

3. Стойкие к окислению и коррозии:

(а) $MCrAlY$ ($M = Co, Ni$); NiCrMo; Co-Cr-Si-Mo.

В аэрокосмической промышленности применяют на деталях двигателей; в турбостроении – секции компрессора, пропускающие влагу и хлориды, и турбин, контактирующие с топливом; в судостроении – нерасходуемые защитные покрытия.

(б) Al; Zn; Zn-Al: в автомобильной промышленности – система выпуска; в судостроении – катодная защита.

4. Износостойкие и восстановительные:

(а) WC-Co, WC-CoCr и WC-Ni. В аэрокосмической промышленности – детали гидравлических систем; восстановление и ремонт изношенных и корродированных деталей; в автомобильной – предохранение гильз цилиндров от схватывания; в турбостроении – вращающиеся валы; в судостроении – эрозия и коррозия водяных турбин.

(б) Ni-Al, CuNiIn. В аэрокосмической промышленности – подслои покрытий; антифреттинговые свойства и управление зазорами.

(в) Cr_3C_2-NiCr . В аэрокосмической промышленности – уплотнения при высоких температурах; в турбостроении – высокотемпературные детали секций турбин.

(г) Co-Cr-Si-Mo в турбостроении – детали компрессора.

(д) NiCr, NiCrMo, NiMoAl, сплавы 625 и 718 - в автомобильной – восстановление коленчатых валов; в турбостроении - наращивание и ремонт.

(е) Mo – в автомобильной – защита от капельной эрозии поршней; от заедания в гильзах цилиндров.

Кроме технологических ограничений, присущих методам ГТНП, имеется ряд других критических факторов, препятствующих росту рынка ГТНП [59]: (1) подготовка квалифицированных кадров и привлечение молодых специалистов; (2) создание типовых технологических процессов ГТНП для различных условий производства; (3) повышение роли профессиональных и торговых ассоциаций в сфере ГТНП; (4) сокращение времени на трансфер новых технологий ГТНП; (5) уменьшение капитальных и текущих затрат при внедрении ГТНП в промышленное производство; (6) решение проблем экологии, охраны труда.

7. Перспективные тенденции и применения.

В течение последнего десятилетия интенсивно растет интерес к получению «толстых» мелкозернистых и наноструктурных покрытий на больших поверхностях. Процессы осаждения покрытий из паровой фазы – (CVD, плазмо-активированное CVD (PE-CVD), PVD, EB-PVD, и др.) позволяют осаждать наноструктурные покрытия, однако толщина покрытий едва выше нескольких микрометров, за исключением EB-PVD процесса. Каждое направление, ГТНП и осаждение из паровой фазы, имеют различные преимущества, и если их объединить, это может привести к созданию нового вида покрытий. Поэтому фирма Sulzer Metco разработала новый процесс, комбинирующий плазменное напыление с физическим осаждением из паровой фазы [62]. Этот новый метод использует высокоомощный плазматрон (180 кВт – 3000 А, расход газа до 200 л/мин), работающий при

давлении ниже 1 кПа. При таком низком давлении плазменная струя достигает по длине более чем 2 м до 0,4 м в диаметре. Покрытия, получаемые этим методом, могут иметь микроструктуру, подобную покрытиям при EB-PVD (столбчатая структура и практически беспористые), когда используют низкий расход порошка, адаптированные условия напыления и большую дистанцию напыления [62]. Поэтому свойства покрытий, получаемых PS-PVD, лучше, чем у покрытий PVD и плазменных, а покрытия могут быть получены на более крупных деталях и более сложной формы.

Традиционным плазменным напылением (на открытом воздухе) легко получить покрытия с толщиной от 50 мкм до нескольких мм, но без реальной наноструктуры после плавления частиц в плазменной струе. Этим объясняется интерес к различным методам напыления и исходным материалам, разработанным в последнее десятилетие для получения полностью или частично наноструктурных покрытий:

– Напыление толстых композиций металлических стекол на основе железа (состоящих из семи и более легирующих элементов) с низкими критическими скоростями охлаждения (104 К/с) для формирования металлических стекол [63]. После термообработки при температуре выше точки кристаллизации (568 °С, которая меньше половины температуры плавления), покрытия кристаллизуются в многофазную нанокompозитную микроструктуру. Покрытия можно получить плазменным методом, ВГПН, ЭДМ (порошковыми проволоками). Благодаря высокой твердости при сравнении с традиционными металлическими сплавами аморфные и нанокompозитные покрытия имеют очень хорошие характеристики стойкости к износу и коррозии. Некоторые композиции покрытий также проявляют стойкость к износу и коррозии, превосходящие нержавеющей сталь при таких же условиях [53, 63].

– Напыление, плазменное или ВГПН, агломерированных наноструктурных керамических частиц [64] с тщательным контролем температуры и распределения по размерам частиц в напылительной струе для поддержания частиц в полурасплавленном состоянии. Это приводит к бимодальным структурам, в которых механическое поведение зависит от плотности наноразмерных зон. Покрытия, полученные по таким технологиям, более вязкие, чем традиционные [64, 65]. Холодное напыление или наноструктурных материалов с наноразмерными зёрнами или агломератами, полученными из микро – и наночастиц или только из наночастиц. Однако напыляемые частицы должны быть достаточно пластичными [66 – 68].

– Плазменное напыление суспензий (СПН) и растворов прекурсоров (РПН) позволяют получить тонко структурированные слои с толщиной от нескольких микрометров до нескольких сотен микрометров [65]. Эти технологии, по существу,

разработаны для керамики, которые кажутся обещающими для производства плотных или с контролируемой пористостью покрытий и функционально градиентных слоев. Покрытия обладают очень интересными особенностями, особенно намного лучшей вязкостью по сравнению с традиционными покрытиями благодаря их более тонкой структуре. Тем не менее, получение покрытий из суспензий и растворов, инжектируемых в горячие газы, более сложно (выбор растворителя, диспергаторы, прекурсоры и пр.), из-за фрагментации жидкости, и необходимости управления испарением [65]. Фактически, не доступны средства диагностики для измерения в полете капель размером менее 4–5 мкм, которые могли бы обеспечить лучшее понимание протекающих при напылении явлений. Должны быть сконструированы новые плазменные пистолеты для напыления суспензиями и растворами. Таким образом, необходимо отметить, что СПН и РПН сейчас в таком состоянии, как и традиционное напыление в 1980-е и в начале 1990-х годов. СПН и РПН, в последнее десятилетие были предметом многочисленных публикаций в международных обзорах материалах конференций. Более того, еще в [69] отмечалось «чтобы способствовать индустриальной реализации, необходимо срочно уделить больше внимание перспективным исследовательским работам – сертифицировать газотермическое напыление жидкими исходными материалами на более ориентированные технологические маршруты по областям применения и более убедительно представлять результаты исследований и разработок. Технологии напыления суспензиями и растворами существенно отличаются от классических методов напыления и новые индустриальные стандарты должны характеризовать подготовку суспензий и растворов, хранение, подачу, а также пригодность и хранение сырья (то есть ультраотонких порошков, растворителей, добавок и пр.)».

Аэрокосмическая промышленность является наиболее разносторонней в отношении использования последних разработок в газотермическом напылении, как, например, плазменное напыление в контролируемой атмосфере (LPPS) и плазменное напыление в вакууме (VPS) и HVOF. Автомобильная и другие отрасли, как, например, биомедицинская и судостроение нуждаются в новых материалах и разработках, поскольку они до сих пор быстро развиваются вследствие необходимости уменьшения потребления горючего. В этом отношении выбор покрытий, обеспечивающих меньший износ и трение, коррозию и окисление; повышение твердости и увеличение рабочей температуры, является существенным. Современные материалы покрытий и технологии делают возможным

достижение этих целей, но улучшения все еще необходимы для придания покрытиям новых полезных свойств, как, например, экологическая совместимость, высокая эффективность использования топлива, пониженная стоимость, уменьшенный вес, уменьшение технического обслуживания и повышенная прочность.

Развитие новых технологий ГТНП, покрытий и материалов будет определенно открывать возможности для новых рынков, где ГТНП до сих пор еще имеют незначительный бизнес-сегмент. Например, аэрокосмическая промышленность, возобновляемые и альтернативные источники энергии, полупроводниковая, металлургическая и судостроительные отрасли являются потенциально растущими сферами, поскольку они несомненно представляют растущие рынки как в новых и развивающихся, так и в промышленно развитых странах. Увеличение технико-экономической значимости ГТН основывается на росте знаний, материалов и технологий. Таким образом, прогресс в технологии ГТН возможен и необходим.

Технология ГТНП имеет также большой потенциал для дальнейшего развития за пределами существующих границ применений и рынков, поскольку имеется много отраслей за пределами традиционных рынков ГТНП, которые осведомлены о преимуществах ГТНП, но не рискуют войти в них. Эти ограничения можно обойти только прогрессом как в промышленности, так и в исследованиях ГТНП. Расширение ГТНП имеет место в настоящее время благодаря развитию материалов и оборудования, средств диагностики, а также исследования процессов.

Имеются возможности для разработки новых исходных материалов, поскольку они расширяют возможности рынка. Кроме того, прогресс в создании новых процессов открывает возможности для новых видов покрытий и, следовательно, новых применений. Совсем недавно, искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы были предложены для контроля и регулирования операционных параметров ГТНП [70].

8. Выводы. Этап освоения технологии газотермического напыления покрытий (плазменного и газопламенного) наукоемкими отраслями, прежде всего в аэрокосмической и ядерной промышленности, в 1960-е годы стимулировал проведение в дальнейшем интенсивных исследований и разработок. Однако теория и практика ГТНП развивались в основном по пути обоснования термических механизмов формирования покрытий. В последующие годы наметился постепенный переход к высокоскоростным методам напыления. Технология газотермического напыления пополнилась такими новыми методами, как детонационное, высокоскоростное газопламенное в 1980-е годы и холодное напыление в конце 1990-х годов. В 1970-е годы проведены работы по

существенному совершенствованию электродугового проволочного напыления.

Более глубокое понимание процессов и явлений, сопровождающих формирование газотермических покрытий, открывают возможности конструирования их новых конструкций и составов для разнообразных условий эксплуатации.

Л и т е р а т у р а

1. Хокинг М. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение / Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко [и др.] – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
3. ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering. – Ohio: ASM International, 1994 – P. 1056.
4. Cartier M. / 2003. Handbook of Surface Treatments and Coatings / Cartier M., Polak T.A., Wilcox G.D. – N-Y: ASME Press, 2003. – P. 412.
5. Ющенко К.А. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – Київ: Наук.думка. 2007. – 559 с.
6. Dobkin D.M. Principles of Chemical Vapor Deposition / Dobkin D.M., Zuraw M.K. - NY: Springer, 2003.
7. Glocker, D.A., Shah, S.I. / Handbook of Thin Film Process Technology, 2 vol. set. / Glocker, D.A., Shah, S.I. - Bristol: Institute of Physics, - 2002.
8. Mahan J.E. / Physical Vapor Deposition of Thin Films / Mahan J.E. Hoboken: John Wiley & Sons. – 2000.
9. Erkens, G. / Plasma-Assisted Surface Coating Processes, Methods, Systems and Applications. Sulzer Metco / Erkens, G., Vetter, J., McFuller, J., auf dem Brinke, T., Fromme, M., Mohnfeld, A. Munich: SÜddeutscher Verlag onpact GmbH. – 2011.
10. Frey, H., / Handbook of Thin Film Technology / Frey, H., Khan, H.R. // NY: Springer, – P. 550.
11. Gladish G. / Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment. Springer Series in Materials Science, Book 146 / Gladish G.G., Smurov I. // NY: Springer, 2011.
12. Полонський Л.Г. / Техніка напылення газотермічних покриттів (машинна стадія розвитку) / Полонський Л.Г. // Житомир: ЖДТУ, 2004. – 266 с.
13. Кречмар Э. / Напыление металлов, керамики и пластмасс / Кречмар Э. // М.: Машиностроение, 1966. – 432 с.
14. Hermanek, F.J. / What is Thermal Spray? For the International Thermal Spray Association (ITSA) / Hermanek, F.J. // Online: www.thermalspray.org. 2014.
15. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
16. Berndt C.C. The origin of thermal spray literature / Berndt C.C. / Proceedings of the international thermal spray conference, Singapore // Ohio: ASM International, 2001. – P. 1351–1360.
17. Knight R. Thermal spray: past, present and future / Knight R. / Proceedings of the international symposium on plasma chemistry // Toronto: ASME, 2005.
18. Patent 5,712 UK, Improvements in or connected with the coating of surfaces with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials / Schoop M.U. 1910.

19. Patent 21,066 UK, An improved process of applying deposits of metal or metallic compound to surfaces / Schoop M.U. 1911.
20. Patent 28,001 UK, A method of producing bodies and coatings of glass and other substances / Morf E. 1912.
21. Patent 1,133,507 US, Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances / Schoop M.U. 1915.
22. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
23. Tucker Jr., C. (Ed.), 2013. ASM Handbook. Thermal Spray Technology Volume 5A. - Ohio: ASM International. P. 412.
24. Friis, M. / Control of thermal spray processes by means of process maps and process windows / Friis, M., Persson, C. // J. Therm. Spray Technol. 2003. 12 (1), - P. 44–52.
25. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / Кудинов В.В., Бобров Г.В. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
26. Ильющенко А.Ф. / Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек // Минск: Бестпринт, 2002. – 480 с.
27. Кудинов В.В. / Плазменные покрытия / Кудинов В.В. // М.: Наука, 1977. – 184 с.
28. Кудинов В.В. / Теплофизика плазменных покрытий / Кудинов В.В., Иванов Е.М. // Физика и химия плазменных металлургических процессов. – М.: Наука, 1985. – С.103-126.
29. Ю.Н. Дубнищев / Оптические методы исследования потоков / Ю.Н. Дубнищев, В.А. Арбузов, П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов // Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. – 418 с.
30. Гуляев П.Ю. / Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления / Гуляев П.Ю., Долматов А.В. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 11, №5(2), 2009. – С.381-385.
31. А.А. Овсянников / Диагностика низкотемпературной плазмы / А.А. Овсянников, В.С. Энгельшт, Ю.А. Лебедев [и др.] // Новосибирск: «Наука», 1994. – 485 с.
32. Методы и средства оптической пирометрии // М.: Наука, 1983. – 149 с.
33. M. Doubenskaia Particle-in-flight monitoring in thermal spray processes / M. Doubenskaia, D. Novichenko, A. Sova and D. Pervoushin // Surface and Coatings Technology, 2010, Vol. 205, Issue 4, P. 1092-1095.
34. Fauchais, P. Sensors in spray processes / Fauchais, P., Vardelle, M. // J. Therm. Spray Technol. 2010, 19 (4). – P. 668–694.
35. Fauchais, P. Diagnostics in thermal plasma processing / Fauchais, P., Coudert, J.F., Vardelle, M. / Plasma Diagnostics, vol. 1 // NY: Academic Press, 1989. – P. 349–446.
36. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые напылительные струи / Харламов Ю.А. Харламов М.Ю. // Луганск: Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля, 2011. – 260 с.
37. Fauchais P. Diagnostics of thermal spraying plasma jets / Fauchais, P., et al. // J. Therm. Spray Technol. 1992, 1 (2), P. 117–128.
38. Moreau, C. Diagnostics for advanced materials processing by plasma spraying / Moreau, C., Bisson, J.-F., Lima, R.S., Marple, B.R. // Pure Appl. Chem. 2005, 77 (2), P. 443–462.
39. Получение покрытий высокотемпературным распылением. Сб. статей. Под ред Л.К. Дружинина и В.В. Кудинова // М.: Атомиздат, 1973. – 312 с.
40. Thermal Spray Conf. Proceedings. // ASM International.
41. Теория и практика газотермического нанесения покрытий // М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. – Материалы: 1 семинара, 1977. XII Всес. конф., 1991.
42. Газотермическое напыление в промышленности: мат-лы межд. семинара. – Ленинград: Полиплазма. – 1991. – 104 с.
43. Ильющенко А.Ф. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас, А.П. Достанко и др. // Минск: Научный центр исследований политики и бизнеса «Армита – Маркетинг, Менеджмент», 1999. – 544 с.
44. Достанко А.П. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Т.1 / А.П. Достанко, С.П. Кундас, М.Н. Босяков [и др.] // Минск: ФУАинформ, 2000. – 424 с.
45. Ильющенко А.Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек // Минск: Бестпринт, 2002. – 480 с.
46. Li, C.-J. / Effect of spray particle trajectory on the measurement signal of particle parameters based on thermal radiation / Li, C.-J., Wu, T., Li, C.-X., Sun, B. // J. Therm. Spray Technol. 2003, 12 (1), P. 80–94.
47. Fauchais, P. / Sensors in spray processes / Fauchais, P., Vardelle, M. // J. Therm. Spray Technol., 2010, 19 (4), P. 668–694.
48. Legoux, J.-G. Evaluation of four high velocity thermal spray guns using WC-10% Co-4% Cr cermets / Legoux, J.-G., Arsenault, B., Leblanc, L., Bouyer, V., Moreau, C. // J. Therm. Spray Technol., 2002, 11 (1), P. 86–94.
49. Planche M.P. In-flight characteristics of plasma sprayed alumina particles measurements, modeling, and comparison / Planche, M.P., Bolot, R., Coddet, C. // J. Therm. Spray Technol., 2003, 12 (1), P. 101–111.
50. Sampath, S. Sensing, control, and in situ measurement of coating properties: an integrated approach toward establishing process-property correlations / Sampath, S., Srinivasan, V., Valarezo, A., Vaidya, A., Streibl, T. // J. Therm. Spray Technol., 2009, 18 (2), P. 243–255.
51. Fauchais, P., Thermal Spray Fundamentals / Fauchais, P., Heberlein, J., Boulos, M. // NY: Springer, 2014. – P. 1600.
52. Шоршоров М.Х. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий / Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
53. Харламов Ю.А. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Ю.И. Писклов, Б.Л. Рябошапко // М.: Ин-т металлургии им. А.А. Байкова АН СССР, 1980. – 65 с.
54. Зверев А.И. Детонационное напыление покрытий /. Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. // Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.
55. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности / Харламов Ю.А., Будагянц Н.А. // Луганск: изд-во Восточноукр. гос. ун-та, 1998. – 223 с.
56. Fagoaga, I. The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process / Fagoaga, I., Barykin, G., De Juan, J., Soroa, T., Vaquero, C., Coatings, A., Inasmet, F. // Thermal Spray 1999: United Thermal Spray Conference (DVS-ASM), P. 282–287.
57. Dorfman, M.R. Challenges and strategies for growth of thermal spray markets: the six-pillar plan / Dorfman,

- M.R., Sharma, A. // *J. Therm. Spray Technol.*, 2013, 22 (5), P. 559–563.
58. Fukumoto, M. The current status of thermal spraying in Asia / Fukumoto, M. // *J. Therm. Spray Technol.*, 2008, 17 (1), P. 5–13.
 59. Thermal Spray Coating Technology White Paper by the ASM International Thermal Spray Association (TSS) // TSS, 2014. <http://tss.asminternational.org/portal/site/tss/>.
 60. von Niessen, K. Plasma sprayed-PVD: a new thermal spray process to deposit out of the vapor phase / von Niessen, K., Gindrat, M. // *J. Therm. Spray Technol.*, 2011, 20 (4), P. 736–743.
 61. Branagan, D.J. Maximizing the glass fraction in ironbased high velocity oxy-fuel coatings / Branagan, D.J., Swank, W.D., Meacham, B.E., // *Metall. Mater. Trans.*, 2009, A 40A, P. 1306–1313.
 62. Lima, R.S. Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated powders for structural, thermal barrier and biomedical applications: a review / Lima, R.S., Marple, B.R. // *J. Therm. Spray Technol.*, 2007, 16 (1), P. 40–63.
 63. Fauchais, P. Engineering a new class of thermal spray nano-based microstructures from agglomerated nanostructured particles, suspensions and solutions: an invited review / Fauchais, P., Montavon, G., Lima, R.S., Marple, B.R. // *J. Phys.*, 2011, D 44, 093001.
 64. Ajdelsztajn, L. Cold-spray processing of a nanocrystalline Al–Cu–Mg–Fe–Ni alloy with Sc. / Ajdelsztajn, L., Zu'n'iga, A., Jodoin, B., Lavernia, E.J. // *J. Therm. Spray Technol.*, 2006, 15 (2), P. 184–190.
 65. Wang, H.-T. Microstructural characterization of cold-sprayed nanostructured FeAl intermetallic compound coating and its ball-milled feedstock powders / Wang, H.-T., Li, C.-J., Yang, G.-J., Li, C.-X., Zhang, Q., Li, W.-Y. // *J. Therm. Spray Technol.*, 2007, 16 (5–6), P. 669–676.
 66. Zhang, Q. Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying / Zhang, Q., Li, C.-J., Li, C.-X., Yang, G.-J., Lui, S.-C. // *Surf. Coat. Technol.*, 2008, 202 (14), P. 3378–3384.
 67. Killinger, A. Review of new developments in suspension and solution precursor thermal spray processes / Killinger, A., Gadow, R., Mauer, G., Guignard, A., Vaßen, R., Stöver, D. // *J. Therm. Spray Technol.*, 2011, 20 (4), P. 677–695.
 68. Ульшин В.А. Оптимизация параметров детонационного напыления с использованием генетического алгоритма / Ульшин В.А., Харламов М.Ю. // *Автоматическая сварка*. – 2005. – № 2. – С.32–37.
 7. Glocker, D.A., Shah, S.I. / *Handbook of Thin Film Process Technology*, 2 vol. set. / Glocker, D.A., Shah, S.I. - Bristol: Institute of Physics, - 2002.
 8. Mahan J.E. / *Physical Vapor Deposition of Thin Films* / Mahan J.E. Hoboken: John Wiley & Sons. – 2000.
 9. Erkens, G. / *Plasma-Assisted Surface Coating Processes, Methods, Systems and Applications*. Sulzer Metco / Erkens, G., Vetter, J., Müller, J., auf dem Brinke, T., Fromme, M., Mohnfeld, A. Munich: Süddeutscher Verlag onpact GmbH. – 2011.
 10. Frey, H., / *Handbook of Thin Film Technology* / Frey, H., Khan, H.R. // NY: Springer, - P. 550.
 11. Gladish G. / *Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment*. Springer Series in Materials Science, Book 146 / Gladish, G.G., Smurov, I. // NY: Springer, 2011.
 12. Polonsky L.G. / *Tekhnika napilennya gazotermichnikh pokrittiv (mashinna stadia rozvitky)* / Polonsky L.G. // Zhitomir: ZDTU, 2004. – 266 s.
 13. Krechmar E. Napilenie metallov, keramiki i plastmass / Krechmar E. // M.: Mashinostroenie, 1966. – 432 s.
 14. Hermanek, F.J. / *What is Thermal Spray? For the International Thermal Spray Association (ITSA)* / Hermanek, F.J. // Online: www.thermalspray.org. 2014.
 15. *Handbook of Thermal Spray Technology*, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
 16. Berndt C.C. The origin of thermal spray literature / Berndt C.C. / *Proceedings of the international thermal spray conference, Singapore* // Ohio: ASM International, 2001. - P. 1351–1360.
 17. Knight R. Thermal spray: past, present and future / Knight R. / *Proceedings of the international symposium on plasma chemistry* // Toronto: ASME, 2005.
 18. Patent 5,712 UK, Improvements in or connected with the coating of surfaces with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials / Schoop M.U. 1910.
 19. Patent 21,066 UK, An improved process of applying deposits of metal or metallic compound to surfaces / Schoop M.U. 1911.
 20. Patent 28,001 UK, A method of producing bodies and coatings of glass and other substances / Morf E. 1912.
 21. Patent 1,133,507 US, Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances / Schoop M.U. 1915.
 22. Pawlowski L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed.* / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
 23. Tucker Jr., C. (Ed.), 2013. *ASM Handbook. Thermal Spray Technology Volume 5A*. - Ohio: ASM International. P. 412.
 24. Friis, M. / *Control of thermal spray processes by means of process maps and process windows* / Friis, M., Persson, C. // *J. Therm. Spray Technol.* 2003. 12 (1), - P. 44–52.
 25. Kudinov V.V. Nanesenie pokritiy napileniem. Teoriya, tekhnologiya i oborudovanie / Kudinov V.V., Bobrov G.V. – M.: Metallurgiya, 1992. – 432 s.
 26. Ilyushchenko A.F. Formirovanie gazotermicheskikh pokritiy: teoriy i praktika / Ilyushchenko A.F., V.A. Okovitiy, S.P. Kundas, Formanek B. // Minsk: Bestprint, 2002. – 480 s.
 27. Kudinov V.V. Plazmennie pokritiy / V.V. Kudinov // M.: Nauka, 1977. – 184 s.
 28. Kudinov V.V. Teplophisika plazmennikh pokritiv / V.V. Kudinov, E.M. Ivanov / *Phizika i khimiya plazmennikh metallurgicheskikh prochshessov* // M.: Nauka, 1985. – S.103-126.

References

1. Hocking M.G. *Metallic and Ceramic Coatings* / Hocking M.G., Vasantasree V., Sidky P.S. // L.: Longman Group UK Limited, 1989. (M.: Mir, 2000. – P. 518).
2. *Teoriya i praktika naneseniya zashchitnikh pokritiy / Vityaz P.A., Ivashko V.S., Ilyushchenko A.F. [I dr.]. – Minsk: Beloruskaya navuka, 1998. – 583 s.*
3. *ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering*. – Ohio: ASM International, 1994 – P. 1056.
4. Cartier M. / 2003. *Handbook of Surface Treatments and Coatings* / Cartier M., Polak T.A., G D Wilcox G.D. – N-Y: ASME Press, 2003. – P. 412.
5. Yushchenko K.A. *Inseneriya poverhni* / Yushchenko K.A., Yu.S. Borisov, V.D. Kuznetsov, V.M. Kors.- Kiev: Nauk.dumka. 2007. – 559 s.
6. Dobkin D.M. *Principles of Chemical Vapor Deposition* / Dobkin D.M., Zuraw M.K. - NY: Springer, 2003.

29. Dubnichshev Yu.A., V.A. Arbusov, P.P. Belousov, P.Ya. Belousov // Novosibirsk: Sib. Univ. izd-vo, 2003. – 418 s.
30. Gulyaev P.Yu. Fizicheskie princhshipi diagnostiki v technolgiyakh plazmennogo napileniya / P.Yu. Gulyaev, A.V. Dolmatov // Izvestia Samarskogo nauchnogo chshentra Rossiyskoy akademii nauk, 2009, t.11, # 5(2). – S. 381-385.
31. Ovsinnikov A.A. Diagnostika nizkotemperaturnoy plazmi / A.A. Ovsinnikov, V.S. Engelsht, Yu. A. Lebedev [i dr.] // Novosibirsk: Nauka, 1994. – 485 s.
32. Metodi I sredstva opticheskoy pirometrii // M.: Nauka, 1983. – 149 s.
33. M. Doubenskaia Particle-in-flight monitoring in thermal spray processes / M. Doubenskaia, D. Novichenko, A. Sova and D. Pervoushin // Surface and Coatings Technology, 2010, Vol. 205, Issue 4, P. 1092-1095.
34. Fauchais, P. Sensors in spray processes / Fauchais, P., Vardelle, M. // J. Therm. Spray Technol. 2010, 19 (4). – P. 668–694.
35. Fauchais, P. Diagnostics in thermal plasma processing / Fauchais, P., Coudert, J.F., Vardelle, M. / Plasma Diagnostics, vol. 1 // NY: Academic Press, 1989. – P. 349–446.
36. Kharlamov Yu.A. Detonachshionno-gazovie napilitelnie strui / Yu.A. Kharlamov, M.Yu. Kharlamov // Lugansk: Vostochno-ukr. Nachsh. Univ-t im. V.Dalya, 2011. – 260 s.
37. Fauchais P. Diagnostics of thermal spraying plasma jets / Fauchais, P., et al. // J. Therm. Spray Technol. 1992, 1 (2), P. 117–128.
38. Moreau, C. Diagnostics for advanced materials processing by plasma spraying / Moreau, C., Bisson, J.-F., Lima, R.S., Marple, B.R. // Pure Appl. Chem. 2005, 77 (2), P. 443–462.
39. Poluchenie pokritiy visokotemperaturnim napileniem. Sb. Staley. Pod red. L.K. Druzhinina i V.V. Kudinova // M.: Atomizdat, 1973. – 312 s.
40. Thermal Spray Conf. Proceedings. // ASM Internatational.
41. Teoriya I praktika gazotermicheskogo naneseniy pokritiy // M.: MVTU im. N.E. Bauman. – Materiali I seminaru, 1977,.... XII Vses, conf., 1991.
42. Gazotermicheskoe napilenie v promishlennosti: mat-li mezhdunarodn. Seminaru. – Leningrad: Poliplazma. – 1991. – 104 s.
43. Ilyuchshenko A.F. Prochshessi plazmennogo naneseniya pokritiy: teoriya i praktika / A.F. Ilyuchshenko, S.P. Kundas, A.P. Dostanko [i dr.] // Minsk: Nauchniy chshentr issledovaniy politiki I biznesa “Armita – Marketing, Menegment”, 1999. – 544 s.
44. Dostanko A.P. Plazmennie prochshessi v proizvodstve izdeliy elektronnoy tekhniki. V 3-kh t. T.1 / Dostanko A.P., S.P. Kundas, M.N. Bosyakov [i dr.] // Minsk: FUAinform, 2000. – 424 s.
45. Ilyuchshenko A.F. Formirovanie gazotermicheskikh pokritiy: teoriya I praktika / A.F. Ilyuchshenko, V.A. Okovityu, S.P. Kundas, B. Formanek // Minsk: Bestprint, 2002. – 480 s.
46. Li, C.-J. / Effect of spray particle trajectory on the measurement signal of particle parameters based on thermal radiation / Li, C.-J., Wu, T., Li, C.-X., Sun, B. // J. Therm. Spray Technol. 2003, 12 (1), P. 80–94.
47. Fauchais, P. / Sensors in spray processes / Fauchais, P., Vardelle, M. // J. Therm. Spray Technol., 2010, 19 (4), P. 668–694.
48. Legoux, J.-G. Evaluation of four high velocity thermal spray guns using WC-10% Co-4% Cr cermets / Legoux, J.-G., Arsenault, B., Leblanc, L., Bouyer, V., Moreau, C. // J. Therm. Spray Technol., 2002, 11 (1), P. 86–94.
49. Planche M.P. In-flight characteristics of plasma sprayed alumina particles measurements, modeling, and comparison / Planche, M.P., Bolot, R., Coddet, C. // J. Therm. Spray Technol., 2003, 12 (1), P. 101–111.
50. Sampath, S. Sensing, control, and in situ measurement of coating properties: an integrated approach toward establishing process-property correlations / Sampath, S., Srinivasan, V., Valarezo, A., Vaidya, A., Streibl, T. // J. Therm. Spray Technol., 2009, 18 (2), P. 243–255.
51. Fauchais, P., Thermal Spray Fundamentals / Fauchais, P., Heberlein, J., Boulos, M. // NY: Springer, 2014. – P. 1600.
52. Shorshorov M.Kh. Fiziko-khimicheskie osnovi detonachshionno-gazovogo napileniya / M.Kh. Shorshorov, Yu.A. Kharlamov // M.: Nauka, 1978. – 224 s.
53. Kharlamov Yu.A. Detonchshionno-gazovaya apparatura dly napileniy pokritiy / Yu.A. Kharlamov, M.Kh. Shorshorov, Yu.I. Pisklov, B.L. Ryuboshapko // M.: In-t metallurgii im. A.A. Baykova AN SSSR, 1980. – 65 c.
54. Zverev A.I. Detonachshionnoe napilenie pokritiy / A.I. Zverev, S.Yu. Sharivker, E.A. Astakhov // L.: Sudostroenie, 1979. 232 s.
55. Kharlamov Yu.A. Detonchshionno-gazovie processi v promishlennosti / Yu.A. Kharlamov, N.A. Budagynchsh // Lugansk: izd-vo Vostochnoukr. Gos. Univ-ta, 1998. – 223 s.
56. Fagoaga, I. The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process / Fagoaga, I., Barykin, G., De Juan, J., Soroa, T., Vaquero, C., Coatings, A., Inasmet, F. // Thermal Spray 1999: United Thermal Spray Conference (DVS-ASM), P. 282–287.
57. Dorfman, M.R. Challenges and strategies for growth of thermal spray markets: the six-pillar plan / Dorfman, M.R., Sharma, A. // J. Therm. Spray Technol., 2013, 22 (5), P. 559–563.
58. Fukumoto, M. The current status of thermal spraying in Asia / Fukumoto, M. // J. Therm. Spray Technol., 2008, 17 (1), P. 5–13.
59. Thermal Spray Coating Technology White Paper by the ASM International Thermal Spray Association (TSS) // TSS, 2014. <http://tss.asminternational.org/portal/site/tss/>.
60. Von Niessen, K. Plasma sprayed-PVD: a new thermal spray process to deposit out of the vapor phase / von Niessen, K., Gindrat, M. // J. Therm. Spray Technol., 2011, 20 (4), P. 736–743.
61. Branagan, D.J. Maximizing the glass fraction in ironbased high velocity oxy-fuel coatings / Branagan, D.J., Swank, W.D., Meacham, B.E., // Metall. Mater. Trans., 2009, A 40A, P. 1306–1313.
62. Lima, R.S. Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated powders for structural, thermal barrier and biomedical applications: a review / Lima, R.S., Marple, B.R. // J. Therm. Spray Technol., 2007, 16 (1), P. 40–63.
63. Fauchais, P. Engineering a new class of thermal spray nano-based microstructures from agglomerated nanostructured particles, suspensions and solutions: an invited review / Fauchais, P., Montavon, G., Lima, R.S., Marple, B.R. // J. Phys., 2011, D 44, 093001.
64. Ajdelsztajn, L. Cold-spray processing of a nanocrystalline Al–Cu–Mg–Fe–Ni alloy with Sc. / Ajdelsztajn, L., Zuñiga, A., Jodoin, B., Lavernia, E.J. // J. Therm. Spray Technol., 2006, 15 (2), P. 184–190.

65. Wang, H.-T. Microstructural characterization of cold-sprayed nanostructured FeAl intermetallic compound coating and its ball-milled feedstock powders / Wang, H.-T., Li, C.-J., Yang, G.-J., Li, C.-X., Zhang, Q., Li, W.-Y. // J. Therm. Spray Technol., 2007, 16 (5–6), P. 669–676.
66. Zhang, Q. Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying / Zhang, Q., Li, C.-J., Li, C.-X., Yang, G.-J., Lui, S.-C. // Surf. Coat. Technol., 2008, 202 (14), P. 3378–3384.
67. Killinger, A. Review of new developments in suspension and solution precursor thermal spray processes / Killinger, A., Gadow, R., Mauer, G., Guignard, A., Vaßen, R., Stöver, D. // J. Therm. Spray Technol., 2011, 20 (4), P. 677–695.
68. Ulshin V.A. Opgtimizachshiy parametrov detonachshionnogo napileniy s ispolzovaniem geneticheskogo algoritma / V.A. Ulshin, M.Yu. Kharlamov // Avtomaticheskay svarka. – 2005. - #2. – S.32-37.

Харламов Ю.О., Полонський Л.Г. Газотермічне наплення. Сучасний стан і перспективи розвитку

У статті показано, що одним з необхідних умов підвищення конкурентоспроможності машинобудування є використання методів і засобів інженерії поверхні. Особливий інтерес представляють методи газотермічного наплення. Розглянуто основні етапи історії розвитку цих методів. Інтенсивний розвиток теорії і практики газотермічного наплення пов'язано з прогресом в наукоємних галузях промисловості. Тоді ж намітилася тенденція до проведення поряд з прикладними фундаментальних досліджень по газотермічному наплюванню. Розглянуто сучасні газотермічні покриття, їх отримання і області застосування. Коротко розглянуті основні методи наплення.

Ключові слова: газотермічне наплення, дослідження, історія техніки, поверхня, покриття.

Kharlamov Yu.A., Polonsky L.G. Thermal spraying. Current status and further development

The article shows that one of the necessary conditions to increase the competitiveness of machine building industry is the use of methods and means of surface engineering. Thermal spraying is a group of processes in which finely divided metallic or nonmetallic surfacing materials are deposited in a molten or semimolten or solid conditions on to a prepared substrate to form a deposited coating.

In paper are generalized the results of studies and developments in the field of thermal spraying, including theory, technology and equipment, as also application of thermal sprayed coatings. The first part of this paper refers to the short history of thermal spraying. In the second part the adoption of thermal spraying processes by knowledge-intensive industries are discussed. Changes in research methods of thermal spraying are discussed in the third part of the paper. The great deal of attention is paid to current coatings, their materials and coatings build-up in next fourth part of the paper. Future trends and applications also discussed in sixth part of paper.

Keywords: applications, history, thermal spraying, trends, research and development, surface, coatings.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк). yuriy.kharlamov@gmail.com

Полонський Леонід Григорович – д.т.н., проф., зав. кафедри технології машинобудування Житомирського державного технологічного університету (м. Житомир). pol@ztu.edu.ua

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 12.09.2016