

Г. Г. Крушенко

УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ АЛЮМИНИЙ – ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО*Показаны преимущества ультрадисперсного порошка алюминия в качестве высокоэнергетического топлива**Ключевые слова: ультрадисперсный порошок алюминия, топливо.*

Достижения каждой страны в области ракетно-технической техники являются показателем ее научно-технического, экономического и военного потенциала [1]. При этом одним из важнейшей составляющей этой техники является такой компонент, как топливо, к одному из видов которых относятся и металлы.

Идея использования в качестве горючего для двигателя космической ракеты металлов – веществ, обладающих высокой теплотворной способностью, была впервые высказана Ф. А. Цандером и Ю. В. Кондратьевым [2]. Имеется информация [3], что Ф. А. Цандер еще до 1927 г. написал теоретическую работу «Применение металлического топлива в ракетных двигателях». В двигателе, где в качестве окислителя является жидкий кислород, он считал металл основным горючим, а углеводород – вспомогательным. Но осуществить эту идею при существующей в то время технологии было нереально.

Теплотворная способность и скорость истечения из сопла продуктов сгорания алюминия хотя и уступают таковым для лития и бериллия, но его содержание в земной коре и ежегодное производство несоизмеримо их превосходит, что и определяет перспективность применения алюминия (см. таблицу). Кроме того, постоянно ведутся исследования по разработке оптимальных сочетаний компонентов топлив и дисперсности алюминия, в результате которых эти показатели будут повышены.

Однако продукты сгорания металлов – частицы окислов – не являются молекулами и потому не могут обладать такими высокими молекулярными скоростями, как частицы газов. Поэтому они не могут служить источником реактивной силы. То есть в чистом виде металлы не годятся в качестве топлива для ракеты. Но если сжигать в двигателе ракеты обычное жидкое топливо, к которому примешаны частицы металла (суспензии), то теплота, развитая твердыми частицами, перейдет к газообразным продуктам горения, и температура газа вследствие этого существенно увеличится; возрастут и скорости истече-

ния продуктов сгорания, а, следовательно, удельная тяга двигателя станет больше.

Не ставя перед собой задачу развития этого направления, в 70-х гг. XX в. сотрудник НИИ высоких напряжений Томского политехнического института Н. А. Яворовский с коллегами начал заниматься электрическим взрывом проводников при исследовании работы так называемых взрывных прерывателей [4]. Конструкция этого устройства напоминает обычный предохранитель, но через проводник пропускается такой мощный ток, что он не просто сгорает, а взрывается и обрывает ток с миллисекундной скоростью. Такие прерыватели были нужны для так называемого управляемого многоточечного подрыва головок противоракетных ракет. Расчет делался на поражение разделяющихся боеголовок противника при массивном налете: после засекания ближайшей боеголовки электронные устройства мгновенно (в течение 5 наносекунд) подключали прерыватели, те взрывались и подавали импульс на взрыватель той части головки, которая была обращена в сторону ближайшей цели, после чего на нее шел узконаправленный поток осколков. Такая противоракета могла поразить до нескольких десятков головок одновременно.

Во время проведения экспериментов с прерывателями (в изолированной камере, наполненной аргоном, электрическим импульсом взрывали алюминиевый провод) Н. А. Яворовский с сотрудниками обнаружили идеально шарообразные частицы алюминия. Их изучение с помощью электронного микроскопа показало, что они имеют размер примерно 20 нанометров. В то время за ними закрепилось название «ультрадисперсные порошки» (УДП). Последующие исследования показали их исключительно высокую химическую активность [5]. Так, если скорость горения обычного порошкообразного алюминия в пиротехнических составах составляет 10 мм в секунду, то УДП алюминия горит со скоростью 150 мм в секунду.

Таблица

Горючее	Теплотворная способность смеси, кал/кг	Содержание в земной коре, % (масс)	Среднегодовое производство в период 2004–2008 гг.	Стоимость 1 кг, \$
Бензин	2 350	–	–	–
H ₂	3 240	1,0	2007 г. – 90 млн т.	2,3–3,9
Mg	3 600	2,76	2006 г. – 700 тыс. т	1,7
Al	3 700	5,50	2007 г. – 39 млн т	2,7*
Li	4 780	1,8×10 ⁻³	2004 г. – 15,5 тыс. т.	0,7
Be	5 430	6×10 ⁻⁴	2006 г. – 180 т.	150

Примечание. *Цена алюминия на Лондонской бирже металлов (LME) по состоянию на 19.08.2008. (<http://www.infogeo.ru/metalls/lme/>); стоимость алюминия на российском рынке – 3,734 \$/кг; стоимость Mg, Li и Be приведена по данным российского рынка металлов, так как на торгах LME выставляются только такие цветные металлы – Al, Cu, Pb, Ni, Sn и Zn (<http://www.lme.com>).

Это связано с тем, что нанопорошки, полученные с помощью электрического взрыва проводников, обладают так называемой запасенной энергией, накапливающейся в двойном электрическом слое, сформировавшемся в процессе образования наночастиц и последующем их окислении [5]. Для частиц нанопорошков, размер которых приблизительно 50 нанометров, вклад энергии поверхности в суммарную запасенную энергию составляет 2...4 кДж/моль.

Среди других достоинств ЭВП-технологии по отношению к другим физическим методам получения нанопорошков являются [6]: возможность гибкого регулирования параметров процесса и, соответственно, характеристик получаемых нанопорошков; сравнительно небольшой относительно других физических методов разброс частиц по размерам; высокая активность нанопорошков в различных химических процессах.

Явление электрического взрыва проводников (ЭВП) – это взрывообразное разрушение металлического проводника под действием мощного импульса электрического тока большой плотности (более 10^{10} А/м²). Продуктами разрушения проводника являются пары и мельчайшие частицы металла [7].

Это явление было открыто Наирне в 1774 г. Позже Майкл Фарадей получал частицы металлов путем пропускания импульсов электрического тока при разряде конденсаторов. Явление ЭВП пытались использовать в различных целях: для моделирования ядерных взрывов, для создания мощных импульсных источников света, для запуска термоядерного синтеза и др. [5].

ЭВП осуществляется по схеме, показанной на рис. 1. Емкостной накопитель энергии С заряжается от источника энергии до напряжения U_0 и с помощью разрядника (GAP) коммутируется на взрываемый проводник (WE).

Основную информацию о процессе взрыва получают из осциллограмм тока и напряжения (рис. 2). Их анализ позволяет выявить отдельные стадии ЭВП. При замыкании цепи разрядником (GAP) ток вначале определяется волновым сопротивлением контура, так как сопротивление проводника очень мало. Поглощая энергию, проводник нагревается, плавится (небольшой скачок на осциллограмме напряжения) и дальше нагревается в жидком состоянии до момента t_1 . С этого момента проводник начинает бурно расширяться по объему, теряет металлическую проводимость, его сопротивление быстро возрастает на несколько порядков, а ток в контуре уменьшается.

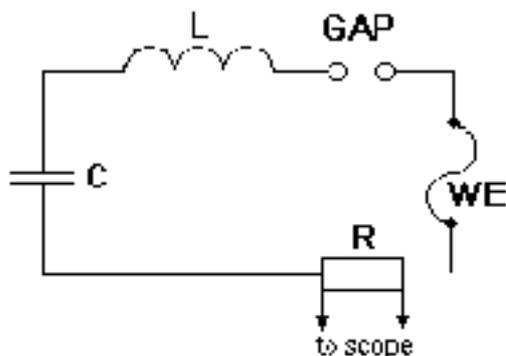


Рис. 1. Электрическая схема электрического взрыва проводников

В 1982 г. Н. А. Яворовскому на совещании Военно-промышленной комиссии было предложено создать опытно-промышленную установку для промышленного производства УДП алюминия. К концу 80-х гг. в институте изготовили уже несколько тонн УДП алюминия. При этом была развернута целая госпрограмма создания морской торпеды нового типа, работающей на УДП алюминия. Окислителем алюминиевого топлива служила забортная морская вода (в среднем соленость морской воды составляет ~3,5 %, в основном это хлорид натрия NaCl). Вступая в реакцию с водой, «горючее» превращалось в оксид алюминия Al_2O_3 , а высвободившийся водород, сгорая, создавал реактивную тягу, в итоге превращаясь в обычную воду. Новые торпеды успешно прошли испытания – их скорость в четыре раза превышала скорость обычных торпед [4].

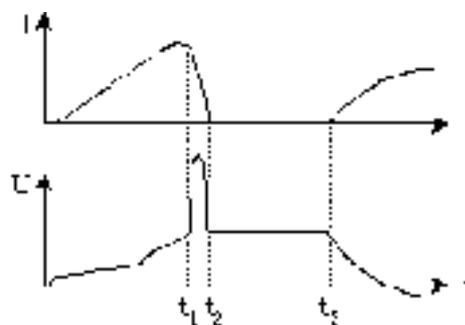


Рис. 2. Осциллограмма процесса электрического взрыва проводников

В 1989 г. комиссия ВПК приняла решение построить в Томске опытный завод по производству УДП алюминия, но по разным причинам этот проект не был реализован.

В связи с этим в результате переговоров Н. А. Яворовского с эстонской фирмой «Сервер» в 1990 г. в Томске была создана научно-внедренческая лаборатория «Элитех» («Электроимпульсные технологии»). За два с половиной года работы «Элитеха» была изготовлена целая серия машин по производству УДП алюминия, и на территории академического Томского института химии и нефти был создан производственный участок, состоящий из двадцати машин типа УДП-4.

Однако в период перестройки работы по производству УДП алюминия прекратились, в связи с чем Н. А. Яворовский ушел из института. После его ухода работы по электровзрывному получению порошков были продолжены под руководством А. П. Ильина и успешно продолжают в настоящее время.

Получением и исследованиями энергетических характеристик нанопорошка алюминия занимаются и другие организации. В ряде лабораторий России, Италии, США и других стран получены положительные результаты по использованию УДП алюминия в перспективных высокоэнергетических топливах.

Так, в работе Горбатенко Т. И. [8] констатируется, что одной из основных задач при разработке перспективных высокоэнергетических материалов для бустерных ракет (бустер – первая ступень многоступенчатой ракеты, стартовый ускоритель) и ускорителей ракетных снарядов является возможность регулирования баллистических ха-

рактических твердых топлив и что в настоящий момент практический интерес представляют топлива со смешанным окислителем перхлорат аммония (NH_4ClO_4)/октоген ($(\text{CH}_2)_4\text{N}_4(\text{NO}_2)_4$), содержащие мелкодисперсный алюминий. Проведенные авторами эксперименты показали, что скорость горения порошка алюминия с размерами частиц $\sim 0,1$ мкм при прочих равных условиях почти в два раза выше скорости горения порошка промышленного алюминия марки АСД-4, размер частиц которого составляет $\sim 1,2$ мкм (в 12 раз больше).

Однако оставалась невыясненной роль ведущего компонента в формировании скорости горения этих топлив.

В связи с этим авторы [9] выполнили исследование по изучению влияния каталитических добавок на термическое разложение и горение топлива на двойном окислителе (перхлорат аммония/октоген), содержащего 15 % УДП алюминия (средний размер частиц 0,18 мкм), полученного электровзрывом проволонок в аргоне, в сравнении с порошком мелкодисперсного алюминия марки АСД4 (средний размер частиц 7,34 мкм – больше в 40,7 раза) с введением ряда добавок, действующих избирательно на исходные компоненты – оксид меди Cu_2O , являющийся катализатором распада перхлората аммония, диоксид свинца PbO_2 – в качестве катализатора распада нитросоединений, а также хлорид олова SnCl_2 , влияющий на процесс горения алюминия, препятствуя образованию нитрида алюминия и увеличивая выход оксида алюминия.

Анализ полученных результатов показал, что скорость горения высокоэнергетических топлив определяется при прочих равных условиях размерами частиц алюминия – в данном случае скорость горения топлива, содержащего УДП алюминия оказалась в 1,9 больше таковой для смеси, включающий алюминий АСД4.

Эти результаты подтвердились в другом исследовании [10]. Для проведения эксперимента были выбраны модельные композиции на двойном окислителе АР-НМХ, содержащие 15 % порошка алюминия АСД4 и УДП алюминия в соотношении 1:1. В качестве горючего-связующего использовался бутадиеновый каучук СКДМ-80. Измерение скорости горения производилось при атмосферном давлении, а также в приборе, заполненном азотом в интервале давлений 0,1...6,0 МПа. В результате проведенных экспериментов было установлено, что скорость горения системы, содержащей УДП алюминия, существенно выше скорости горения смеси с АСД4, что объясняется значительно большей площадью контактов между частицами окислителя и частицами УДП алюминия, чем между более крупными частицами АСД4.

В последние два десятилетия научными коллективами ОКБ «ТЕМП» при Пермском ГТУ, НИИЭМ МГТУ им. Н. Э. Баумана, ГНИИХТЭОС, Тольяттинского ГУ показана возможность создания новых высокоэффективных технических устройств, использующих горение распыленных в активном газе порошков металлов, включая ракетные двигательные установки на порошкообразном топливе [11].

В качестве компонентов топлива для ракетных двигателей космических летательных аппаратов (КЛА) могут быть использованы природные ресурсы тел солнечной системы. В работах Е. Я. Шафировича и У. И. Гольдшлегера (1991) [11] при исследовании Марса предлагается исполь-

зовать ракетный двигатель на металлическом горючем, транспортируемом с Земли, и окислителе – углекислом газе, добываемом из марсианской атмосферы. В соответствии с полученными в последнее время данными, на поверхности Марса присутствует существенное количество воды. Вода (в виде льда) также имеется на спутниках Юпитера, в ядрах комет и на некоторых других космических телах. Воду внеземных объектов также можно использовать в качестве окислителя для ракетного двигателя КЛА.

Проведены термодинамические расчеты топливной пары $\text{Al-H}_2\text{O}$. Разработана схема двигателя на порошкообразном алюминии и добываемом в Космосе окислителе. Проведены расчёты масс и дальностей перелетов для КЛА, использующего такой двигатель.

Предлагаемая двигательная установка может быть создана в ближайшем будущем. Оснащение посадочных ступеней межпланетных КЛА двигателями такого типа дает возможность увеличить объем научных исследований без существенного увеличения экономических затрат по сравнению с двигателями, всё топливо для которых транспортируется с Земли. Накопленный российскими разработчиками научный, технический и технологический опыт облегчает задачу создания ракетного двигателя на порошкообразном металлическом горючем и внеземном окислителе.

Известно [12], что в процессе горения ракетного топлива, содержащего порошкообразный алюминий, частицы порошкообразного алюминия с начальным размером 5–20 мкм в волне горения сливаются и образуют агломераты размером 100–500 мкм, вызывая ряд нежелательных эффектов. В частности, полное сгорание агломератов требует значительного времени, и они не успевают сгореть в двигателе. Кроме того, вследствие инерционности агломераты не в состоянии следовать линиям тока газа и частично оседают внутри ракетного двигателя, что влечет за собой как появление балластной массы, так и возможность повреждения элементов конструкции.

В связи с этим сотрудниками Института химической кинетики и горения СО РАН в содружестве с ФНПЦ «Алтай» выполнены детальные экспериментальные исследования агломерационных характеристик алюминизированных твердых топлив [12] и закономерностей выгорания агломератов [13]. Исследованы десятки топливных композиций, основанных на разных типах горючего-связующего и содержащих перхлорат аммония (ПХА), октоген и гексоген. Варьировали также гранулометрический состав порошкообразных компонентов. В результате была разработана методология оценки агломерационных свойств топлив. Ключевые параметры, характеризующие эти свойства, – массовая доля агломератов в конденсированных продуктах горения, характерный размер агломератов и содержание несгоревшего алюминия в агломератах.

Установлено также, что замена инертного (на основе изопренового каучука) связующего на энергетическое (на основе бутадиен-нитрильного каучука, пластифицированного диэтиленгликольдинитратом) приводит к существенному снижению агломерации.

Замена обычного микропорошкового алюминия на УДП алюминия вызывает увеличение скорости горения

и изменение всех характеристик горения, в том числе и снижение агломерации [14].

Топливо, состоящее из ПХА (окислитель), полибутилена с гидроксильными концевыми группами (связующее) и алюминий-магниевого сплава $Al/Mg = 50/50$ показало практически полное сгорание вследствие чрезвычайно низкой агломерации [15]. Отмечается, что пока эти топлива не нашли применения в военной ракетной технике вследствие меньшей теплоты сгорания магния по сравнению с алюминием, однако в настоящее время интерес к ним возрождается в связи с применением твердотопливных ракет для космических исследований и ужесточением экологических требований.

Таким образом, установлено, что интенсивность агломерации, наряду с традиционно учитываемыми факторами (скорость горения; содержание алюминия; гранулометрический состав перхлората аммония, нитрамина, алюминия), существенно зависит от способа модификации металлического горючего, от природы связующего и от сочетания компонентов. В частности, эффект снижения агломерации при замене инертного связующего на энергетическое может исчезнуть при введении октогена. Полученная совокупность данных может служить основой для построения объективных моделей горения смесового топлива и агломерации алюминия.

Проведены эксперименты с агломератами диаметром 400–540 мкм и 310–350 мкм и определены эмпирические зависимости полноты сгорания алюминия от времени и давления, а также определено соотношение масс оксида, аккумулированного на горящем агломерате, и дымового оксида, ушедшего во внешний поток, в зависимости от степени превращения алюминия [16]. Получен необычный результат – увеличение доли накопленного оксида при горении крупных (400–540 мкм) агломератов, вследствие чего их масса увеличивается по мере выгорания алюминия. Новая информация может быть использована для проведения расчетов горения металла в ракетном двигателе. Кроме того, соотношение масс накопленного и удаленного оксида – один из ключевых параметров для проверки теоретических моделей горения алюминиевой частицы.

Результаты сравнительных испытаний НП алюминия и промышленного микропорошка алюминия с размером частиц около 20 мкм, который широко используется для улучшения энергомассовых и баллистических характеристик высокоэнергетических конденсированных систем, в том числе ракетных топлив, показали [5], что для НП алюминия экзотермический процесс начинается ниже точки плавления алюминия, тогда как микропорошок алюминия не реагирует с кислородом, воздухом или азотом примерно до 1 000 °С. Кроме того, при сгорании в воздушной ударной трубе НП алюминия имел задержку возгорания только 3 м/с, по сравнению с задержкой в 600 м/с для алюминиевого порошка со средним диаметром частиц 3 мкм. В смесях с окислителями НП алюминия показал увеличение скорости детонации от 4 380 до 5 070 м/с, тогда как добавка крупнодисперсного порошка не оказала заметного влияния на эту характеристику. При замене микропорошка алюминия нанопорошком для ряда составов на

основе роста скорости детонации составил 200–300 м/с, а также в ряде зарядов было отмечено возрастание бризантности до 27 %. Применение НП алюминия позволяет улучшить характеристики и гибридных ракетных двигателей. При добавке 10 % НП алюминия к гранулам на резиновой основе, импульс увеличивается на 70 %, а процесс горения становится более равномерным по сравнению с горением гранул без этой добавки.

Библиографический список

1. Краев, М. В. Работоспособность высокооборотных агрегатов подачи энергоустановок перспективных топливных компонентов / М. В. Краев [и др.] / Препринт № 5 ; ИВМ СО РАН. Красноярск, 2007. 36 с.
2. Цандер, Ф. А. Перелеты на другие планеты: (Теория межпланетных путешествий) / Ф. А. Цандер // Пионеры ракетной техники: Кибальчич, Циолковский, Цандер, Кондратюк: избр. тр. М. : Наука, 1964. С. 277–359.
3. Цандер, Ф. А. Из научного наследия / Ф. А. Цандер. М. : Наука, 1967. 100 с.
4. Имамудинов, И. Зигзаг томской молнии / И. Имамудинов // Эксперт. 25.09.2006. № 35. С. 62–67.
5. Котов, Ю. А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников / Ю. А. Котов, Н. А. Яворовский // Физика и химия обработки материалов. 1978. № 4. С. 24–28.
6. Лернер, М. И. Электровзрывные нанопорошки неорганических материалов: технология производства, характеристики, области применения : автореф. дис. ... д-р техн. наук / М. И. Лернер. Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2007. 31 с.
7. Бурцев, В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. М. : Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
8. Горбенко, Т. И. Регулирование баллистических характеристик высокоэнергетических материалов при использовании ультрадисперсного алюминия / Т. И. Горбенко // Решетневские чтения : материалы X Междунар. научн. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006. С. 61–62.
9. Горбенко, Т. И. Термическое поведение и горение высокоэнергетических систем на основе ультрадисперсного алюминия / Т. И. Горбенко, В. Н. Попок, Л. А. Савельева // Решетневские чтения : материалы XI Междунар. научн. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007. С. 168–169.
10. Любинский, Р. Б. Горение топлив на смешанном окислителе с ультрадисперсным порошком алюминия / Р. Б. Любинский, А. В. Пестерев // Решетневские чтения : материалы XI Междунар. научн. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007. С. 187–188.
11. Малинин, В. И. Перспективы применения металлических горючих в ракетных двигателях космических летательных аппаратов / В. И. Малинин, Р. В. Бульбович // Тр. XXV Российской школы по проблемам науки технологий. М. : УРО РАН, 2005. С. 382–384.
12. Глотов, О. Г. Проблемы и перспективы изучения агломерации и эволюции агломератов методом отборов

/ О. Г. Глотов, В. Е. Зарко, В. В. Карасев // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 1. С. 161–172.

13. Глотов, О. Г. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив II. Эволюция частиц при удалении от поверхности горения / О. Г. Глотов // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 4. С. 66–78.

14. Glotov, O. G. Agglomerate and Oxide Particles Generated in Combustion of Al_x Containing Solid Propellants / O. G. Glotov, V. E. Zarko, M. W. Beckstead // Proc. of 31th Int. Annual Conf. of ICT Energetic materials: Analysis, Diagnostics and Testing. Federal Republic of Germany, Karlsruhe, 2000. Report P 130. 14 pages.

15. Hori, K. Study of the combustion residues for Mg/Al solid propellant / K. Hori, O. G. Glotov, V. E. Zarko, H. Habu, A. M. M. Faisal, T. D. Fedotova // Proc. of 33th Int. Annual Conference of ICT Energetic Materials: Synthesis, Production and Application. Federal Republic of Germany, Karlsruhe, 2002. Report P 71. 14 pages.

16. Глотов, О. Г. Закономерности движения и эволюции алюминиевых агломератов в продуктах горения модельного топлива / О. Г. Глотов, В. В. Карасев, В. Е. Зарко, Т. Д. Федотова // Химическая физика процессов горения и взрыва : тр. XII симпозиума по горению и взрыву. Ч. I. Черноголовка, 2000. С. 36–37.

G. G. Krushenko

SUPERDISPERSED ALUMINUM AS HIGH-ENERGY FUEL

The advantages of superdispersed aluminum as high-energy fuel are shown.

Keywords: superdispersed aluminum, high-energy fuel.

УДК 629.19.22

В. Н. Саунин, С. В. Телегин, В. П. Ковалькова

КВАЗИКРИСТАЛЛЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ, СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены особенности структуры квазикристаллических материалов, дано определение квазикристалла. Приведены области применения и способы синтеза квазикристаллических структур, наиболее перспективным из которых является метод плазменного напыления.

Ключевые слова: квазикристаллы, структура, плазмотрон.

Открытие квазикристаллов [1] с икосаэдрической структурой [2] в 1984 г. опровергает некоторые устоявшиеся научные теории и воззрения, касающиеся синтеза новых материалов. Квазикристалл – высокоорганизованная твердотельная фаза, в корне отличная по своим свойствам от кристаллов, стекол и всего, что было известно ранее. Необычайные свойства квазикристаллов, их высокая механическая прочность объясняются отсутствием периодичности структуры, что приводит к замедлению распространения дислокаций по сравнению с обычными кристаллическими материалами. Благодаря уникальным сочетаниям физических свойств, квазикристаллы являются перспективными материалами в изделиях аэрокосмической, ракетной, приборостроительной и энергетической отраслях промышленности. Наиболее перспективно применять их в форме нанообъектов – в виде покрытий, ультрадисперсных наполнителей при создании композиционных материалов и ультрадисперсных модификаторов.

Получение квазикристаллов и квазикристаллических фаз сопряжено с большими скоростями перехода из жидкого или газообразного состояния в твердое. При этом скорость охлаждения при затвердевании находится в интервале температур $10^4 \dots 10^6$ Гр/с.

К одному из наиболее перспективных направлений изготовления изделий из квазикристаллических материалов следует отнести метод плазменного напыления.

В лаборатории аморфных и нанокристаллических материалов «Вулкан» разработана полуавтоматическая установка для напыления квазикристаллических покрытий (рис. 1).

Основным элементом схемы является плазмотрон – источник плазменной струи, на который работают все системы, обеспечивающие заданные параметры напыления, такие как

$T_{\text{ч}}$ и $V_{\text{ч}}$ – температура и скорость частиц над поверхностью детали;

$T_{\text{пс}}$ и $V_{\text{пс}}$ – температура и скорость плазменной струи;

$V_{\text{п}}$ – скорость передвижения пятна напыления;

$V_{\text{пл}}$ – скорость перемещения плазмотрона;

$V_{\text{д}}$ – скорость перемещения поверхности детали относительно плазмотрона;

$T_{\text{п}}$ – температура покрытия.

Основные параметры напыления определяются конструктивными особенностями плазмотрона, системой охлаждения покрытия, атмосферой камеры и зависят от выходных значений вспомогательных систем: $W_{\text{п}}$ – мощности, подводимой к плазмотрону; $G_{\text{пог}}$ – расхода плаз-