

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский центр Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

В.Г.Лекарев

**П Л А З М Е Н Н О Е Н А П Ы Л Е Н И Е
З А Щ И Т Н Ы Х П О К Р Ы Т И Й
П Р И П Р О И З В О Д С Т В Е
Л Е Т А Т Е Л Ь Н Ы Х А П П А Р А Т О В**

Утверждено редакционным
советом института в ка-
честве конспекта лекций

Куйбышев 1983

УДК 621.793.74(075):629.7.102.2

Л е к а р е в Ю.Г. Плазменное напыление защитных покрытий при производстве летательных аппаратов. - Куйбышев: КуАИ, 1983, с.58.

В конспекте лекции изложен опыт применения плазменных покрытий для защиты деталей летательных аппаратов, работающих в условиях интенсивного контактного, коррозионного и эрозийного износа и теплового нагружения. Рассмотрены закономерности генерации плазменной струи, нагрева и ускорения в ней напыляемого материала, осаждения последнего на напыляемую поверхность и формирования из него покрытий. Проведена классификация напыляемых материалов и получаемых из них покрытий, описаны физико-механические и эксплуатационные характеристики покрытий. Рассмотрены особенности технологии и примеры нанесения покрытий на детали летательных аппаратов и их двигателей.

Издание будет полезным для студентов самолетостроительных и моторостроительных факультетов (спец.0535, 0537).

Под ред. канд.техн.наук доц. М.Д.Р у д м а н а

Рецензенты: канд.техн.наук доц. В.А.Н и к о л а е в,
канд.техн.наук А.Н.Б е л о в,
канд.техн.наук. Г.М.З у б р и е н к о,
канд.техн.наук. В.М.П е т р о в а н о в

© Куйбышевский авиационный институт, 1983

В В Е Д Е Н И Е

Основными конструкционными материалами летательных аппаратов и двигателей являются металлы и сплавы на их основе, обладающие устойчивыми высокими удельными и механическими характеристиками в течение продолжительного времени. Повышение эксплуатационных характеристик и разработки более совершенных конструкций летательных аппаратов определяется, главным образом, возможностями создания конструкционных материалов, отвечающих требованиям новой техники, и использования прогрессивной технологии их изготовления. Бурное развитие ракетной, космической и авиационной техники обусловило острую потребность в материалах, работающих в условиях интенсивного механического, эрозионного и коррозионного износа, интенсивного теплового нагружения при высоких температурах, давлениях и скоростях течения газовых потоков и значительных динамических нагрузок. Требования техники удовлетворяются как путем применения новых методов обработки и изготовления, которые улучшают свойства материалов, так и создания новых материалов и сплавов. Очень часто единственным решением ряда важных практических задач является использование покрытий. Нанесение износостойких, жаропрочных, жаротермостойких, теплоизоляционных, коррозионно-стойких, электроизоляционных и других защитных покрытий позволяет получать уникальные конструкционные материалы с эксплуатационными характеристиками, превышающими в комплексе свойства материалов деталей и покрытий в отдельности, и резко увеличить срок службы изделий.

Для придания поверхности деталей требуемых физико-механических свойств при производстве летательных аппаратов нашли применение разнообразные способы соединения покрытий [1]. Электролитический и химический методы, заключающиеся в осаждении покрытий из водных растворов, солей металлов, позволяют получать покрытие из таких металлов, как медь, никель, хром, кадмий, золото, олово, бронза. Методами диффузионного насыщения, при которых покрытие образуется в

результате поверхностного насыщения различными металлами и неметаллами деталей, нагреваемых в контакте с диффундирующим материалом (в твердой и газообразной фазе), получают диффузионные слои с высоким содержанием интерметаллидов, хрома, карбидов металлов, нитридов и т.д. Термовакuumное напыление, заключающееся в конденсации на поверхности обрабатываемой детали направленного потока паров (или ионов) металлов, полученного в результате испарения металлов при нагреве в вакуумной камере, позволяет получать тонкую пленку из разнообразных металлов или химических соединений.

Большими возможностями обладает газотермический способ нанесения покрытий, заключающийся в образовании направленного потока дисперсных частиц распыляемого материала, нагретых до жидкого или пластичного состояния концентрированным источником энергии или несущей газообразной высокотемпературной средой, переносе частиц материала гетерогенной струей до напыляемой поверхности и формировании из отдельных осажденных частиц сплошного покрытия [2] .

Методы газотермического напыления по сравнению с другими способами нанесения покрытий обладают рядом преимуществ:

напылением можно наносить различные покрытия на изделия из самых разнообразных материалов;

равномерное покрытие можно напылять как на большую площадь, так и на ограниченные участки больших изделий;

толщина покрытий может регулироваться от 30 мкм до нескольких миллиметров;

оборудование, на котором производят напыление, является сравнительно простым и мобильным;

используя различные исходные компоненты, можно напылять композиционные покрытия и создавать композиционные материалы различного назначения;

напылением на поверхность удаляемой технологической оснастки можно изготавливать детали сложной конфигурации;

нагрев деталей при напылении можно регулировать, ограничивая в пределах 373–473 К, что позволяет избежать значительных деформаций изделий;

технологический процесс напыления обеспечивает высокую производительность нанесения покрытия и характеризуется относительно небольшой трудоемкостью.

К процессам газотермического нанесения покрытий относятся электродуговая металлизация, газоплазменное и плазменное напыление (непрерывные методы) и детонационно-газовый (импульсный) метод.

Принципиально эти способы различаются по характеру нагрева и переноса частиц распыляемого материала: при электродуговой металлизации источник энергии – электрическая дуга, возбужденная между концами проволок из распыляемых материалов, – служит только для образования расплавленных частиц, а перенос их к напыляемой поверхности осуществляется струей сжатого воздуха; при газоплазменном и плазменном методах нанесения покрытий нагрев и перенос частиц осуществляется высокотемпературной газовой или плазменной струей соответственно; в детонационно-газовом методе используется энергия направленного взрыва газовых смесей для нагрева и разгона частиц напыляемого материала.

Среди указанных способов нанесения покрытий плазменное напыление, являющееся логическим развитием электродуговой металлизации и газоплазменного напыления, – наиболее прогрессивный и универсальный технологический процесс. Применение плазменной струи – высокотемпературного и высокотемпературного источника нагрева – дает возможность наносить покрытие практически из всех известных тугоплавких материалов. Энергетические характеристики плазменной струи регулируются в очень широком диапазоне, что позволяет подбирать их для всего спектра напыляемых материалов – от пластмасс до тугоплавких окислов. Широкие технологические возможности обусловили использование плазменного напыления в различных областях производства летательных аппаратов.

Отсутствие доступной для студентов учебной и научно-технической литературы послужило причиной издания данного конспекта лекций, в которых освещены основные закономерности, технологические возможности и опыт применения процесса плазменного напыления защитных покрытий при производстве летательных аппаратов.

I. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Основными этапами процесса плазменного напыления являются: генерация высокотемпературной плазменной струи, ввод в струю, нагрев, расплавление и ускорение в ней напыляемого материала, осаждение частиц на подложку, формирование из осажденных частиц сплошного покрытия. Частицы, нагретые и расплавленные в струе, при ударе о поверхность подложки деформируются, растекаются и, одновременно затвердевая, образуют слоистое покрытие. В процессе напыления материал покрытия и подложки подвергается сложной обработке. Взаимосвязь между процессами, протекающими на каждом этапе напыления, определяет в конечном счете и эксплуатационные характеристики покрытий.

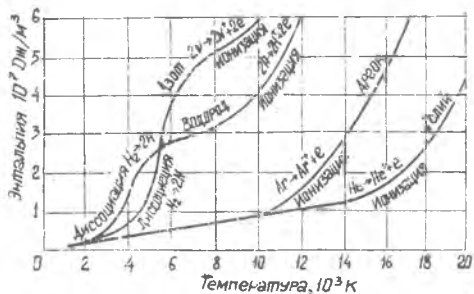
I.I. Генерация гетерогенной плазменной струи

Газ, в котором значительная часть атомов ионизирована, а концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц равны между собой, называется п л а з м о й. Плазма характеризуется высокой температурой, свойства плазмы напоминают свойства газа, жидкости, электролита и металла. Она обладает высокой электропроводностью и взаимодействует с магнитным полем, в том числе и с полем, создаваемым самим плазменным потоком. Энергия частиц, полученная при ионизации и диссоциации, выделяется при рекомбинации одноатомных газов и молизации и рекомбинации двухатомных в атомы и молекулы. Теплосодержание (энтальпия) плазмы определяется теплоемкостью плазмообразующего газа, энергией его диссоциации и ионизации. Ионизации двухатомных газов (N_2 , H_2), в отличие от одноатомных, предшествует процесс диссоциации их молекул, благодаря чему энтальпия плазмы двухатомных газов оказывается значительно выше, чем одноатомных (рис. I). Двухатомные газы обладают также значительно более высокой теплопроводностью при высоких температурах.

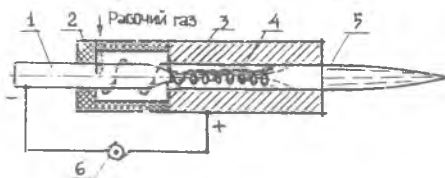
В связи с широким развитием плазменной техники появилось много разнообразных способов ввода энергии в зону генерации плазмы [3], но наиболее распространенным является возбуждение дугового разряда между электродами, что связано с высокой эффективностью преобразования электрической энергии в тепловую, простотой и высокой стабильностью.

Для напыления покрытий используется так называемая сжатая дуга, которая отличается от открытой, применяемой в дуговой сварке, тем, что дуга заключена внутри одного из электродов. Схема генерации плазменной струи приведена на рис.2: дуга 4 возбуждается между стержневым электродом и электродом - соплом 3, разделенными изолятором 2, через который поступает плазмообразующий газ, вытягивающий дугу внутрь канала сопла; на выходе из канала формируется плазменная струя 5. Наибольшая часть энергии дуги расходуется на нагрев газового потока. Шнур дугового разряда сжимается в сопле в результате действия теплового пинч-эффекта, заключающегося в том, что дуга не может расширяться в окружающем ее потоке охлаждающего газа, а также под влиянием магнитного пинч-эффекта, являющегося следствием взаимного притяжения параллельных токов в магнитном поле. Сжимаясь, шнур плазмы отделяется от стенок канала, что приводит к уменьшению потерь на теплопроводность.

Таким образом, плазменную струю получают путем продувания газа через электрическую дугу, обжатую стенками плазмообразующего канала и потоком газа. При обтекании дуги газом между ней и стенками канала сопла располагается слой холодного газа, который стабилизирует дугу вдоль оси канала



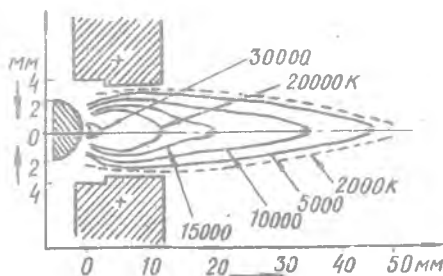
Р и с. 1. Зависимость энтальпии от температуры газа



Р и с. 2. Схема генерации плазменной струи: 1 — электрод-катод; 2 — изолятор; 3 — сопло-анод; 4 — дуга; 5 — плазменная струя; 6 — источник тока

и предохраняет сопло от разрушения. Стабилизация дуги газом может быть аксиальной или тангенциальной: в первом случае газ вводится в дуговую камеру вдоль оси дуги, во втором — по касательной к каналу сопла (см. рис.2). Аксиальный ввод плазмообразующего газа способствует снижению турбулентных пульсаций в плазме, получению ламинарных потоков и повышению однородности подогрева газа по сечению канала. Генераторы плазменной струи — п л а з м о т р о и н ы — с тангенциальным вводом имеют несколько больший термический к.п.д., более высокую эффективность преобразования электрической энергии в тепловую и хорошую пространственную стабилизацию разряда.

Плазменная струя характеризуется высокими теплосодержанием и температурой (рис.3), большой плотностью теплового потока и скоростью истечения. Варьируя конструкцией плазмообразующего канала и режимом генерации струи, можно регулировать в широких пределах параметры последней, причем режим истечения может быть как турбулентный дозвуковой и сверхзвуковой, так и ламинарный.



Р и с. 3. Распределение температуры в плазменной струе (плазмотрон ЗС-1 "Плазмодайн"; плазмообразующий газ — аргон; $G_r = 0,3$ г/с, $I = 400$ А)

разного материала. Плазменная струя с примесью частиц напыляемого материала носит название г е т е р о г е н н о й из-за многокомпонентного и многофазного состава струи, так как в несущую газообразную среду подмешивается окружающий воздух, а напыляемый материал находится в твердом, жидком и газообразном состоянии.

Разнообразные конструкции существующих дуговых плазмотронов подразделяются, в основном, по следующим признакам: по характеру питающего

Напыляемый материал вводится в плазменный поток в виде проволоки и стержней или газовзвеси порошка под углом к оси канала сопла. В первом случае материал первоначально нагревается до температуры образования и отрыва расплавленных частиц, которые затем переносятся плазменной струей, во втором — нагрев и ускорение частиц происходят одновременно с момента поступления порошка в плазменный поток. Наиболее распространенным и универсальным является ввод порошкообразного материала.

тока - на плазмотроны постоянного и переменного тока; по количеству одновременно горящих дуг - на однодуговые, с распределенной дугой, и многодуговые; по способу фиксации длины дуги - на плазмотроны с самоустанавливающейся и фиксированной длиной дуги [3]. В настоящее время для напыления широко используются лишь однодуговые плазмотроны и плазмотроны постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги (длина определяется процессами шунтирования дуги электропроводящей стенкой канала сопла), конструкция которых приведена на рис. 4 (принципиальную схему см. на рис. 2). Состоят из соосно соединяемых через текстолитовый изолятор 7 водоохлаждаемых катодного и анодного узлов.

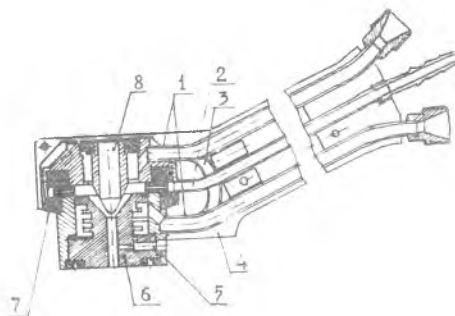
Для обеспечения устойчивой термоэлектронной эмиссии электрод-катод 8 изготавливается из лантанированного вольфрама. Сопло-анод 6 изготавливается из меди, чтобы обеспечить интенсивный теплоотвод из зоны анодного пятна дуги.

Токоподводы I совмещены с магистральями охлаждающей воды и изготовлены из медных трубок. Плазмообразующий газ поступает через штуцер 2 и радиальные и тангенциальные от-

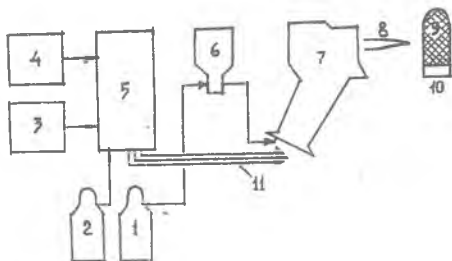
верстия в изоляторе в межэлектродный зазор, который выполнен коническим для обеспечения стабилизации дугового разряда в канале сопла. Радиальное отверстие для подвода газозвеси напыляемого материала 5 расположено вблизи от среза сопла (за пределами дуги), возможно его размещение вблизи от входного конуса сопла в зоне дугового разряда.

В комплект установок для напыления покрытий помимо плазмотрона входят: источник питания, пульт управления, бункер-питатель (дозатор) для образования газопорошковой смеси и подачи ее в плазмотрон, газовые, водяные и токоподводящие магистрали, баллоны со сжатыми газами (рис. 5).

Наиболее распространенные плазмообразующие газы - аргон, азот, водород и их смеси. Чистый аргон по его воздействию на материал



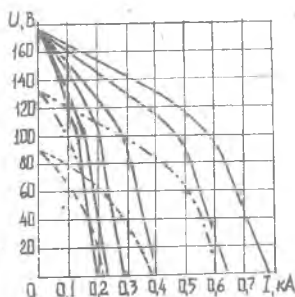
Р и с. 4. Конструкция плазмотрона для напыления покрытий: 1 - подвод тока и охлаждающей воды, 2 - подвод рабочего газа, 3 - перетекатель воды из анодной в катодную часть плазмотрона, 4 - рукоятка, 5 - отверстие подвода напыляемого материала, 6 - медный анод-сопло, 7 - изолятор, 8 - вольфрамовый катод



Р и с. 5. Принципиальная схема установки плазменного напыления: 1 - транспортный газ, 2 - рабочий газ, 3 - охлаждающая вода, 4 - источник питания, 5 - пульт управления, 6 - порошковый питатель, 7 - плазмотрон, 8 - струя, 9 - покрытие, 10 - подложка, 11 - подвод порошка, энергии воды, рабочего газа в плазмотрон

покрытия и подложки является наиболее благоприятным газом. Однако вследствие того, что аргон имеет невысокое теплосодержание и низкую теплопроводность, он применяется, главным образом, при распылении проволоочных материалов. Для напыления порошковых материалов используются смеси аргона с двухатомными газами - водородом, гелием и азотом, а также чистый азот и его смесь с водородом.

Для питания дуговых плазмотронов постоянного тока наибольшее распространение получили источники питания с крутопадающей внешней характеристикой. В настоящее время промышленность выпускает источник питания ИПН-160/600 (рис.6), входящий в комплект установок для плазменного напыления УПУ-3, в котором формирование внешних характеристик и регулирование тока производится с помощью механического перемещения магнитных шунтов, управляющих магнитным потоком в питающем силовом трансформаторе. Достоинствами таких источников является удовлетворительное качество выпрямленного тока, плавный и широкий диапазон регулирования, слабое влияние на форму кривой напряжения питающей сети. Однако, отличаясь сложностью конструкции, они обладают большой инерционностью и практически не поддаются автоматизации с целью стабилизации процесса напыления.



Р и с. 6. Внешние характеристики источника питания ИПН-160/600

носительно начала синусоиды напряжения питающей сети. Изменяя по фазе угол открывания тиристоров, можно регулировать значение выпрямленного напряжения и тока. Выпрямитель, собранный на тиристорах, исклю-

чает необходимость в дополнительных регулирующих силовых элементах (магнитных шунтах, дросселях насыщения). Тиристорный источник питания для плазменного напыления ВПН-600 имеет вертикальную ВАХ и позволяет плавно регулировать ток дугового разряда, что обеспечивает постоянство токовой нагрузки независимо от состава и расхода плазмообразующих газов.

Подбор источника питания для плазменного напыления производится путем согласования вольтамперных характеристик источника и плазмотрона. Для обобщения вольтамперных характеристик используется большое число критериев подобия, полученных в соответствии с дифференциальными уравнениями, описывающими горение дуги в потоке газа [3]. Обобщенную ВАХ для рассматриваемой схемы плазмотрона и аксиальной подачи аргона можно представить в следующем виде:

$$Ud/J = 2,77(J^2/G_r d)^{0,38} (G_r/d)^{-0,27} (\ell/d)^{0,63}, \quad (1)$$

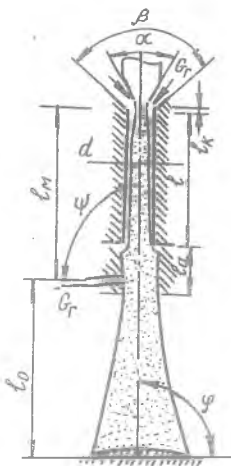
где $J = 45-330$ А - сила тока дуги; $G_r = 0,25-2,0$ г/с - расход плазмообразующего газа; $d = 6-12$ мм и $\ell = 20-160$ мм - диаметр и длина плазмообразующего канала.

Расход подаваемого в плазмотрон порошка регулируется дозирующим устройством, в качестве которого используют инжекторы (расход порошка зависит от расхода транспортирующего газа), вращающиеся вертикальные и горизонтальные барабаны с пазами, шнеками и т.п. Для подачи проволочных материалов в плазмотрон используют механизмы, аналогичные по конструкции механизмам подачи проволоки в сварочных автоматах.

Электроплазменный процесс характеризуется большим количеством параметров (табл. I), которые прямо или косвенно влияют на качество напыленного покрытия [2-4].

Параметры ввода напыляемого материала частично отражены на рис.7, кроме того, в эту группу входят: G_n - расход напыляемого материала; d_n - средний размер (дисперсность) напыляемого материала - твердой примеси; $\epsilon_n = \sqrt{\Delta^2} d_n$ - разброс размеров примеси, где Δ - отклонение от среднего размера частиц порошка. В параметры вывода материала из струи входят следующие: дистанция t_0 и угол φ напыления. К параметрам, характеризующим условия ведения процесса напыления, можно отнести степень автоматизации процесса, давление и температуру окружающей среды и т.д.

В тесной функциональной связи с входными параметрами процесса находятся параметры, характеризующие эффективность процесса напыления: термический к.п.д. плазмотрона $\eta = (J\ell - \Delta t_B)/J\ell$, где ℓ - напряжение дуги, а Δt_B - тепловые потери с охлаждающей водой;



термический к.п.д. процесса $\eta_{пр} = \bar{i}_n / i_{r0}^*$, где \bar{i}_n и $i_{r0}^* = (J\omega - \Delta t_B) / G_r$ - среднe-массовая энтальпия примеси в момент осаждения на подложку и энтальпия плазмы на срезе сопла соответственно; общий к.п.д. процесса $\eta_0 = \eta_{пр} \eta_{и}$, где $\eta_{и}$ - электрический к.п.д. источника; коэффициент использования напыляемого материала $K = G_H / G_n$, где G_H - масса напыленного материала; производительность процесса $q = G_H / \tau$, где τ - время.

Р и с. 7. Схема процесса плазменного напыления: l и d - длина плазмообразующего канала; α и β углы заточки катода и сужения входной части сопла; l_k - зазор между соплом и электродом; l и γ - длина и угол раскрытия выходной части сопла; l_m и ψ - расстояние от электрода до места ввода и угол ввода напыляемого материала; l_0 и φ - дистанция и угол напыления

Описанные параметры процесса генерации гетерогенной струи определяют в совокупности энергетическое состояние частиц напыляемого материала - энтальпию i_{nm} , температуру T_{nm} и скорость V_{nm} частиц, движущихся в присоединенной области плазменной струи, среднe-массовые энтальпию и скорость частиц по сечению струи, температуру напыляемой поверхности $t_{нов}$.

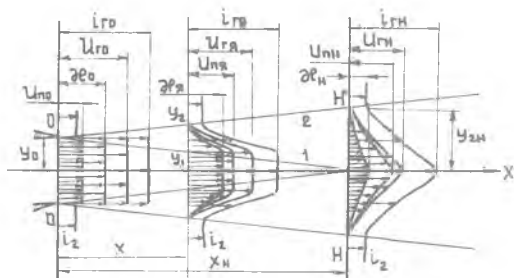
Т а б л и ц а I

Основные параметры процесса плазменного напыления

Параметры генерации гетерогенной и плазменной струи		Выходные параметры процесса	
характеризующие признаки	параметры	параметры эффективности процесса	параметры осаждения частиц
Конструкция плазмообразующего канала	$l, d, \alpha, \beta, l_k, l_0, \gamma$	$\eta, \eta_{пр}$	$t_{нов}, T_{nm}, i_{nm}, V_{nm}$
Режим генерации плазменной струи	Состав газа, J, G_r, U , способ стабилизации дуги	η_0, K	\bar{i}_n, V_n , агрегатное состояние частиц
Ввод напыляемого материала в струю	Вид материала		
Вывод материала из струи	$d_n, \epsilon_n, G_n, l_m, \psi, l_0, \varphi$		
Условие проведения процесса	Степень автоматизации, состав атмосферы, Р и Т		

1.2. Нагрев и ускорение напыляемого материала в плазменной струе

В большинстве способов плазменного напыления струя является основной технологической зоной, знание параметров которой (температуры, скорости и т.д.) дает возможность оценить расчетным методом энергетическое состояние частиц напыляемого материала и обеспечить требуемый уровень качества покрытий. Плазменную струю можно разделить на три характерных участка: начальный (рис. 8), переходный и



Р и с. 8. Схема распространения дозвуковой турбулентной плазменной струи с дисперсной примесью

основной. Нагрев и ускорение напыляемого материала осуществляется, в основном, в пределах канала плазмотрона и начального участка струи. Последний, отсчитываемый от среза сопла 0-0 до границы Н-Н, характеризуется наличием ядра струи (с границами I), в пределах которого температура и скорость постоянны и равны значениям этих параметров на срезе сопла, а также формированием в периферийной области струи слоя смешения (с границами I и 2), в котором происходит радиальный перенос импульса и энергии, а параметры плазменной струи непрерывно изменяются от начальных значений до значений в окружающей среде.

Оценка энергетического состояния напыляемых частиц в пределах начального участка струи возможна с помощью инженерной методики, разработанной в [6,7] на основе аналитических соотношений, описывающих течение дозвуковой турбулентной плазменной струи, и критериевых соотношений теплообмена.

Изменение скорости газовой и дисперсной компонент вдоль оси канала сопла и начального участка струи описывается зависимостями

$$u_{гя} = u_{гв} - \bar{G}(u_{ня} - u_{пв}); \quad (2)$$

$$-4 \left[B - (1 + \bar{G})u_{ня} \right]^{-0,5} \left[0,5(1 + \bar{G})u_{ня} - B \right] / (1 + \bar{G})^2 = DX + C. \quad (3)$$

Здесь $C = 4 \left[B - (1 + \bar{G})u_{пв} \right] \times \left[0,5(1 + \bar{G})u_{пв} - B \right] / (1 + \bar{G})^2$; $B = u_{гв} + \bar{G}u_{пв}$; $D = 7,35 \rho_{гв}^{0,5} / \rho_{пв} d_n^{1,5} \mu_{гв}^{-0,5}$; $u_{гв}$, $u_{пв}$ - скорости газовой компоненты и дисперсной примеси; $\bar{G} = G_n / G_r$; ρ_r , μ_r - плотность и динамическая вязкость газа; индекс В относится к параметрам в сечении ввода примеси в канал, а Я - в произвольном сечении в пределах канала и ядра струи.

Параметры плазмы в сечении ввода порошка в канал сопла могут быть определены (методом итерации) с помощью соотношений $i_{гв}^* = i_{гв}^* + i_{гн}^*$ и $G_r = \pi \rho_{гв} u_{гв} y_0^2$, в которых $i_{гв}$ и $i_{гв}^*$ собственно энтальпия и энтальпия торможения (полная) газа, y_0 - радиус сопла.

Распределение параметров в турбулентном слое смешения характеризуется следующими профилями (см. рис.8):

$$u_r / u_{гя} = u_n / u_{ня} = x / x_{я} = 2\eta^{1,5} - \eta^3 = y_1(\eta); \quad (4)$$

$$i_r / i_{гя} = 1 - (\theta_0 - 1)(1 - \eta^{1,5})^{1,6} / \theta_0 = y_2(\eta); \quad (5)$$

$$\rho_r / \rho_{гя} = \left[1 - (\theta_0 - 1)(1 - \eta^{1,5})^{1,6} / \theta_0 \right]^{-1} = y_2^{-1}(\eta). \quad (6)$$

Здесь $x = \bar{G}u_n / u_r$ - концентрации порошка; $\theta_0 = i_{гв} / i_2$ - степень подогрева газа; $\eta = (y_2 - y) / (y_2 - y_1)$; y_2 , y_1 и y - ординаты внешней и внутренней границы слоя смешения и текущая ордината в произвольном сечении начального участка соответственно.

Положение границ слоя смешения описывается уравнениями:

$$d(y_2 - y_1) / dx = 0,147(A_3 + x_8 A_4)(1 + 0,1 x_{ср}) / (A_1 + k_{ня} x_я A_2)(1 + x_{ср}); \quad (7)$$

$$y_{2н} / y_0 = u_{гв} \sqrt{(1 + \bar{G}k_{пв}) / 2 \cdot [A_2 - A_4 + k_{ня} \bar{G}(A_5 - A_6)]} / u_{ня}. \quad (8)$$

$$\text{Здесь } A_1 = \int_0^1 y_1(\eta) y_2^{-1}(\eta) d\eta; \quad A_2 = \int_0^1 y_1^2(\eta) y_2^{-1}(\eta) d\eta;$$

$$A_3 = \int_0^1 y_2^{-1}(\eta) d\eta; \quad A_4 = \int_0^1 y_1^2(\eta) y_2^{-1}(\eta) \eta d\eta; \quad A_5 = \int_0^1 y_1^3(\eta) y_2^{-1} d\eta;$$

$$A_6 = \int_0^1 y_1(\eta) y_2^{-1}(\eta) \eta d\eta; \quad k_{пв} = u_n / u_r; \quad x_{ср} - \text{определяется}$$

по профилю концентрации для η_{cp} , найденному из уравнения $(\theta_0 - 1)/\theta_0 = (1 - 4 \eta_{cp}^{1.5})/2.4 \eta_{cp} (1 - \eta_{cp}^{1.5})^{0.6} (\eta_{cp}^{0.5} - \eta_{cp}^2) + (1 - 4 \eta_{cp}^{1.5})(1 - \eta_{cp}^{1.5})^{1.6}$.

Условия на срезе сопла (u_{r0} , u_{n0} , i_{r0}) берутся из расчета канального течения, среднемассовая энтальпия газа при этом определяется с учетом затрат на нагрев примеси по соотношению $i_{r0} = i_{r0} - \beta i_{n0}$.

Соотношения (2) - (8) позволяют определить энтальпию и скорость газа, скорость и концентрацию примеси во всем поле течения гетерогенного плазменного потока в пределах канала сопла и начального участка струи, необходимые для оценки термического состояния частиц. Решение уравнений (7) и (8), определение $A_1 - A_6$ и η_{cp} возможно как численным методом, так и с применением метода графического интегрирования. Необходимые для расчета теплофизические свойства газов можно определить из [8].

В расчете температуры и энтальпии примеси используется метод кусочно-линейной аппроксимации, по которому траектория движения частиц разбивается на достаточно большое количество шагов, чтобы в пределах каждого можно было считать постоянными температуру и скорость газа, концентрацию и скорость примеси. Температура поверхности и энтальпия частицы примеси в любой момент от начала теплового воздействия может быть определена по формулам

$$t'' = T_r + 2 \left[t' - T_r \right] \sum_{j=1}^{j=5} \frac{\sin \alpha_j - \alpha_j \cos \alpha_j}{\alpha_j - \sin \alpha_j \cos \alpha_j} \frac{\sin \alpha_j}{\alpha_j} e^{-\alpha_j^2 F_0}, \quad (9)$$

$$i'' = C_n t' + \sum_{z=1}^{z=m} \frac{\beta Nu \lambda_r [T_r - t'']}{\rho_n d_n^2} \tau. \quad (10)$$

Здесь t' и t'' - начальная и конечная температура поверхности частицы на каждом шаге расчета; $F_0 = a_n \tau / r$ - критерий Фурье; a - температуропроводность материала; $\tau = \Delta x / u_n$ - время нахождения частицы в пределах шага расчета Δx ; T_r - температура газа; α_j - корни трансцендентного уравнения $\alpha \cot \alpha = 1 - Bi$; $Bi = \alpha d_n / 2 \lambda_r$ - критерий Био; $\alpha = Nu \lambda_r / d_n$ - коэффициент теплоотдачи; $Nu = 0,75 Re^{0,4} Pr^{0,4} (\rho_r \mu_r / \rho_n \mu_n)^{0,2}$ - критерий Нуссельта [3]; $Pr = \mu_r C_p / \lambda_r$ - критерий Прандтля; C_p и C_n - теплоемкости газа и примеси; индекс П относится к параметрам газа при температуре поверхности частицы примеси.

При $Bi \ll 1$ температурный перепад по сечению частицы практически отсутствует, а при $Bi > 1$ температура поверхности и центра частицы могут существенно различаться. В этой связи оценку терм-

ческого состояния частиц целесообразнее производить по их энтальпии. Следует отметить, что если при движении в канале сопла и ядре струи допускается прямолинейность траекторий частиц и их параллельность оси сопла, то с внутренней границы струи рассматривается уже движение частиц по расходящимся траекториям, связь между которыми устанавливается зависимостью

$$\eta_{f(k)} = \left[1 - y_{f(k-1)} / y_{2(k-1)} \right] / \left[1 - y_{1(k)} / y_{2(k)} \right], \quad (II)$$

где индекс f характеризует принадлежность к траектории, K - порядок расположения сечений от среза сопла. Параметры в каждой точке слоя смещения определяются по $\eta_{f(k)}$ и соответствующим профилям параметров.

Расчет ведется до конца начального участка струи с вычислением среднемассовых значений энтальпии и скорости частиц напыляемого материала:

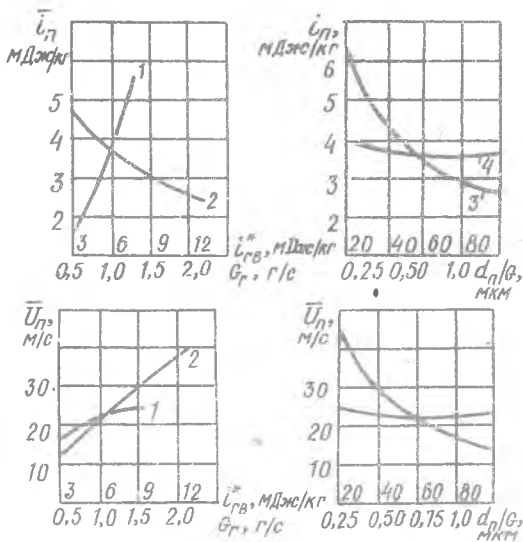
$$\bar{h}_{nn} = \int_0^{y_{2n}} i_{ny} g_{ny} y dy / \int_0^{y_{2n}} g_{ny} y dy, \quad (I2)$$

$$\bar{u}_{nn} = \int_0^{y_{2n}} u_{ny} g_{ny} y dy / \int_0^{y_{2n}} g_{ny} y dy, \quad (I3)$$

где $g_n = \alpha \rho_n u_n$ - удельный весовой расход примеси.

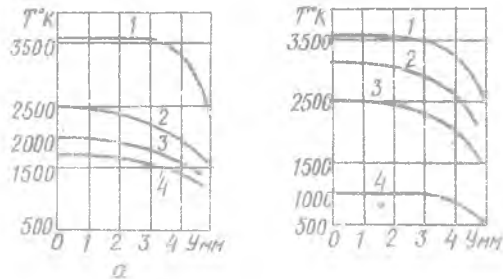
Исследованием, проведенным по изложенной методике для реального диапазона варьирования параметров процесса напыления плазменной струей аргона выявлены факторы, наиболее значительно влияющие на нагрев и ускорение частиц напыляемого материала. Диапазон изменения начальных параметров: i_{*B} - 3...8 МДж/кг; G_r - 0,5...2,0 г/с; \bar{G} - 0,25...1,5; d_n - 20...110 мкм; расстояние от места ввода порошка в канал до среза сопла X_0 - 3...9 мм; примесь - вольфрам и окись алюминия; сопло цилиндрическое диаметром 6 мм. Как видно из результатов (рис. 9 и 10) теплосодержание, температура и скорость частиц в значительной степени зависят от расхода плазмообразующего газа, энтальпии струи, размера частиц и траектории их движения.

Увеличение энтальпии струи за счет повышения силы тока дуги вызывает значительное увеличение нагрева частиц напыляемого материала в результате повышения температуры плазмы, менее заметно возрастает скорость частиц (см. рис. 9, кривые I), так как происходящее при этом повышении скорости плазмы сопровождается снижением ее плотности и вязкости. Существенные изменения в энергетическом состоянии напыляемого материала вызывает регулирование расхода плазмообразующего газа. Увеличение расхода газа при сохранении постоянной энтальпии плазмы приводит к пропорциональному увеличению скорости



Р и с. 9. Зависимость средних массовых энтальпии (а, б) и скорости (в, г) частиц вольфрама в конце начального участка струи от начальных условий истечения струи: а, в - от энтальпии струи (1) и расхода аргона (2) ($d_n = 50$ мкм; $\bar{C} = 1$; 1 - $G_r = 1,0$ г/с, 2 - $i_{гв}^* = 6$ МДж/кг), б, г, - от дисперсности (3) и расхода примеси (4) ($i_{гв}^* = 6$ МДж/кг; $G_r = 1,0$ г/с; 3 - $\bar{C} = 1$; 4 - $d_n = 50$ мкм)

струи, что вызывает аналогичное увеличение скорости частиц, нагрев частиц при этом существенно снижается, так как уменьшается время пребывания порошка в высокотемпературной области струи (см. рис.9, кривые 2). Важным фактором, оказывающим сильное влияние на нагрев и ускорение напыляемого материала, является размер частиц. Энтальпия и скорость снижаются по закону, близкому



Р и с. 10. Профили распределения температуры частиц вольфрама по сечению плазменной струи в конце начального участка; а - в зависимости от дисперсности примеси (d_n , мкм: 1 - 20; 2 - 50; 3 - 80; 4 - 110; $G_r = 1,0$ г/с; $i_{гв}^* = 6$ МДж/кг; б - в зависимости от энтальпии струи ($i_{гв}^*$, МДж/кг: 1 - 8; 2 - 7; 3 - 6; 4 - 5; $d_n = 50$ мкм; $G_r = 1,0$ г/с)

к экспоненциальной зависимости, при увеличении размера частиц (см. рис. 9, кривые 3). Менее заметно влияет расположение места ввода порошка в канал сопла – увеличение расстояния относительно среза сопла вызывает некоторый рост энтальпии и скорости частиц, и практически не зависит энергетическое состояние напыляемого материала от его концентрации в струе (см. рис.9, кривые 4).

Энергетическое и агрегатное состояние напыляемого материала в существенной мере определяется траекторией движения частиц в плазменной струе. Наибольший запас тепла и кинетической энергии приобретают частицы, перемещающиеся в присоевой области струи. Как видно из рис.10, мелкие частицы вольфрама размером в 20 мкм расплавляются полностью ($T_{пл} = 3683 \text{ K}$) лишь в пределах присоевой области аргоновой струи с площадью поперечного сечения, сопоставимой с площадью канала сопла (см. рис.10, кривая I). В периферийных областях струи происходит резкое снижение температуры частиц. Размеры зоны проплавления частиц возрастают при увеличении энтальпии струи (см.рис.10,б, кривая I) и снижении размера напыляемого материала.

Агрегатное состояние частиц порошка в значительной степени зависит также от теплофизических свойств напыляемого материала. При идентичных условиях нагрева в аргоновой плазменной струе температура частиц окиси алюминия Al_2O_3 не достигает температуры плавления последней ($T_{пла\text{Al}_2\text{O}_3} = 2303 \text{ K}$).

В зависимости от рода плазмообразующего газа, его расхода, мощности на дуге и размеров и плотности порошка частицы напыляемого материала в современных установках разгоняются до 50–200 м/с.

1.3. Закономерности осаждения частиц напыляемого материала на подложку

Покрытие в целом можно представить как слоистый материал, состоящий из сильно деформированных напыляемых частиц, соединенных между собой по контактной поверхности сварными участками диаметром D_x (рис.11). Сварные участки составляют часть площади контакта между частицами и поэтому прочность и плотность покрытия ниже значений этих характеристик для компактного материала. Даже при максимальной производительности напыления возможность взаимного термического влияния частиц невелика, т.е. вероятность попадания расплавленной частицы на еще не закристаллизовавшуюся частицу можно не принимать во внимание. Взаимная независимость удара, кристаллизации и остывания частиц на подложке позволяет рассматривать процесс формирования

покрытия как контактное взаимодействие отдельных частиц.

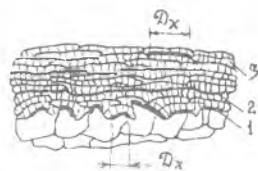
Контактные процессы при ударе, деформации, затвердевании и охлаждении частиц, а также процессы физико-химического взаимодействия материала частиц с плазмой и окружающей средой при движении к подложке обуславливают свойства покрытий. Исходя из такого подхода, в покрытии можно выделить структурные элементы, которые

разделяются границами с определенными свойствами. Границы раздела между покрытием и подложкой определяют прочность сцепления между ними. Граница раздела между слоями, полученными за один про-

ход плазмотрона над напыляемой поверхностью, возникает из-за различной длительности выдержки между нанесением частиц в слое и между слоями. Поверхность покрытия между слоями загрязняется, в результате чего протекание контактных процессов между частицами затрудняется. Часть границы раздела между любыми частицами состоит из площади контактной поверхности в местах схватывания, на которых частицы приварились к подложке или к частицам покрытия. Число сварных участков влияет на механическое и на многие другие эксплуатационные характеристики покрытия.

Сцепление между частицами в покрытии, а также сцепление между подложкой и покрытием (соответственно к о г е з и я и а д г е з и я) возникают в результате действия ряда сил: сил механического зацепления, слабых ковалентных сил взаимодействия (типа сил Ван-дер-Ваальса), химических сил связи. Силы двух первых типов характеризуются нестабильностью, обычно имеют небольшую величину и не принимаются в расчет. Химическое взаимодействие приводит к привариванию частиц. Для успешного протекания химического взаимодействия в контакте между частицей и подложкой необходимо соблюдение таких определенных условий, как обеспечение сближения поверхностных атомов на расстояния, достаточные для межатомного взаимодействия; поддержание в контакте определенной температуры в течение определенного времени.

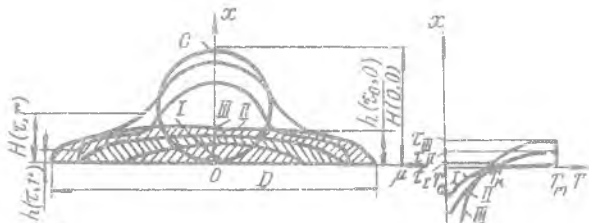
Тепловые процессы при плазменном напылении описываются на основе теории концентрированных источников теплоты с дополнительными представлениями о термическом взаимодействии частиц с подложкой и температуре контакта между напыляемыми частицами. Необходимо отметить существенное различие в нагреве поверхности изделия частицами



Р и с. II. Схема структуры покрытия: 1 - граница между покрытием и подложкой, 2 - граница между слоями, 3 - граница между частицами в слое

напыляемого материала и плазменной струей. В результате теплообменных процессов плазма вызывает последовательное равномерное повышение температуры поверхности. Термический цикл нагрева напыляемым материалом складывается из термических циклов большого числа ударяющихся, растекающихся, затвердевающих и охлаждающихся частиц. Для каждой частицы эти процессы занимают промежуток времени $10^{-3} - 10^{-4}$ с при высокой контактной температуре T_K , которая значительно превышает значение средней температуры поверхности подложки. Именно контактная температура определяет физико-химические процессы, ведущие к прочному сцеплению частиц при напылении и к образованию качественного покрытия.

Термический цикл T_K (τ) сферической частицы, деформирующейся вследствие кинетической энергии удара и затвердевающей на подложке (рис. 12) можно представить состоящим из двух этапов:



Р и с. 12. Распределение температуры в различные моменты времени $t_I < t_{II} < t_{III}$ в системе твердая подложка с температурой T_0 и жидкая частица при температуре плавления T_m : $h(x, r)$ - высота подвижного фронта кристаллизации; $H(x, r)$ - высота свободной поверхности жидкости

затвердевание частицы длительностью t_0 , в течение которой температура в контакте T_K остается постоянной, а над подвижным фронтом кристаллизации $h(x, r)$ находится жидкость; охлаждение затвердевшей частицы до температуры подложки. На стадии затвердевания частицы в контакте поддерживается постоянная температура

$$T_K = T_m K_\Sigma / [K_\Sigma + \Phi(\alpha)], \quad (14)$$

где $K_\Sigma = \lambda_1 \sqrt{a_1} / \lambda_2 \sqrt{a_2}$; $\Phi(\alpha)$ - функция интеграла вероятности; $\alpha = f(K_\Sigma, K_L)$ - корень уравнения $K_\Sigma + \Phi(\alpha) = K_L e^{-\alpha^2/\alpha}$; $K_L = C_n T_m / 1,77L$ - критерий, оценивающий теплоту плавления L материала частицы; индексы 1 и 2 относятся к материалам частицы и подложки соответственно.

Значения α определяются абсциссой точек пересечения кривых

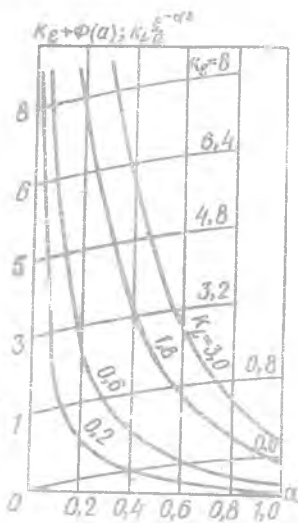
$$\varphi = K_2 + \Phi(\alpha) = \varphi(K_2, \alpha) \quad \text{и}$$

$$\psi = K_1 e^{-\alpha^2/\alpha} = \psi(K_1, \alpha). \quad (\text{рис. 13}).$$

Время, в течение которого частица затвердевает и в контакте сохраняется температура T_K

$$\tau_0 = (h - 2\alpha)^2 / a_1. \quad (15)$$

Температура контакта для большинства сочетаний материалов соответствует твердому состоянию частицы и подложки. Длительность кристаллизации τ_0 составляет $10^{-4} - 10^{-7}$ с. Глубина зоны термического влияния под частицей не превышает нескольких микрометров.



Р и с. 13. Номограмма для определения α

При напылении расплавленные частицы ударяются о холодную подложку, поэтому процессы удара и деформации сопровождаются затвердеванием таких частиц. Эти процессы происходят одновременно. Фронт кристаллизации движется от поверхности подложки в направлении расплавленной частицы. Уже затвердевший материал частицы подвергается давлению со стороны еще не закристаллизовавшегося расплава частицы и является как бы пластичной прокладкой, через которую это давление передается на поверхность подложки. Скорость частиц может составлять несколько сотен метров в секунду, поэтому в зоне удара возникает высокое давление. Как и высокая температура в контакте, давление является движущей силой физико-химического взаимодействия, ведущего к прочному соединению частиц. Давление складывается из напорного давления P_n или динамической составляющей и ударного давления P_u , возникшего вследствие эффекта гидравлического удара. В первый момент соударения в месте контакта с твердой поверхностью жидкая частица упруго деформируется. Только через промежуток времени $\tau_{и1} = 10^{-10} - 10^{-8}$ с в месте удара образуется тонкий плоский слой жидкости растекающейся частицы. Далее частица деформируется равномерно. Возникновение плоского слоя объясняется упругим сжатием частицы в месте удара и давлением P_u , под действием которого во время импульса жидкость интенсивно растекается по поверхности подложки.

Ударное и напорное давление можно оценить по соотношениям

$$P_n = 0,5 \rho_{ж} C u_n \quad (16)$$

и

$$D_n \approx \rho_{ж} u_n^2, \quad (17)$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости; C - скорость звука и жидкости.

При большом ударном давлении ($P \sim 1000-2000$ МПа) поверхность подложки очищается в месте удара, и физический контакт достигается за время 10^{-9} с.

Прочное соединение частицы с подложкой происходит под действием напорного давления на протяжении всего времени деформации и затвердевания частицы и его длительность на 2-3 порядка превосходит длительность ударного давления ($P_n \sim 50-100$ МПа; $\tau_n = 10^{-5} - 10^{-7}$ с).

Взаимодействие материала подложки с материалом частиц покрытия при напылении на каждом элементарном участке поверхности контакта можно разделить на три последовательные стадии: сближение соединяемых веществ до образования физического контакта; активация контактных поверхностей и химическое взаимодействие материалов на границе раздела фаз; объемное развитие взаимодействия.

При напылении вследствие кратковременности взаимодействия частиц с подложкой ($10^{-4} - 10^{-7}$ с) успевают пройти практически только две первые стадии. Диффузионные процессы, ведущие к развитию взаимодействия, обычно происходят только в процессе эксплуатации покрытий при высоких температурах или в результате специально технологического отжига. По существу приваривание частиц определяется главным образом тем, насколько полно происходит химическое взаимодействие. Физический контакт не лимитирует взаимодействия, поскольку расплавленные частицы быстро растекаются и под большим давлением прижимаются к поверхности подложки.

Рассмотрим процесс образования соединения между напыляемыми частицами и подложкой как химическую реакцию на границе раздела фаз. Положим, что все атомы на поверхности частицы со стороны подложки возбуждены благодаря тому, что она нагрета до высокой температуры и интенсивно деформируется на подложке. Тогда скорость реакции можно определить только условиями активации атомов поверхности подложки.

Качественную сторону процесса взаимодействия фаз под частицами можно представить с помощью схемы (рис.14), на которой: E_A - энергия активации перехода из исходного в активированное состояние;

E_0 - повышение исходного энергетического состояния системы внешним давлением P ; E_B - часть энергетического барьера, которая

преодолевается за счет внутренней тепловой энергии системы. Координаты реакции указывают путь от исходного к конечному состоянию реагирующих материалов, который требует затраты наименьшего количества энергии. Поскольку частицы привариваются под действием тепловой и механической энергий, в процессе можно выделить три стадии: локальное повышение активности твердой подложки по действием давления от удара частицы; переход в активированное состояние группы атомов за счет термической активации; распад активированного комплекса, в результате чего образуется новая атомная группировка. Если через n обозначить число атомов, прореагировавших за время τ , то кинетическое уравнение скорости реакции выражается уравнением

$$dn/d\tau = (N_0 - n)\nu \exp(-E_a/RT_k), \quad (21)$$

где N_0 - число атомов на поверхности подложки или на частице, находящейся в физическом контакте; ν - частота собственных колебаний атомов; R - постоянная Больцмана.

Из выражения (21) получим длительность реакции, в течение которой прореагирует N атомов

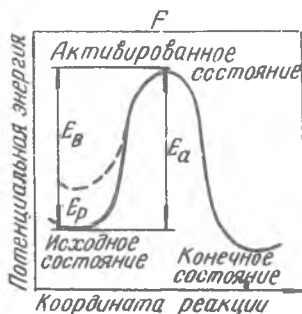
$$\tau = - (1/\nu) \ln(1 - N/N_0) \exp(E_a/RT_k). \quad (22)$$

Развитие реакции в пятне D_x определяют нормированием, исходя из относительной прочности

$$\sigma(\tau)/\sigma_m = N(\tau)/N_0, \quad (23)$$

где $\sigma(\tau)$ - прочность, достигнутая за время τ ; σ_m - максимальная прочность, которую получают при завершении процесса; $N(\tau)$ - число атомов из числа N_0 , прореагировавших за время τ .

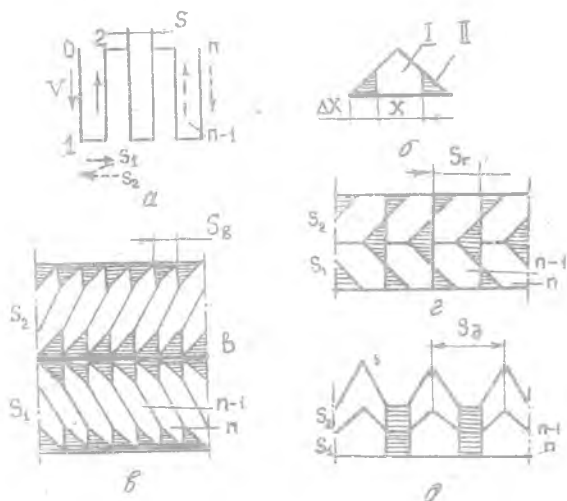
Для большинства случаев напыления металлов на металлы $N/N_0 = 0,6 - 0,8$.



Р и с. 14. Условная схема изменения потенциальной энергии системы атомов материала частиц и подложки в зоне контакта при химическом взаимодействии

1.4. Механизм формирования покрытия

Покрытие, нанесенное неподвижным плазмотроном, имеет форму горки с распределением напыленного материала по ее сечению, подчиняющимся, как правило, экспоненциальному закону. В результате линейного перемещения плазмотрона напыляемый материал оседает в виде металлizationsонного валика (рис.15). Для получения покрытия поперечная подача плазмотрона (шаг сканирующего перемещения) устанавливается таким, при котором происходит взаимное наложение и частичное



Р и с. 15. Схематизированное строение поперечного сечения металлizationsонного валика (б) и покрытий (в-д), напыленных монодисперсным материалом при различных шагах S сканирующего перемещения плазмотрона (а - схема сканирования): I и II - приосевые и периферийные зоны валика; $S_B = \Delta x$; $S_1 = x$; $S_2 = x + \Delta x$; $1, 2, \dots, n-1, n$ - наложенные друг на друга металлizationsонные валики; V - скорость линейного перемещения; S_1 и S_2 - различные сканирующие проходы плазмотрона и соответствующие слои покрытия

перекрытие соседних валиков. Перекрытие обеспечивает образование сплошного покрытия. Напыленный слой покрытия можно характеризовать средней толщиной и волнистостью. Волнистость покрытия зависит от профиля единичного валика в поперечном сечении и от поперечной подачи

плазмотрона. Когда не предъявляется особых требований к волнистости покрытий, поперечную подачу выбирают равной $\sim 1/3$ ширины единичного валика.

Покрытия, получаемые методом плазменного напыления, обладают гетерогенной структурой, основной причиной появления которой является значительное различие в агрегатном и энергетическом состоянии частиц, участвующих в формировании покрытия. Причинами последнего являются неравномерность нагрева и ускорения по сечению плазменной струи и различие в размерах частиц напыляемого материала. В результате покрытие формируется из частиц, существенно различающихся по степени деформации при ударе о напыляемую поверхность, уровню и характеру взаимодействия между собой и подложкой. При определенных условиях проведения процесса напыления гетерогенность структуры принимает крупномасштабный характер – в покрытии образуются зоны, отличающиеся тем, что они сформированы преимущественно из частиц с разным энергетическим и агрегатным состоянием.

В характере осаждения напыляемого материала наблюдаются существенные различия в зависимости от его дисперсности и параметров плазменной струи. При напылении полидисперсного материала (40–315 мкм) происходит расслоение металлизационной фигуры на области, сформированные преимущественно либо из мелких (40–120 мкм), либо из крупных частиц (160–315 мкм). Основной причиной расслоения является сепарация порошка по размерам частиц при движении в струе. Сепарация, т.е. разделение движущегося в объеме струи полидисперсного материала на смещенные относительно друг друга потоки, состоящие преимущественно из либо мелких, либо крупных частиц происходит по следующим причинам. Во-первых, частицы перемещаются в струе по криволинейным траекториям, определяемым, с одной стороны, закономерностями расширения струи, а с другой – радиальной составляющей скорости частиц, появившейся в результате ввода порошка с помощью транспортного газа в плазменный поток под углом к его оси. Величина радиальной составляющей примерно на порядок ниже значения осевой скорости. Во-вторых, ускорение крупных и мелких частиц как в осевом, так и в радиальном направлении различно. Учитывая, что частицы мелких и крупных фракций претерпевают существенно отличное изменение энергетического и агрегатного состояния в плазменной струе (см. рис. 9, 10), структура зон, сформированных из них, сильно отличается. Так, например, частицы мелких фракций нагреваются в струе до расплавления значительной части их объема и в большей степени – в центре струи, чем обусловлено формирование наиболее плотной структуры в центре фигуры, напыленного порошком этого

размера. У частиц крупных фракций расплавляется лишь тонкий поверхностный слой, в связи с чем они плохо осаждаются. Лишь частицы, проходящие через центр струи, нагреваются до состояния, достаточного для закрепления на подложке, о чем свидетельствует чрезвычайная пористая структура центра соответствующих фигур. Процесс сепарации полидисперсного материала сопровождается различным распределением частиц разного размера по сечению струи, которое не описывается универсальным профилем и зависит от параметров плазменного потока. Кроме того, регулирование параметров плазменной струи вызывает различное изменение в нагреве и ускорении частиц мелких и крупных фракций.

Гетерогенность структуры металлизационной фигуры служит основной причиной возникновения крупномасштабной неоднородности в покрытии, схемы формирования которой при сканирующем перемещении плазмотрона приведены на рис.15. Сканирующее перемещение состоит из единичных линейных возвратно-поступательных перемещений с равномерной скоростью, заканчивающихся поперечным смещением плазмотрона на определенный шаг. Металлизационный валик изображен схематично на основе экспериментальных данных и допущения об отсутствии подмешивания периферийных частиц в приосевые области валика: металлизационный валик так же, как и металлизационная фигура, имеет четко различимые зоны, сформированные из центральных или периферийных частиц (и соответственно крупных и мелких частиц при напылении полидисперсного материала). Процесс наложения друг на друга металлизационных валиков, обладающих гетерогенной структурой, сопровождается формированием в покрытии крупномасштабной неоднородности. Анализ упрощенной картины поперечного сечения покрытия, полученной путем последовательного геометрического наложения металлизационных валиков, показывает, что распределение неоднородности в структуре покрытия может носить различный характер в зависимости от шага сканирования и расхода напыляемого материала. Для значений S , сопоставимых с размерами периферийных прослоек валика, характерно возникновение так называемой слоистости покрытия (см. рис.15,в) – формирование слоев и прослоек, расположенных параллельно подложке и состоящих из центральных и периферийных зон металлизационных валиков. При этом первые прослойки (к подложке) образованы из периферийных частиц. Слой и прослойки имеют значительную толщину и непрерывную структуру по их плоскости. Увеличение S (см.рис.15,г) приводит к нарушению плотности слоев и прослоек и обеспечивает выход на границу с подложкой зон, сформированных из центральных частиц. Дальнейшее увеличение шага сканирования

до значений, сопоставляемых с размерами металлизационной фигуры (см. рис.1Б,д), окончательно разрушает слоистость и создает условия для группировки центральных и периферийных зон в вертикальном направлении. Возможность возникновения и толщина прослоек и слоев определяется также концентрацией напыляемого материала в струе. Снижая расход порошка, можно разрушить сплошность слоев и добиться более равномерного распределения неоднородности в структуре покрытия.

1.5. Напыляемые материалы

Материалы для напыления покрытий используются, в основном, в виде проволоки диаметром 0,8...1,2 мм или порошка, преимущественно дисперсностью 40...120 мкм (в отдельных случаях применяется более полидисперсный порошок - 40...315 мкм). Применение проволоки позволяет осуществлять непрерывную и равномерную подачу напыляемого материала в плазматрон, что повышает устойчивость процесса напыления и качество покрытия. Кроме того, только при проволочном напылении достигается полное расплавление напыляемого материала - металл уносится плазменной струей с оплавленного торца проволоки в виде мелкодисперсных жидких капель.

Для плазменного напыления защитных покрытий при производстве летательных аппаратов наибольшее распространение из проволочных материалов получили алюминий, молибден, вольфрам, никель и хромоникелевый сплав (нихром) Х20Н30 (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Физико-химические свойства и область применения
некоторых проволочных материалов

Материал	Плотность ρ_n , 10^3 кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, К	Коэффициент термического расширения α_p , 10^{-6} 1/К	Назначение покрытий
1	2	3	4	5
Алюминий	2,7	933	28,6 (293-873К)	Коррозионно-стойкое; подслой под керамику
Медь	8,9	1366	18,9 (273-1073К)	Электропроводное; подслой под керамику
Никель	8,8	1728	7,2 (273-1473К)	Коррозионно-стойкое в воде и большинстве химических соединений; эрозионно-стойкое; подслои

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Хромоникелевый сплав (нихром, Х20Н80)	8,8	1693		Жаростойкое; коррозионно-стойкое; износостойкое; подслоя
Молибден	10,3	2622	6,8 473-2273К)	Износостойкое; подслоя
Вольфрам	19,3	3387	5,2 298-2273К)	Эрозионно стойкое; жаростойкое в инертной и восстановительной атмосфере; подслоя

В основном чистые металлы и сплавы наносят для создания подслоя промежуточной тонкой прослойки между поверхностью напыляемой детали и основным защитным покрытием подложки для повышения прочности сцепления последнего с подложкой, терможаростойкости и снижения уровня остаточных напряжений. Наиболее высокой прочностью сцепления с подложкой обладают вольфрам, молибден, нихром Х20Н80. Кроме того, покрытие из тугоплавких металлов наносится как основное на поверхность различных изделий с целью повышения их эрозионной стойкости — сопротивления абразивному разрушению твердыми частицами, движущимися с высокой скоростью. При нагревании в окислительной среде вольфрам, молибден, тантал, ниобий и другие тугоплавкие металлы интенсивно окисляются, поэтому покрытия из них могут работать в вакууме и в инертной или восстановительной среде. Молибденные покрытия обладают хорошей износостойкостью. Покрытие из никеля напыляют для получения высокой твердости и коррозионной стойкости поверхности и для защиты последней от эрозии. Широко используют нихром Х20Н80, который практически не окисляется при высокой температуре и хорошо противостоит воздействию кислотной и щелочной среды. Покрытия из нихрома являются типично жаростойкими и коррозионно-стойкими и зачастую используются в качестве подслоя для напыления керамики. Однако Х20Н80 легко растворяется в азотной и серной кислоте и быстро разрушается при высокой температуре в атмосфере, содержащей продукты сгорания керосина (сероводород и сернистый газ). Из всех металлов вольфрам имеет наиболее высокую температуру плавления (см. табл. I), однако интенсивно окисляется при сравнительно невысокой температуре на воздухе.

Более широкое применение находят порошковые напыляемые материалы, что обусловлено относительно низкой стоимостью и простой тех-

нологией процесса получения порошков металлов, керамики, сплавов, химических соединений и различных композиционных материалов, из которых невозможно известными методами изготовить проволоку. К недостаткам порошкового напыления по сравнению с проволочным можно отнести отсутствие полного проплавления порошка (особенно в периферийных областях струи), более высокую пористость покрытий и большее содержание в них окислов, сложность обеспечения постоянства расхода напыляемого материала, низкую производительность процесса напыления.

К порошковым металлическим материалам, используемым для напыления основного защитного покрытия, относятся порошки кобальтовых и никелевых сплавов, включающих хром, вольфрам и железо, обладающих высокой твердостью, которая практически не снижается даже при высоких температурах, износостойкостью и антикоррозионными свойствами. Такие сплавы используют для напыления с добавками бора и кремния, образуя самофлюсующиеся сплавы (табл. 3), покрытия из которых получают без пор, обладают износостойкостью, эрозивной стойкостью, коррозионной стойкостью, стойкостью к окислению при высоких температурах.

Т а б л и ц а 3

Химический состав и твердость некоторых самофлюсующихся сплавов системы $Ni - Cr - B - Si$ [1]

Ni	Cr	B	Si	Fe	C	Другие элементы	Твердость HRC
87,25	5,00	1,00	3,00	3,50	0,25	-	15-20
81,0	11,0	2,00	2,00	2,00	0,30	1,50 C	38
62,45	11,50	2,50	3,25	3,75	0,55	16,00	50-55

Для напыления освоен промышленный выпуск порошков некоторых интерметаллидных материалов (и н т е р м е т а л л и д - химическое соединение металлов друг с другом). Многие интерметаллические соединения могут использоваться в качестве материала для покрытий, предохраняющих различные металлы от газовой коррозии, так как обладают тугоплавкостью, высоким сопротивлением окислению и прочностью сцепления с подложкой. Наибольшее распространение получил алюминид никеля $NiAl$ ($T_{пл} = 1913 K$), который выпускается как в виде готового интерметаллида, так и в виде порошка алюминия, плакированного никелем. В последнем случае никель и алюминий под действием нагрева

в плазменной струе вступают в экзотермическую реакцию, тепло которой, выделяясь на подложке, способствует образованию высокопрочных связей покрытия с подложкой. Это достоинство послужило одной из причин широкого использования никель-алюминиевого плакированного порошка для напыления подслоя на детали, изготовленные из различных конструктивных материалов.

К керамике обычно относят такие соединения, как окислы металлов, бориды, нитриды, силициды, карбиды и др. Керамика является тугоплавким материалом. Наиболее широко используют для напыления окись алюминия Al_2O_3 , двуокись циркония ZrO_2 , карбиды вольфрама WC , хрома CrC_2 и титана TiC (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Физико-механические свойства и область применения некоторых тугоплавких керамических материалов [1, 3, 5]

Материал	Плотность $10^3 \rho_{пл}, \text{кг/м}^3$	Температура плавления $T_{пл}, \text{K}$	Теплопроводность $\lambda_{пл}, \text{Вт/м K}$	Коэффициент терморасширения $\alpha_p, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Назначение покрытия
Окись алюминия Al_2O_3	3,96	2303	2,39 (1473 K)	8,0 (293-1853K)	Теплоизоляционное, теплоустойчивое при высоких температурах
Двуокись циркония	5,56	3123	2,05 (1473K)	5,5 (293-1473K)	Теплоизоляционное, устойчивое при тепловых ударах
Карбид вольфрама	15,57	3140	45,3 (1273K)	6,2 (298-1073K)	Износостойкое, эрозивно стойкое
Карбид хрома	6,7	2163	21,0 (293K)	8,6 (293-473K)	Износостойкое, жаростойкое при высоких температурах
Карбид титана	4,25	3140	39,7 (1273K)	10,6 (297-755K)	Износостойкое, жаростойкое при температурах до 1023K

По сравнению с другими высокотемпературными материалами окислы имеют наиболее низкую электротеплопроводность и значительную прочность при высоких температурах. Не все окислы при высоких температурах являются химически устойчивыми, например, в восстановительной среде при высокой температуре окислы таких металлов, как хром, кобальт, никель и титан легко восстанавливаются и превращаются в

металлы или низшие окислы с невысокой температурой плавления.

Покрытия из чистой окиси алюминия обладают хорошими теплоизоляционными свойствами и являются устойчивыми при высоких температурах. Высокая твердость, низкий коэффициент трения и химическая устойчивость покрытий из Al_2O_3 позволяют применять их в качестве износостойких материалов. Основной недостаток — хрупкость и низкая механическая прочность, особенно при ударных нагрузках. Покрытия из Al_2O_3 , содержащие в твердом растворе небольшое количество окиси титана TiO_2 , отличаются большей пластичностью и стойкостью к удару, хорошей износостойкостью.

Покрытия из стабилизированной двуокиси циркония ZrO_2 (предварительный обжиг ZrO_2 совместно с добавками CaO производится с целью исключения модификационных превращений кристаллической решетки ZrO_2 при нагреве и охлаждении) обладают большой стойкостью к тепловым ударам, высокой жаростойкостью и очень низкой теплопроводностью.

Бориды тугоплавких металлов имеют высокую температуру плавления и обладают значительной твердостью, однако в окислительной среде при 1573–1773 К нестойки. В нейтральной и восстановительной атмосферах, а также в вакууме бориды используют как жаропрочные материалы. Интерес к таким покрытиям возрос с развитием космонавтики.

Температура плавления карбидов металлов значительно выше температуры плавления самих металлов. Большинство из карбидов обладают высокой жаростойкостью. Даже при высоких температурах их механические характеристики изменяются незначительно. Почти все карбиды обладают хорошей тепло- и электропроводностью. Карбиды бора, кремния, титана, хрома и вольфрама характеризуются высокой твердостью. Их широко используют в качестве износостойких материалов.

Карбид вольфрама WC обладает очень высокой твердостью (микротвердость при нагрузке 50 г составляет $24 \cdot 10^3$ МПа). Из чистого WC трудно получить покрытие, так как при напылении он легко разлагается на W_2O и C . Поэтому используют смесь WC с металлами типа кобальта или порошок WC , плакированный Co (Ni). Карбид вольфрама вводят в самофлюсующиеся сплавы (от 30 до 80%).

Кроме возможности получения покрытия из различных материалов — металлов, сплавов, окислов, карбидов и т.д., плазменное напыление позволяет формировать покрытие из сочетаний материалов, которых трудно добиться другими способами, например: графит-металл, керамика-металл. Нанесение покрытий из смесей двух или нескольких материалов получает все большее распространение и при создании покрытий

на летательных аппаратах. Если смешиваются металлы и сплавы, то покрытия называются псевдосплавами, если смешиваются окислы (керамика) с металлами, то покрытия имеют название к е р м е т о в. Применение таких смесей существенно повышает работоспособность покрытий – термостойкость, ударную вязкость, коррозионную стойкость, износостойкость и т.д. Созданы различные технологические варианты напыления композиционных покрытий: метод напыления механической смеси компонентов, использование для напыления порошка механической смеси компонентов, гранулированной на каком-либо связующем веществе; способ напыления частиц, состоящих из ядра основы, окруженного плакирующим слоем второго компонента (плакирующий слой наносится либо химическим осаждением, либо вакуумным испарением).

Примерами композиционных материалов для плазменного напыления покрытий служит смесь 70% Al_2O_3 + 30% $NiAl$ – для нанесения жаро-, износо- и термостойких покрытий, смесь 75% $X2ON8O$ + 25% BN – для нанесения срабатываемых уплотнительных покрытий в газотурбинных двигателях, смесь 75% WC + 12% (Co + Ni) + самофлюсующийся сплав – для нанесения тонких, твердых, самоплавляющихся покрытий с высокой износо- и термостойкостью и т.д.

Материалы для покрытий выбирают, исходя из условий эксплуатации и оценки работоспособности.

1.6. Основные физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики напыленных покрытий

Плазменное покрытие является своеобразным материалом, полученным в результате удара, деформации и чрезвычайно быстрой кристаллизации небольших частиц материала, напыляемого на подложку. Последовательно накладываясь друг на друга, частицы образуют чешуйчатое, слоистое покрытие с анизотропией физических и механических свойств, неоднородное в структурном и химическом отношении, которое характеризуется развитой поверхностью стыков между частицами и повышенным содержанием окисных включений, особенно по границам частиц и отдельных слоев. Контактные процессы при ударе, деформации, затвердевании и охлаждении частиц, а также процессы физико-химического взаимодействия их с плазмообразующими газами и окружающей средой при движении к подложке определяют структуру и свойства покрытия. В покрытии можно выделить ряд структурных элементов, которые имеют границы раздела

с определенными свойствами (см. рис. II).

При напылении частицы материала покрытия закаляются; в них могут сохраняться высокотемпературные фазы и растворенные при высоких температурах газы. При затвердевании частиц эти газы частично выделяются с образованием закрытых и открытых пор. Газонасыщение происходит в результате взаимодействия напыляемого материала с плазмой и окружающей средой. Несмотря на небольшое время взаимодействия ($\sim 10^{-3}$ с), покрытия могут сильно насыщаться газами. В результате быстрой кристаллизации частиц можно получать в покрытии метастабильные структуры-пересыщенные твердые растворы. Этот процесс наиболее четко реализуется при напылении сплавов, легированных элементами в количествах, превышающих предел растворимости их в основном металле в твердом состоянии и имеющих неограниченную растворимость в жидком состоянии. Расплавление и перегрев металла при распылении в плазме приводит к образованию гомогенных расплавов, а кристаллизация перегретых частиц за 10^{-5} - 10^{-7} с - к фиксации метастабильных структур покрытий.

Таким образом, физико-механические свойства покрытия могут в существенной мере отличаться от характеристик исходного напыляемого материала. Выбор состава покрытия и технологии его нанесения может быть сделан лишь на основе определения комплекса физико-механических и эксплуатационных характеристик напыленного материала.

Плотность и пористость - основные свойства покрытия, по которым можно косвенно судить о его качестве. Пористость покрытия существенно влияет на служебные свойства и, в первую очередь, на коррозионные свойства в газах и жидкостях, на электроизоляционные свойства и т.д. В открытые поры протекают газ, агрессивная жидкость. С другой стороны, наличие пористости позволяет антифрикционным покрытиям, пропитанным смазкой, длительное время работать без заедания и износа и после прекращения подачи масла.

Связь покрытия с подложкой является важнейшей характеристикой покрытия. Известен ряд методов определения прочности сцепления покрытия с подложкой, позволяющих получить как качественные, так и количественные оценки этой характеристики покрытия. Наиболее распространен метод отрыва двух склеенных бобышек, на одну из которых нанесено покрытие. Некоторые оценочные данные по прочности сцепления покрытий с подложкой (абразивно-струйная обработка подложки перед напылением) приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5
Прочность плазменных покрытий

	Покрытие							
	Mo	W	Al	Al-Ni (80%)	Ni-Cz (20%)	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Ti-C-Ni (35%)
Подложка	Ст.3	Ст.3	Mg+	Ma+	Ст. 3	BT-5	БрХ01	Ал 25
Прочность сцепления, МПа	20	22	+6%Al+ +1%Zn	+6%Al+ +1%Zn				
			44	84	36	38	15	30

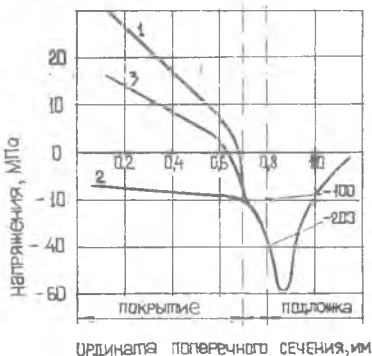
Прочность напыленных металлических покрытий не превышает 10-60 МПа, что на порядок ниже прочности металлов. Основными причинами такого снижения является следующее: суммарная площадь контактов с прочным соединением составляет лишь часть всей контактной площади; прочность в пятне приваривания ниже прочности компактного материала, что обусловлено дефектностью зоны соединения; покрытия имеют значительную пористость; в покрытии формируется большие остаточные напряжения, которые могут достигать значений, при которых происходит самопроизвольное отслоение покрытия.

Остаточные напряжения являются следствием термических условий напыления, различия теплофизических свойств материалов подложки и покрытия, фазовых превращений и других причин. Они возникают после остывания нанесенного слоя покрытия при макротермических циклах в пятне напыления в результате действия нагретого газа и всей массы расплавленных частиц, а также при микротермических циклах под каждой закристаллизовавшейся частицей. Остаточные или внутренние напряжения в твердом теле принято классифицировать по тем объемам, в которых они уравновешены: напряжения I рода свойственны макрообъемам тела; напряжения II рода возникают при локальной неоднородности деформации отдельных зерен, часть которых может оказаться растянутыми, часть - сжатыми; напряжения III рода действуют в пределах отдельных зерен и являются следствием неодинакового расстояния между атомами решетки. Из-за особенностей формирования покрытий при напылении в них действуют напряжения всех видов. Уровень этих напряжений высокий, поскольку вызван ударом, деформацией, неравновесной кристаллизацией, фазовыми превращениями и другими интенсивными процессами взаимодействия напыляемых частиц. Из-за чрез-

вычайно короткого времени взаимодействия и отрывания невозможна релаксация напряжений как в самих частицах, так и по границе между ними в период образования покрытия. Поэтому высокий уровень остаточных напряжений сохраняется в покрытиях и после напыления. Причиной разрушения большинства покрытий являются напряжения I рода, оцениваются они экспериментально - расчетным методом. На рис.16 приведен пример распределения остаточных напряжений в системе покрытия X20H80 - CaF₂ - подслое X20H80 - подложка X18H9T при напылении аргонно-водородной плазменной струей с различным содержанием водорода в плазмообразующем газе. Как видно, регулируя режим генерации струи, можно существенно повлиять на характер распределения остаточных напряжений в напыленном покрытии. Исходя из конкретных условий работы детали с покрытием необходимо заранее определять требования к знаку и уровню остаточных напряжений. Наиболее безопасными для покрытий являются напряжения сжатия.

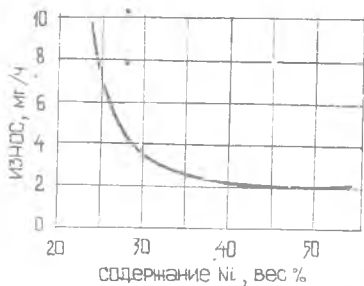
Известны технологические приемы, позволяющие регулировать остаточные напряжения в покрытиях: согласование коэффициентов термического расширения покрытия и подложки; регулирование распределения тепловой мощности по пятну нагрева; снижение модуля упругости покрытия за счет добавок пластичного материала; использование подслоев между подложкой и покрытием, обеспечивающих плавный переход свойств от материала подложки к материалу покрытия; применение многослойных покрытий с чередованием слоев из различных материалов; армирование покрытия непрерывным и дискретными волокнами и т.п.

Модуль упругости E и коэффициент термического расширения α_p являются важными характеристиками, используемыми для оценки остаточных напряжений. Кроме того, значения E используются в расчетах на прочность, жесткость и термостойкость элементов конструкции.



Р и с. 16. Распределение остаточных напряжений в покрытии X20H80 - CaF₂, подслое и подложке в зависимости от содержания водорода в плазмообразующей аргонно-водородной газовой смеси ($I = 400$ А; $G_p = 1,4$ г/с) в об.-%: 1 - 8,3; 2 - 15; 3 - 21,7

Износостойкость покрытий выше износостойкости компактного исходного материала, что обусловлено специфической структурой напыленного материала. Покрытие состоит из большого числа слоев напыленных частиц, твердость которых может превышать твердость исходного напыляемого материала, тогда как общая твердость напыленного материала вследствие его пористости не является высокой. В материале покрытия по сравнению с исходным напыляемым материалом содержится много окислов, которые располагаются по границам зерен в виде тонких пленок. Равномерное распределение твердых соединений в материале покрытия обеспечивает высокую износостойкость, для повышения которой в напыляемый материал вводят порошки твердых соединений типа карбидов металлов, получая таким образом композиционные покрытия. Для оценки износостойкости проводят испытание износа трущейся пары материалов по различным методикам, наиболее распространенной из которых является схема трения колодки, прижатой по образующей к вращающемуся диску. На рис. 17 приведены результаты испытаний по указанной схеме покрытия $TiC-Ni$, из которых видно, что, регулируя соотношение между компонентами в исходном материале, в частности, содержание



Р и с. 17. Зависимость износа покрытий $TiC-Ni$ от содержания плакирующего никеля в напыляемом материале

матричного металла, можно добиться значительного повышения износостойкости покрытия.

В первом приближении износостойкость (для срабатываемых уплотнительных материалов - приработываемость при врезании контртела) может быть оценена по твердости. Твердость некоторых напыленных материалов, определение которой осуществляется традиционными методами на покрытиях толщиной не менее 1,0-2,0 мм, приведена в табл. 6. Здесь же приведены значения пористости исследованных пок-

рытий, так как она существенно влияет на результаты твердости.

Т а б л и ц а 6

Твердость и пористость плазменных покрытий

	Покрытие							
	<i>Ni-Cr B-Si</i>	<i>Mo</i>	<i>W</i>	<i>ZrO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>TiC-Ni (35%)</i>	<i>Cr₃C₂-Ni (30%)</i>	
Твер- дость	<i>HRC</i> 60	<i>HRC</i> 34	<i>HRA</i> 50	<i>HRB</i> 96	<i>HRC</i> 55	<i>HR15T</i> 93	<i>HR15T</i> 87	Шкала Число
Порис- тость	3	II	I4,5	9	I7	I2	7	%

Жаростойкость и термостойкость, а также теплоизоляционные свойства являются важными эксплуатационными характеристиками напыленных покрытий. Жаростойкие и теплоизоляционные покрытия имеют различные структуры. Для повышения жаростойкости необходимо напылять плотные покрытия, имеющие хорошую теплопроводность для отвода теплового потока. Скружающая атмосфера не должна проникать в такие покрытия. Напротив, для получения хорошего теплоизоляционного покрытия необходимо напылять пористый материал, обладающий низкой теплопроводностью, но в таком покрытии возможна коррозия основы и разрушение связи покрытия с основой. Для работы в условиях, характеризующихся частыми тепловыми ударами, также подходят пористые покрытия.

Основными параметрами, определяющими жаростойкость покрытия, являются температура плавления материала, пористость и газопроницаемость. Оценивается жаростойкость по привесу окисленного материала в результате его выдержки при заданной температуре на воздухе. Термостойкость определяют по количеству теплосмен "нагрев до заданной температуры - охлаждение" до разрушения покрытия.

Основными факторами, влияющими на теплозащитные свойства покрытий, являются теплопроводность и толщина покрытия. Передача теплоты в покрытиях определяется их слоистым строением, присутствием большого числа пор, трещин и границ раздела между частицами и осуществляется электронно-фононной теплопроводностью в частицах и по участкам приваривания, теплопроводностью газа и лучистым теплообменом в порах. Поскольку границы раздела между частицами не полностью заполнены участками сварки, а теплопередача в порах происходит медленно, суммарная теплопроводность покрытия много ниже, чем у компактных мате-

риалов. Наиболее эффективными материалами для теплозащитных покрытий являются керамика и керметы. Значения теплопроводности напыленных оксидов приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Теплопроводность напыленных Al_2O_3 и ZrO_2 , Вт/м·К

Температура испытания, К	Al_2O_3 пористостью, %				ZrO_2 , пористостью, %
	0 (спечен- ный материал)	7	14	17	13
373	30,1	24,1	21,0	19,6	1,2
873	8,4	7,2	6,7	6,6	1,3

В ряде случаев важными параметрами напыленного покрытия помимо приведенных основных характеристик являются его газопроницаемость, коэффициент термического расширения, излучательная способность, электрическое сопротивление и т.д.

2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ НАПЫЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Технологические приемы и методы регулирования свойств покрытий условно можно разделить на термические и химические [2]. К термическим, позволяющим повысить качество покрытий, относятся следующие основные методы: повышение энтальпии частиц либо за счет их перегрева путем повышения энтальпии струи, увеличения размеров последней и применения высокоэнтальпийных газов, либо за счет использования экзотермических реакций в частицах напыляемого материала; повышение температуры подложки за счет либо предварительного подогрева изделия, либо подогрева плазмой в пятне напыления; изменение теплофизических свойств и структуры поверхности подложки за счет абразивно-струйной обработки или химического травления последней, напыления легкоплавких подслоев. К основным химическим методам относятся: понижение энергии активации взаимодействия E_a за счет увеличения скорости частиц, применения подслоев с низкой энергией в решетке или образующих в контакте эвтектику; напыление твердых порошков в легкоплавкой оболочке; повышение активности поверхности подложки

струйно-абразивной или другой механической обработкой.

С технологической точки зрения процесс плазменного напыления покрытий состоит из следующих операций: предварительная подготовка поверхности изделия под покрытие, собственно процесс плазменного нанесения покрытия и по необходимости последующая обработка нанесенного покрытия.

2.2. Подготовка подложки под напыление

В качестве подготовительной операции перед напылением широко применяется абразивно-струйная обработка поверхности подложки. Такая подготовка очищает поверхность и выводит ее из состояния термодинамического равновесия со средой, освобождая межатомные связи поверхностных атомов, т.е. химически активирует подложку. Однако активность подложки быстро снижается из-за химической адсорбции газов из атмосферы и окисления. Кроме того, обработка делает поверхность шероховатой, это приводит к увеличению температуры в контакте под напыляемыми частицами на выступах шероховатости и повышает суммарную площадь $\sum F_x$ участков приваривания. Шероховатая поверхность имеет большую площадь по сравнению с гладкой, что также способствует увеличению прочности сцепления.

В связи с рядом технических неудобств, свойственных абразивно-струйной обработке, ее иногда заменяют химическим травлением, которое также делает поверхность металла шероховатой и сильно развитой. Однако химическое травление поверхности подложки требует применения специальных травителей. Неправильный подбор травителя может вызвать пассивацию поверхности и привести к снижению прочности сцепления.

Вследствие абразивно-струйной обработки поверхностный слой подложки насыщается структурными дефектами и приобретает аномальные физико-химические свойства. Так, скорость диффузии в поверхностном слое металла возрастает на несколько порядков, что оказывает сильное влияние на диффузию в контакте между материалом покрытия и подложки, т.е. интенсифицирует третью стадию процесса образования соединения. Высота образующихся микронеровностей может быть различной у материалов с отличающимися механическими свойствами. При обработке изделий из коррозионно-стойкой стали типа 12Х18Н10Т высота микронеровностей, например, составляет 50...70 мкм, а при обработке изделий из алюминиевого сплава АМГ-6 - 80...120 мкм. При абразивно-струйной обработке поверхности изделия возможно некоторое ее загрязнение внедренными частицами абразивного материала. Для обработки поверхности тонко-

стенных изделий лучше всего применять электрокорунд, который меньше загрязняет и меньше деформирует изделие. При обработке поверхности изделий из сталей, титановых и других сплавов для нанесения коррозионно-стойких покрытий целесообразно применять порошок из коррозионно-стойкой стали, карбида кремния или электрокорунда.

После обработки поверхности рекомендуется как можно быстрее нанести покрытие. Перерыв между операциями подготовки подложки и напыления покрытия при обработке крупногабаритных изделий должен быть не более 1-2-х часов. Непосредственно перед нанесением покрытия напыляемую поверхность необходимо промыть ацетоном и спиртом для удаления возможных следов влаги и масла.

Для деталей типа тел вращения при нанесении покрытий значительной толщины ($> 0,5$ мм) распространенным способом подготовки поверхности является нарезание "рваной" резьбы.

При нанесении защитных покрытий на детали летательных аппаратов зачастую из конструктивных соображений исключается применение абразивно-струйной обработки (например при нанесении покрытий из тугоплавких окислов на тонкостенные оболочки из Х18Н10Т толщиной 0,5 мм). В таких случаях наносят подслои из материалов с высоким теплосодержанием частиц в расплавленном состоянии (W , Mo) или из материалов, в которых в процессе напыления происходит экзотермическая реакция с выделением теплоты (нанесение покрытий из термореагирующих порошков). Частицы вольфрама и молибдена после пребывания в плазменной струе (проволочный вариант) имеют запас энергии, достаточный для термической активации и обеспечения надежного сцепления покрытия с металлическими подложками без специальной подготовки поверхности (исключая медь и ее сплавы). Однако и вольфрам, и молибден интенсивно окисляются при температурах 573-673 К, а их окислы "разрыхляют" покрытие. Одним из перспективных материалов для подслоя является термореагирующий никель-алюминевый порошок (содержащий 70-80% Ni), представляющий собой порошок алюминия, плакированный оболочкой из никеля. Особенностью нагрева частиц $NiAl$ в плазменной струе является повышенное тепловыделение (сопоставимое с энтальпией частиц W и Mo) на дистанции от среза сопла порядка 160-200 мм, обусловленное протеканием экзотермической реакции образования алюминида никеля. Подслой - покрытие из алюминида никеля обладает высокой жаротермостойкостью при температуре 1323 К и высокой прочностью связи с подложкой из различных материалов, а также высокой коррозионной стойкостью. Применяется при нанесении различных покрытий - из окислов, карбидов, керметов и других композиционных материалов.

2.2. Выбор режима напыления.

Из возможных путей регулирования свойств напыленных покрытий – изменение энтальпии и скорости частиц, температуры подложки, теплофизических свойств и структуры подложки и т.п. – при нанесении покрытий на узлы летательных аппаратов наиболее приемлемыми являются абразивно-струйная обработка напыляемой поверхности, нанесение на нее подслоя и воздействия на энергетическое состояние напыляемых частиц. Струйная обработка и напыление подслоя обеспечивают достаточную прочность сцепления покрытий с подложкой. Отдельные узлы летательных аппаратов, сложные по своей конфигурации и методам изготовления, зачастую исключают предварительный подогрев подложки, в связи с чем регулирование свойств покрытий за счет варьирования параметров процесса на стадии собственно напыления возможно, в основном, за счет изменения энтальпии и скорости плазменной струи, состава плазмообразующего газа, дистанции напыления, дисперсности порошка.

Для напыления низкотеплопроводных материалов (ZrO_2 , Al_2O_3 и т.п.) целесообразно использовать смесь азота с водородом (5–10 об.% H_2), аргона с азотом (до 50 об.% N_2) или аргона с водородом (10–15 об.% H_2). Последний состав используют также при напылении материалов, склонных к активному взаимодействию с азотом. Для увеличения времени пребывания частиц напыляемого материала в высокотемпературной зоне струи используют также ввод порошка в столб дугового разряда и различные способы удлинения высокотемпературной зоны за счет применения разнообразных защитных насадков, устанавливаемых на срезе сопла плазмотрона. Напыление ведут на дистанции 100–200 мм от подложки, а изделие охлаждают сжатым воздухом.

В случае напыления металлов и материалов с хорошей теплопроводностью (например карбидов) имеется большая свобода выбора режима напыления, однако и тогда предпочтительно напыление с использованием длинных плазменных струй со сравнительно невысокой температурой. В таких условиях испарение и диссоциация материала происходят медленнее и повышается коэффициент использования материала.

На основании опыта напыления можно рекомендовать режимы нанесения различных материалов, приведенных в табл. 8.

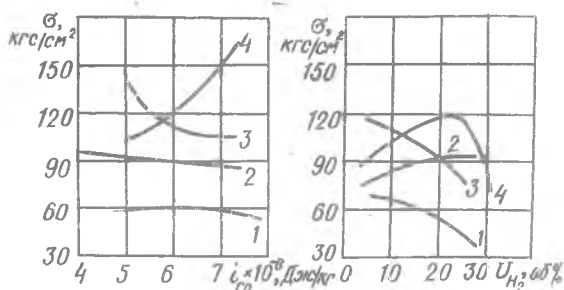
Т а б л и ц а 8

Ориентировочные режимы напыления окислов дисперсностью
40–70 мкм и тугоплавких металлов дисперсностью 40–100 мкм

Параметры	О к и с л ы			М е т а л л ы	
	Плазмообразующий газ				
	N_2	$Ar+15\%N_2$	$Ar+50\%N_2$	N_2	$Ar+15\%N_2$
Сила тока, А	300–400	400–500	300–400	100–300	150–300
Напряжение дуги, В	80–90	60–65	70–80	80–90	60–65
Мощность, кВт	25–30	25–35	22–35	8–25	10–20
Расход газа, м ³ /ч	2,5–3,5	2,0–4,0	2,0–3,0	1,5–3,0	1,5–3,5
Коэффициент использования порошка, %	60–80	40–80	60–80	70–90	70–90
Дистанция напыления, мм	100–150	100–150	100–150	50–150	50–100

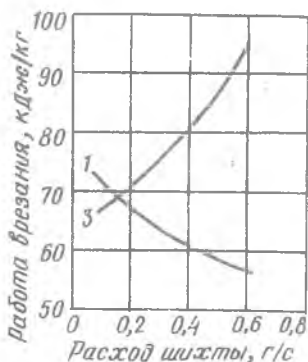
В каждом конкретном случае необходимо корректировать режим напыления, исходя из напыляемого материала, изделия и используемого оборудования, что диктуется, в первую очередь, отсутствием связи между закономерностями изменения физико-механических свойств различных покрытий при регулировании параметров режима напыления. Из результатов исследования зависимости прочности даже одного класса покрытия от параметров струи (рис.18) видно, что влияние параметров режима генерации на свойства покрытий носит неоднозначный характер, выражающийся в том, что с ростом величины одного из факторов может произойти как увеличение, так и снижение прочности покрытия для различных напыляемых материалов. Кроме того, неоднозначность проявляется также и в характере влияния параметров режима на свойства отдельно взятого покрытия в зависимости от области регулирования варьируемого параметра и сочетания значений других изменяемых факторов (рис.19).

Основной причиной неоднозначности в характере влияния параметров режима напыления на свойства покрытий является различие в распределении крупномасштабной структурной неоднородности в объеме напыляемых материалов. Так, в структуре уплотнительного материала Х20Н80–



Р и с. 18. Прочность уплотнительных покрытий $X_2ON_8O - BN(1)$, $Ni - BN(2)$, $X_2ON_8O - CaF_2(3)$ и $Al - BN(4)$ в зависимости от энтальпии аргонно-водородной плазменной струи (а) и содержания водорода в плазмообразующем газе (б), $G_T = 1,4$ г/с: а - $v_{H_2} = 16,7\%$, б - $i_{T0}^* = 5,9-6,2$ МДж/кг

CaF_2 , напыленного на режимах, соответствующих кривой 2 (см.рис.19), наблюдается формирование чередующихся плотных и пористых зон, сформированных из хорошо расплавленных мелких и слабоплавленных крупных частиц соответственно и расположенных перпендикулярно к подложке (см.рис.15,г). Покрытие с такой структурой обладает плохой прирабатываемостью, определяемой по работе врезания в исследуемый материал маятникового реза на специальном копре. Формирование покрытий с расположением зон, сформированных из частиц с различным агрегатным и энергетическим состоянием, параллельно подложке (см. рис.15,в) обеспечивает наиболее низкую работу врезания (см.рис.19, кривая 1). При этом необходимым условием для получения наряду с высокой прирабатываемостью высоких значений прочности является отсутствие сплошных прослоек из



Р и с. 19. Прирабатываемость уплотнительного покрытия $X_2ON_8O - CaF_2$ в зависимости от расхода напыляемого материала: S , мм: 1 - 1,3; 2 - 8,0; 3 - 14,7; $i_{T0}^* = 6,0$ МДж/кг; $v_{H_2} = 16,7\%$; $V = 300$ мм/с

периферийных, особенно слабо нагретых крупных частиц в структуре покрытий. Именно возникновение таких прослоек послужило причиной снижения прочности покрытия $X_2ON_8O - CaF_2$, происшедшее при увеличении эн- тальпии струи (см. кривая 3, рис.18).

В зависимости от эксплуатационных требований можно сформировать покрытие с тем или иным распределением крупномасштабной структурной неоднородности, обеспечивающим наиболее удачное сочетание рабочих характеристик покрытия. Для выполнения этого необходимо получить информацию (с помощью металлографического исследования) о размерах поперечного сечения металлизационной фигуры, напыленной конкретным материалом на рекомендуемом режиме генерации струи (см.табл.6) и размерах зон фигуры,обладающих различной структурой.Затем путем простого геометрического наложения сечений единичных металлизационных следов, варьируя расход напыляемого материала, скорость линейного перемещения плазматрона (величины этих параметров отражаются на вертикальных размерах следа) и шаг сканирования, подбирают значения указанных параметров режима напыления, обеспечивающих в совокупности с режимом генерации струи получение необходимой структуры покрытия. Ориентировочно значения этих параметров режима напыления полидисперсных материалов с размером частиц 40-315 мкм, позволяющего получить максимальную прочность сцепления с подложкой, должны быть следующими: $G_n = (0,1-0,2) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; $V = 300-400 \text{ мм/с}$; $S = 4-6 \text{ мм/проход}$. Напыление на этом режиме композиционных материалов $Al-BN$, X_2ON_8O-BN и $X_2ON_8O - CaF_2$ позволяет, например, получить уплотнительные покрытия, сочетающие противоречивые эксплуатационные характеристики и обладающие высокой прочностью и прирабатываемостью одновременно.

Более обоснованный выбор параметров режима напыления возможен на основании расчетной оценки энергетического и агрегатного состояния частиц напыляемого материала и исследования влияния параметров процесса напыления в установленном расчетном диапазоне на свойства покрытий с привлечением методов математического планирования эксперимента [3].

2.3. Обработка покрытия после напыления

Покрытие, нанесенное на поверхность изделия, может быть подвергнуто последующей обработке с целью обеспечения необходимых служебных свойств. Для уменьшения пористости покрытия его подвергают термообработке, пропитке слоя с термообработкой, проплавлению или оплавлению слоя. Введение стекловидной составляющей в виде полукри-

лоидного раствора в керамический материал обеспечивает равномерное распределение стекла и формирование пленки из него на поверхности покрытия, что позволяет получать газонепроницаемые слои.

При плазменном напылении поверхность покрытия получается достаточно грубой, для получения чистых поверхностей с точными размерами покрытие наносят с припуском для последующей обработки резанием.

Для повышения жаростойкости, коррозионной стойкости покрытий достаточно эффективна пропитка напыленного слоя кремнеорганическими цементами (работоспособность до 873–973 К).

Самофлюсующиеся твердые сплавы системы $Ni-Cr-B-Si$, наносимые для защиты от абразивно-коррозионного воздействия рабочей среды, как правило, оплавляют с целью ликвидации пористости и повышения термомеханических свойств покрытий. Оплавление таких покрытий проводят при температуре, соответствующей интервалу кристаллизации сплавов этой системы, в присутствии жидкой и твердой фаз. При нагреве до 1273–1373 К происходит проплавление покрытий, бор и кремний частично превращаются в B_2O_3 и SiO_2 . Образующиеся в покрытии окислы металлов растворяются с образованием стекловидных шлаков, которые всплывают на поверхность покрытия. Обработанные таким образом покрытия обладают высокой твердостью, прочностью сцепления и газонепроницаемы. Проплавление можно осуществлять в печи газовой и плазменной струей путем высокочастотного нагрева.

Покрытия из материалов типа $Ni-Cr-B-Si$, Cr_3C_2 , TiC и т.д., имеющие объемную твердость HRC 60–70 и более, а микротвердость отдельных включений типа боридов, карбоборидов, карбидов до 40000 H/mm^2 , следует обрабатывать только алмазными кругами. Покрытия из тугоплавких окислов окончательно обрабатывают до необходимого размера в основном шлифованием кругами из карборунда или карбида кремния.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Широкие технологические возможности плазменного напыления обусловили использование его в различных областях производства летательных аппаратов. Так, по зарубежным и отечественным данным плазменное покрытие находит применение в ремонтных работах не менее чем по 300 узлам газотурбинных двигателей. Напыление применяется при ремонте камер сгорания, деталей статора и компрессора турбины, топливной арматуры, реверса тяги, воздушных уплотнений компрессора, оболочек двигателя. Объем применения ремонтного напыления в авиационной технике США по данным 1975 года [9] составил 75 млн. дол-

ларов; при этом отмечалась склонность к ежегодному увеличению этого объема по экспоненциальной зависимости. Помимо ремонтных работ плазменные покрытия находят применение при изготовлении лопаток компрессора и турбины, форсунок и жаровых труб камеры сгорания (износо-, термо- и эрозивно стойкие), при создании узлов уплотнений ротора двигателя (легкосрабатываемые).

Композиционные материалы с волокнистым упрочнением находят применение при создании несущих конструкций фюзеляжа, крыльев самолета. Износостойкие покрытия наносятся на тормозные колодки, барабаны и цапфы шасси. Для защиты обтекателей радиомачты от атмосферного воздействия и придания им радиопрозрачности с помощью плазменного напыления создаются покрытия на основе окислов.

Традиционно применение покрытий в ракетной технике, именно потребности которой и дали первоначальный импульс для развития техники плазменного напыления. Жаростойкие, жаропрочные, эрозивно стойкие и терморегулирующие покрытия из окислов, тугоплавких металлов, карбидов наносятся на головки и сопла ракет, узлы конструкции, подверженные высокотемпературному воздействию газового потока.

Разнообразные плазменные покрытия наносятся на обтекатели и экраны космической аппаратуры для придания им жаропрочности и жаростойкости. Износостойкие и антифрикционные покрытия напыляются на подвижные узлы, работающие в глубоком вакууме. Для защиты космических кораблей от внешних тепловых потоков и сброса избыточной теплоты применяют терморегулирующие покрытия.

Плазменное напыление получило распространение при создании износостойких покрытий на направляющих металлообрабатывающих станков (молибден, самофлюсующийся сплав $Ni-Cr-B-Si$), при изготовлении режущего и абразивного инструмента (покрытия, повышающие износостойкость, ударную вязкость инструмента и точность обработки: карбиды, нитриды, алмазоподобные вещества) при изготовлении пресс-форм для литья под давлением, матриц для прессования (покрытия, обеспечивающие жаропрочность, жаростойкость, теплоизоляцию, препятствующие схватыванию: окислы, хромоникелиевые сплавы, интерметаллиды, самофлюсующиеся сплавы).

3.1. Теплоизоляционные, жаростойкие и терморегулирующие покрытия

Типичными теплоизоляционными материалами являются окись алюминия и двуокись циркония. Покрытие из окиси алюминия, обладающее меньшей плотностью, отличается высокой эрозивной стойкостью и может использоваться для защиты деталей, работающих в потоке горячего

газа, содержащего твердые частицы продуктов сгорания – ракетных сопел, сопел реактивных двигателей. В условиях максимальных температур горения топлива применяют более тугоплавкую двуокись циркония. На рис. 20 схематично изображено сопло ракетного двигателя, изготовленного из магниевого сплава с покрытием из

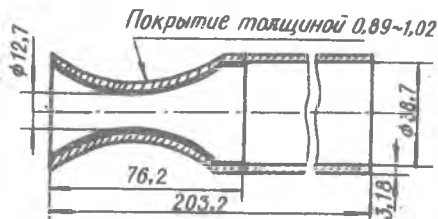
ZrO_2 . Теплоизоляционные характеристики напыляемого покрытия зависят от его толщины и пористости. С увеличением пористости происходит улучшение теплоизоляционных характеристик, но при этом ухудшается стойкость к окислению.

Поэтому в большинстве случаев для теплоизоляции используют толстые покрытия, обладающие большой пористостью (с подслоем из никрома или алюминид никеля). Были сопоставлены теплоизоляционные свойства различных покрытий разной толщины (рис. 21). Температура пластины, защищенной покрытием толщиной 3,45 мм, в установившемся режиме нагрева на 280 К была ниже температуры пластины без покрытия. С целью повышения термостойкости и чувствительности к механическим ударным нагрузкам армирование толстого керамического покрытия производится

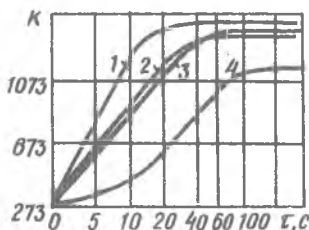
проволочной сеткой (приваренной к подложке).

Если комбинировать напыление окислов с напылением металлов, то можно получить плотные покрытия с повышенной стойкостью к окислению. При разработке материалов для ракетных двигателей были испытаны многослойные покрытия, состоящие из чередующихся слоев молибдена и окиси алюминия. Молибденовые слои обеспечивают высокую эрозионную стойкость и хорошую сцепляемость. Слой же окиси алюминия придает покрытию высокую стойкость к тепловым ударам и служит хорошей теплоизоляцией.

Напыление композиционных материалов на основе керамики и туго-



Р и с. 20. Внутренняя поверхность сопла ракетного двигателя с напылением ZrO_2



Р и с. 21. Теплоизоляционные характеристики керамических покрытий (температура поверхности пластины из сплава системы $Ni-Co-Cr$ при нагреве ацетилено-кислородным пламенем): 1 – без покрытия; 2 – покрытие из ZrO_2 толщиной 0,89 мм; 3 – покрытие из Al_2O_3 толщиной 0,89 мм; 4 – армированное покрытие из ZrO_2 , толщиной 3,45 мм

плавких металлов является одним из способов получения плотных покрытий с малым содержанием пор, обладающих высокой жаростойкостью и низкой теплопроводностью. Примером таких материалов могут служить композиции $Al_2O_3 + NiCr$, $MgAl_2O_4 + NiCr$. Известны примеры получения покрытий с низкой пористостью (1-2%) за счет ввода в окисную керамику порошка итекла (до 20-40%).

Для регулирования тепловых режимов эксплуатации объектов космической техники большое значение имеет теплообмен излучением. Защита космических кораблей от внешних тепловых потоков и сброс избыточной теплоты осуществляется путем теплового излучения в открытый космос. На все части корабля, не защищенные экранно-вакуумной изоляцией, наносят покрытия, способные отражать большую часть лучистой энергии обратно в космическое пространство. Такие покрытия получили название терморегулирующих (ТРП) и составляют пассивную часть системы терморегулирования космических летательных аппаратов. Выбором ТРП с соответствующими коэффициентами поглощения солнечного излучения α_s и степенью черноты ϵ определяется равновесная температура тела при радиационном теплообмене. Существует классификация ТРП в зависимости от α_s и ϵ :

I класс - солнечные отражатели с $\alpha_s < 0,2$ и $\epsilon = 0,8$ -крайне необходимы для отражающих поверхностей спутников Земли, космических аппаратов, для интегрирующих сфер фотометрических приборов, для внешних поверхностей хранилищ легкоиспаряющихся криогенных жидкостей и др.;

II класс - солнечные поглотители с $\alpha_s > 0,9$ и $\epsilon > 0,9$ -необходимы для внутренних поверхностей высоковакуумных камер и нагревательных устройств, тепловыделяющих элементов и др.;

III класс - истинные поглотители с $\alpha_s > 0,9$ и $\epsilon > 0,1$ -необходимы для создания эффективных преобразователей энергии солнечного излучения в электрическую и т.д. Метод плазменного напыления позволил достичь значительных результатов при создании как отражающих, так и поглощающих покрытий. Покрытия оптического назначения должны обладать также высокой прочностью сцепления с основой, стойкостью к термодинамическим нагрузкам, вибростойкостью и коррозионной стойкостью, стабильностью терморadiационных характеристик. Указанному комплексу требований для ТРП I-го класса лучше всего отвечают покрытия из окиси алюминия Al_2O_3 и окиси бериллия BeO . Известен опыт применения ТРП из окиси алюминия для поддержания температуры в приборном отсеке спутника "Эксплорер" в пределах 10-30 К в условиях резких тепловых перепадов температуры в ∞ 415 К. На верхнюю оболочку

напыляли защитное покрытие из Al_2O_3 , представляющее собой восемь продольных полос, расположенных через равные интервалы (площадь покрытия 25% от площади оболочки). Покрытие попеременно то накапливало, то излучало теплоту [1].

Оксид алюминия используют также для напыления на головные обтекатели ракет, силовые фермы многоступенчатых ракет и т.д.

Для защиты деталей, работающих в газовых потоках при повышенных температурах (в первую очередь, в газотурбинных двигателях - ГТД), перспективным является покрытие из алюминидов никеля. В $KuAl$, в частности, для защиты жаропрочных сплавов от высокотемпературной газовой коррозии разработано покрытие на основе никель-алюминиевого порошка, легированного тугоплавкими металлами (W , Co , Cr). Оно обладает высокой стойкостью при окислении на воздухе, пластичностью и прочностью сцепления с конструкционными материалами.

3.2. Износ-, коррозионно- и эрозионно стойкие покрытия

Большая часть деталей летательных аппаратов изготавливается с высокой степенью точности, при этом используются различные сплавы, удовлетворяющие рабочим условиям. Детали, в зависимости от условий работы, подвергаются износу, механическим повреждениям, коррозии и растрескиванию. Область распространения некоторых дефектов ограничивается только поверхностью, и для обеспечения длительной эксплуатации деталей необходимо либо нанесение защитного покрытия в процессе их изготовления, либо периодическое восстановление деталей до первоначальных размеров.

Плазменное напыление стало необходимым средством защиты поверхностей деталей двигателей в целях повышения их сопротивления износу, динамическому воздействию, эрозии и коррозии. Его применение позволило увеличить длительность эксплуатации деталей на тысячи часов. Защитные покрытия деталей ГТД делятся на две основные группы: покрытия между контактирующими деталями, предназначенные для повышения сопротивления износу, и покрытие между деталью и агрессивной средой, вызывающей химическое или эрозионное разрушение деталей. Износ может быть следующих типов: адгезионный - износ трением, сопровождающийся схватыванием и сваркой контактирующих поверхностей; абразивный - как результат проникновения шероховатостей твердой поверхности в более мягкую при скользящем контакте; усталостный, связанный с катящимся или скользящим контактом, при котором сила, циклически воздействующая на зону контакта, локализована (шестерни, подшипники); коррозионный,

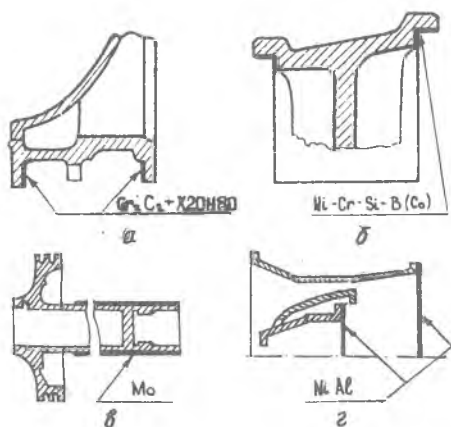
сочетающий воздействия химически реактивной окружающей среды (окисление, сгорание и т.п.) и некоторых разновидностей износа из описанных выше. В двигателях наибольший износ наблюдается в зоне сочленения поверхностей лопаток турбины или компрессора с диском, между собой и при контакте со статором. Эти места в конструкции ГТД испытывают всевозможный износ и дополнительные ударные нагрузки во время начала работы двигателя и при его остановке. Рабочая температура может изменяться от 290 до 1323 К. Используемые для лопаток материалы: сплавы на титановой основе – для вентиляторов и компрессоров и сплавы на никелевой основе – для высокотемпературных ступеней турбины.

При изготовлении авиационных ГТД наибольшее распространение получили плазменные покрытия $Co_2O_3 - Ni(Co)$ – узлах реверса тяги, в сочленениях жаровых труб камеры сгорания, $NiAl$ – в сочленениях статорных лопаток, камеры сгорания, $Co_3O_4 - X2ON8O$ – в сочленениях статорных колец, камеры сгорания. Перспективно применение карбида титана при температурах эксплуатации 755–866 К, критических для карбида хрома.

Из приведенных примеров применения плазменных покрытий при восстановительных работах при ремонте ГТД (табл. 9 и рис. 22) видно, что для восстановительных работ широко используется никель–алюминиевый порошок. Этот материал применяется в качестве подслоя в подавля-

ющем числе приведенных выше примеров: при напылении покрытий из алюминия, нержавеющей стали, карбидов, окислов, самофлюсующихся сплавов. Он широко используется и как основной материал покрытия.

При значительном износе деталей алюминия, никеля применяется для наращивания слоя металла так, чтобы толщина основного покрытия не превышала 0,2–0,4 мм (включая припуск на обработку). В ряде случаев $NiAl$ применяют в смеси с самофлюсующимися сплавами на никелевой основе. Оплав-



Р и с. 22. Примеры нанесения покрытий на детали ГТД: а – внутреннее уплотнение опоры 2-й ступени турбины; б – статор 10–14 ступеней компрессора; в – шток поршня реверсивной решетки вентилятора; г – выходная часть корпуса компрессора

Т а б л и ц а 9

Номенклатура восстанавливаемых напылением деталей ГТД [1,9]

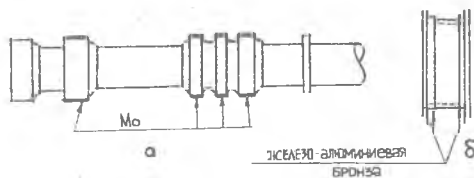
Напыляемый материал	Перечень деталей
Алюминий	Воздушный кожух; картер задней опоры; воздушное уплотнение статора
Молибден	Силовой цилиндр реверса; крышка цилиндра привода реверса тяги; входной направляющий аппарат и т.д.
Алюминид никеля	Улитка охлаждения турбины; основная опора турбины; камера сгорания (задняя часть; стяжная лента; внутренняя поверхность выходного канала); дроссельная заслонка; опорный вкладыш корпуса редуктора; корпус подшипника; средний корпус компрессора; корпус диффузора; кожух компрессора; Наружная часть компрессора и т.д.
Хромоникелиевый самофлюсующийся сплав $Ni-Cr-B-Si$	Верхний шарнир створки реверса реактивной струи; шейка опоры вспомогательной турбины; топливный коллектор; шарнир скольжения антиобледенительного носового капота; опоры маслопровода; корпус форсунки и т.д.
$Cr_3Cr_2 + X20H80$	Внутренний кожух сопла турбины; цапфа опоры и т.д.
$(Ni-Cr-B-Si) + WC$	Зажимы статора и диафрагмы 8-й ступени компрессора; статор 12-й ступени: выходной и направляющий аппарат 13-й ступени; периферии направляющих лопаток; корпус диффузора и т.д.

ление самофлюсующихся сплавов (в том числе и на кобальтовой основе, и содержащих WC) проводится лишь в отдельных случаях.

Плазменное напыление для восстановления изношенных поверхностей деталей конструкции самолетов используется еще недостаточно широко. Известны примеры успешного применения покрытий из карбида хрома для восстановления направляющих стержней выходного подкоса, шасси, подвергающихся износу при трении и вибрации, покрытий из алюминид никеля - для восстановления цапф главного шасси, покрытий из молибдена - для устранения задиrow и восстановления изношенных поверхностей штока цилиндра выпуска и уборки шасси и т.д. (рис. 23).

В настоящее время отработана технология напыления материалов $Ni-Cr-B-Si$ и $NiAl$ на детали из стали 30ХГСА (соединительные болты, фитинги и т.д.), а также из магниевого (МДБ-ТЧ) и титанового сплавов.

Для защиты от эрозионного воздействия движущихся с большой скоростью газообразных продуктов сгорания топлива на поверхность



Р и с. 23. Примеры нанесения покрытий на детали шасси самолета: а - шток цилиндра выпуска и уборки шасси; б - носовое управляющее колесо шасси

графитового сопла ракетного твердотопливного двигателя наносилось покрытие из карбида вольфрама. Срок службы сопла с защитным покрытием более чем в 100 раз превысил срок службы сопла без покрытия.

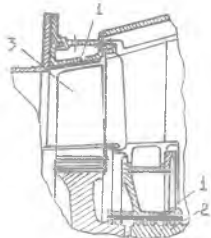
Для борьбы с явлением схватывания в глубоком вакууме на контактирующие поверхности деталей конструкций космической техники наносятся покрытия из окислов.

3.3. Срабатываемые уплотнительные покрытия

В условиях интенсификации рабочих процессов, характерных для совершенствования ГТД на данном этапе, особо остро встает проблема снижения потерь и перетечек рабочего газа в уплотнениях ротора, обусловленных наличием радиальных зазоров, предусмотренных для предохранения лопаток и лабиринтов от разрушения при возможном касании о корпусные детали. Увеличение относительного радиального зазора в газовом тракте компрессора или турбины на 1% вызывает снижение к.п.д. двигателя на 1-3%, соответственно возрастает расход топлива. Одним из путей повышения к.п.д., экономичности и надежности ГТД является использование в уплотнениях ротора элементов со стираемым поверхностным слоем уплотнительного материала (рис.24), позволяющих за счет хорошей срабатываемости последнего снизить величины радиальных зазоров и уменьшить потери рабочего газа. К наиболее технологичным и конструктивно выгодным методам изготовления уплотнений подобного типа относится плазменное напыление композиционных материалов металл-твердая смазка, представляющих собой механическую смесь мелкодисперсных компонентов, гранулированную в порошок на связующем из растворимого силикатного стекла.

Напыление такого композиционного материала позволяет получить

покрытие, представляющее собой металличе-
 ческий матричный материал, который сильно
 разряжен порами, заполненными твердой
 смазкой. Металлическая матрица обеспе-
 чивает достаточную прочность покрытия,
 которая необходима для того, чтобы оно не
 разрушилось под воздействием высокоско-
 ростного газового потока, содержащего
 твердые частицы, под воздействием тер-
 мических ударов, вибрационных нагрузок
 и т.п. Разреженность металлической матри-
 цы и присутствие неразлагающейся при
 высоких температурах твердой смазки об-
 легчают условия врезания в уплотнитель-
 ный материал элементов ротора без изно-
 са и разрушения последних с допустимым
 разогревом и без налипания на них мате-
 риала покрытия.



Р и с. 24. Конструкция
 узла уплотнения с напылен-
 ным срабатываемым покры-
 тием: 1 - покрытие; 2 -
 лабиринтные гребешки;
 3 - рабочая лопатка

Процесс напыления композиционного материала металл-твердая
 смазка обладает специфическими особенностями, обусловленными широ-
 ким гранулометрическим составом и структурой частиц гранулированной
 смеси. Существующая технология гранулирования позволяет получать
 порошок дисперсностью 40-315 мкм. При нагреве и ускорении в плазмен-
 ной струе частицы материала металл-твердая смазка оплавляются с об-
 разованием оболочки из металла с включением силикатного стекла и
 смазки вокруг ядра, состоящего преимущественно из нерасплавленного
 конгломерата твердой смазки. В крупных фракциях напыляемого материа-
 ла плавление компонентов происходит лишь в приповерхностной зоне.
 При напылении дисперсного материала особенно заметно проявляется
 влияние распределения крупномасштабной неоднородности в структуре
 покрытий на их свойства (см. рис.18,19). Варьируя гранулометри-
 ческим составом напыляемого материала, содержанием в нем твердой
 смазки и параметрами струи, можно регулировать свойства уплотнитель-
 ных покрытий в довольно широких пределах. Работоспособность покрытий
 при эксплуатационных температурах достигается подбором материалов
 металлической матрицы и твердой смазки.

В КуИИ разработана технология плазменного напыления компози-
 ционных материалов $Al-BN$, $Ni-BN$, $X2ON8O - BN$ и $X2ON8O - CaF_2$,
 использование которой при создании конструкций разнообразных двига-
 телей позволило получить уплотнительные покрытия с необходимыми

физико-механическим свойствами и снизить весогабаритные характеристики изделий. Покрытия $Al-BN$, $X20H60 - BN$ и $X20H80 - CaF_2$ предназначены для эксплуатации при температурах не выше 823, 873, 973 и 1023 К соответственно. Покрытие $Al-BN$ хорошо прирабатывается при врезании открытого пера лопатки, остальные - при врезании лабиринтного гребешка.

3.4. Композиционные материалы с волокнистым упрочнением

Техника плазменного напыления позволяет создавать принципиально новые материалы с очень высокими эксплуатационными свойствами. Известно, что прочность современных конструкционных материалов в десятки и сотни раз меньше теоретической прочности, рассчитанной из энергии связи атомов в кристаллической решетке вещества. Однако в настоящее время получены материалы в виде нитей, волокон, усов и тонких проволочек с прочностью, приближающейся к теоретической, причем многие из них отличаются малым весом и состоят из дешевых, имеющихся в изобилии веществ, таких, например, как углерод, окись алюминия, карбид кремния, двуокись кремния и т.д. Главным препятствием на пути широкого практического использования высокопрочного материала такого типа - отсутствие рациональных способов и технологии создания композиционных материалов на их основе. Армированный волокнами материал должен содержать достаточно высокую объемную долю волокна ($> 15\%$). Только в этом случае можно обеспечить такое распределение волокна в матрице, когда при нагружении поля напряжений вокруг волокна перекрывались бы. Матрица служит для равномерного распределения и передачи рабочей нагрузки на высокопрочное хрупкое волокно и изготавливается из пластичного материала. Сцепление между волокном и матрицей должно быть прочным, основанным на химических связях на границе раздела. Такой композиционный материал сочетает в себе высокую прочность с хорошей сопротивляемостью распространению трещин.

Широкие возможности в области создания подобных композиционных материалов открывает плазменная технология в сочетании с горячим прессованием, прокаткой и пропиткой. Плазменным напылением наносят матрицу на волокно и получают покрытие с однослойным армированием. Такое покрытие, отделенное от подложки, представляет собой тонкую (100-200 мкм) ленту определенной ширины и длины. Лента является полуфабрикатом, из которого вырезают карточки необходимого профиля,

складывают их в сетку и подвергают горячей обработке давлением - прессованию или прокатке. Напыленный материал матрицы уплотняется, карточки соединяются между собой, образуя многослойный композиционный материал с высокими удельными свойствами. В зависимости от вида исходного сырья может заплетаться непрерывное или дискретное волокно при линейной или сетчатой укладке. Большие возможности изготовления изделий сложной формы открывает укладка или навивка армирующего волокна с одновременным заплечением его материалом матрицы, фиксированием и закрепляющим волокно в месте укладки.

Композиционные материалы на основе Al , Ti с волокнистым упрочнением находят применение при изготовлении несущих конструкций крыльев и фюзеляжа летательных аппаратов [4].

Л и т е р а т у р а

1. Х а с у й А. Техника напыления. -М.:Машиностроение, 1975.- 288 с.
2. К у д и н о в В.В., И в а н о в В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. -М.:Машиностроение, 1981. - 192 с.
3. Д о н с к о й А.В., К л у б н и к и н В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. - Л: Машиностроение, 1979.- 221 с.
4. К у д и н о в В.В. Плазменные покрытия. -М.:Наука, 1977.- 184 с.
5. У с о в Л.Н., Б о р и с е н к о А.Н. Применение плазмы для получения высокотемпературных покрытий. -М.-Л.:Наука, 1965. -86 с.
6. [С и в и р к и н В.Ф.], [К и т а е в Ф.И.], Л е к а р е в Ю.Г. Исследование начального участка турбулентной плазменной струи с примесью твердых частиц. -В межвуз.сб.:Гидрогазодинамика. -Куйбышев: КуАИ, вып. 3, с.56-66.
7. [К и т а е в Ф.И.], Л е к а р е в Ю.Г. Методика оценки энергетического состояния напыляемого материала по начальным параметрам двухфазной плазменной струи. В межвуз.сб.: Вопросы технологии производства летательных аппаратов. -Куйбышев: КуАИ, 1978, вып. I, с.III-120.
8. В а р г а ф т и к Н.В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. -М.:Наука, 1972. - 720 с.
9. Получение покрытий высокотемпературным распылением: Сб.статей /Под ред. Л.К.Дружинина, В.В.Кудинова. -М.:Атомиздат, 1973.-312 с.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение.....	3
1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ	6
1.1. Генерация гетерогенной плазменной струи.....	6
1.2. Нагрев и ускорение напыляемого материала в плазменной струе	13
1.3. Закономерности осаждения частиц напыляемого материала на подложку	18
1.4. Механизм формирования покрытия	24
1.5. Напыляемые материалы	27
1.6. Основные физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики напылен- ных покрытий	32
2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ НАПЫЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ	38
2.1. Подготовка подложки под напыление	39
2.2. Выбор режима напыления	41
2.3. Обработка покрытия после напыления	44
3. ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	45
3.1. Теплоизоляционные, жаростойкие и терморегу- лирующие покрытия	46
3.2. Износо-, коррозионно- и эрозионно стойкие покрытия	49
3.3. Срабатываемые уплотнительные покрытия	52
3.4. Композиционные материалы с волокнистым упрочнением	54
Л и т е р а т у р а	56

Доп.план 1983 года, поз. 50

Ю р и й Г р и г о р ь е в и ч Л е к а р е в

ПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Учебное пособие

Редактор Е.Д.А н т о н о в а
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к
Корректор Н.С. К у п р и н о в а

Подписано в печать 28.II.83 г. Ю 07296.
Формат 60x84 I/I6. Оперативная печать Бумага писчая.
Усл.п.л. 3,5. Уч.-изд.л. 3,0. Т. 500 экз.
Заказ 8340 Цена 10 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Областная тип.им. В.П.Мяги,г.Куйбышев,Венцека,60.