1555802

На правах рукописи
УДК 536.24

Ширяева Наталья Викторовна

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОДИНАМИКИ СВЕРХЗВУКОВЫХ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПРЕГРАДОЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

05.07.05 Двигатели летательных аппаратов.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 1997

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном Техническом Университете имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, заведующий отделом, А. В. Воронецкий.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор С. Н. Буйновский

кандидат технических наук, доцент А. Ф. Пузряков

Ведущая организация: НПО "Геодезия"

Защита диссертации состоится "1" декабря 1997 г. в 14.00 час. на заседании диссертационного Совета К.053.1.08 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, Лефортовская наб., д.1, ф-т "Энергомашиностроение".

ся в библиотеке Университета.

з., заверенный печатью, просим выслать нская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э.Баумана, овета К.053.15.08.

я 1997 г.

1555802

Объем 1 п.л. Тир. 100 экз.

им. Н.Э.Баумана

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баума
1555802
Ширяева Н.В. Особенно

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В начале 90-х годов особую актуальность стали приобретать конверсионные программы, направленные на использование многолетнего опыта, квалификации кадров и материально-технической оснащенности предприятий оборонной и аэро-космической промышленности для разработки передовых технологий и их внедрения в других отраслях промышленности. Появились и развиваются технологии, основанные на новом, нетрадиционном использовании ракетных двигателей, в частности, для сверхзвукового газопламенного напыления (СГН) покрытий, сверхзвуковой газовой резки (СГР) и в системах пожаротушения. В связи с этим возникла потребность описания общих закономерностей процесса, а также расчета и оптимизации параметров двухфазных потоков применительно к указанным специальным технологическим установкам.

Сверхзвуковое газопламенное напыление покрытий является новым высокоэффективным методом упрочнения поверхности деталей. Метод СГН позволяет также восстанавливать изношенные детали и наносить защитные покрытия различного типа. Сущность процесса состоит в ускорении и нагреве частиц порошкообразного материала (ПМ) сверхзвуковой высокотемпературной газовой струей с последующим нанесением ПМ на поверхность обрабатываемой детали.

Несомненными достоинствами метода СГН являются высокая адгезионная прочность, твердость и плотность наносимых покрытий, которые по своим характеристикам приближаются к полученным на детонационных установках и превосходят полученные на плазменном оборудовании. Несмотря на то, что несколько зарубежных фирм (Deloro Stellite, Inc., США; GTV, ФРГ; HOBART TAFA TECHNOLOGIES, Нидерланды и др.) выпускают стационарные установки СГН, возможные пути их совершенствования еще далеко не исчерпаны. В частности, одним из перспективных методов форсирования процесса СГН является использование внешних сепарирующих устройств (масок), помещаемых между выходным сечением установки и обрабатываемой поверхностью. Такие устройства позволяют отсекать низкоскоростные и низкотемпературные частицы из периферийной зоны струи и тем самым повышать качество напыляемых покрытий.

В Российской Федерации исследования в области СГН велись в ряде организаций, однако серийное производство сверхзвукового газопламенного оборудования так и не было организовано. Проблема разработки отечественных установок СГН весьма актуальна, т. к. их внедрение позволит резко поднять эффективность работ по восстановлению и упрочнению деталей машин и механизмов

Целью работы является расчетно-теоретический и экспериментальный анализ возможности повышения эффективности процесса СГН за счет применения внешних сепарирующих устройств, выявление факторов, влияющих на качество получаемых покрытий, а также разработка рекомендаций по оптимизации характеристик установок СГН при использовании внешних сепарирующих устройств.

Научная новизна

— Впервые обоснована возможность повышения адгезионной прочности и твердости напыляемых покрытий за счет оптимизации геометрии маски и ее положения.

— Впервые проведено расчетно- теоретическое исследование влияния сепарирующих масок на параметры двухфазного потока.

— Впервые проведено экспериментальное исследование влияния сепарирующих масок на качество покрытий, получаемых по методу СГН.

Практическая ценность

— Разработана двумерная универсальная расчетная инженерная методика, позволяющая рассчитывать до-, сверх- и трансзвуковые течения, задачи внутреннего, внешнего и струйного течений применительно к установкам СГН. Открытая объектная архитектура программы позволяет совершенствовать и детализировать математическую модель в дальнейшем.

— Результаты численного исследования могут оперативно использоваться при проектировании новых установок СГН.

— С помощью разработанной программы дана оценка влияния на характеристики покрытий режимных параметров процесса СГН, геометрических характеристик и положения сепарирующих масок.

— Разработана экспериментальная установка и методика проведения эксперимента для исследования влияния режимных параметров процесса напыления (давления в камере сгорания p_K; коэффициента избытка окислителя

α; расстояния от выходного сечения насадка до маски L_M; дистанции напыления L_H,) на характеристики получаемых покрытий, в частности, на адгезионную прочность σ, и твердость $HV_{0,3}$ покрытия.

— Проведено комплексное экспериментальное исследование, в результате которого выявлены следующие закономерности:

•увеличение давления в КС с 0.3 до 0.44 МПа позволяет увеличить σ на 40%, $HV_{0,3}$ на 60%;

•снижение α с 1.32 до 0.7 приводит к увеличению σ на 80%;

•показано, что выбором оптимальных диаметра внутреннего канала маски и расстояния L_M от выходного сечения насадка до маски позволяет улучшить стабильность характеристик напыляемых покрытий и повысить их адгезионную прочность более чем на 40%, твердость $HV_{0,3}$ — более чем на 10%.

Апробация работы Основные положения работы обсуждались на научной конференции "XXIII Гагаринские чтения' (Москва, 1997г.), на 2-ой международной школе-семинаре "Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем" (Санкт-Петербург, 1997г.), на 2-ой международной конференции "Безопасность трубопроводов" (Москва, 1997г.).

Публикации По результатам проведенных исследований опубликовано 4 печатных работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных выводов и списка литературы. По объему работа состоит из 80 страниц текста, 47 рисунков, 10 таблиц, библиография насчитывает 148 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, основные задачи исследования, краткое описание диссертационной работы и положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе проанализированы конструкции существующих установок СГН, их достоинства и недостатки. Рассмотрены современные методы расчетно-теоретического и экспериментального исследований двухфазных потоков, дан анализ возможности их применения для изучения процессов в сверхзвуковых установках.

Задача максимального повышения скорости частиц при нагреве их до оптимальных температур является основной при проектировании и разработке технологических установок для сверхзвукового газопламенного напыления. Форсирование режима напыления возможно за счет использования внешних сепарирующих устройств, помещаемых между выходным сечением насадка и обрабатываемой поверхностью. Такие устройства позволяют отсекать низкоскоростные и низкотемпературные частицы из периферийной зоны струи и тем самым повышать качество напыляемых покрытий. Несмотря на то, что подобные устройства уже нашли практическое применение, подробной информации об эффективности применения сепарирующих масок в западных публикациях нет. В настоящей работе такая схема установки с внешней сепарирующей маской принята в качестве базовой (рис. 1).

Выполненный анализ расчетно-теоретических работ показал следующее.

Аналитическое решение для расчета неравновесного трансзвукового потока газовзвеси может быть найдено лишь в самых простейших случаях, настоящая задача не входит в их число. Наиболее приемлемыми современными методами решения, обеспечивающими требуемую точность, являются численные методы. Специфика исследуемой задачи практически исключает использование спектральных методов на основе методов Петрова-Галеркина, методов с введением диссипативных членов или метода выделения скачка Моретти, а также таких специальных методов как метод интегральных соотношений Дородницына или метод крупных частиц Белоцерковского-Давыдова.

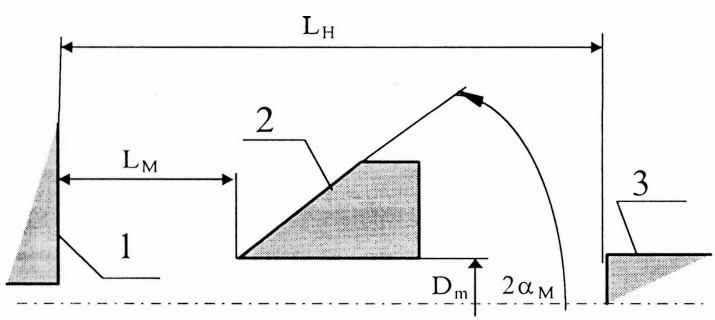


Рис. 1. Схема установки: 1 — выходное сечение насадка установки СГН; 2 — сепарирующее устройство (маска); 3 — напыляемый цилиндрический образец

Наиболее простым из удовлетворяющих требованиям настоящей задачи методов и наиболее универсальным является метод установления, с помощью которого можно рассчитывать внутренние, внешние и струйные течения, имеющие дозвуковые, трансзвуковые и сверхзвукового области, включая скачки уплотнения.

При выборе математической модели для частиц следует учитывать, что при рассмотрении дисперсной фазы как континуума, на границах расчетной области необходимо задавать ГУ по таким параметрам как скорость и температура частиц. В то же время желательно получить значения этих параметров на напыляемой поверхности из численного эксперимента. Поэтому, в качестве модели для описания дисперсной фазы применительно к процессу СГН наиболее подходит траекторная лагранжева модель.

Экспериментальнные исследования в основном посвящены двухфазным струям с большой степенью недорасширения, слабоперерасширенные струи мало исследованы. Работы, рассматривающие двухфазные течения в технологических установках СГН, СГР, плазменных установках большей частью касаются исследований влияния режимных параметров процесса на характеристики двухфазного потока. Работ, посвященных исследованию влияния внешнего сепарирующего устройства на скорость и температуру частиц в установках СГН, в открытых публикациях нет. В подавляющем большинстве работ отмечается, что применение бесконтактных методов диагностики, в частности, оптических, наиболее предпочтительно, так как эти методы не вносят возмущений в исследуемые потоки.

В конце первой главы сформулированы основные задачи исследования:

— создание математической модели двухфазного потока применительно к течению в установке СГН;

— численное моделирование процесса СГН, исследование влияния параметров процесса и внешнего сепарирующего устройства на характеристики двухфазного потока;

— экспериментальное исследование влияния внешнего сепарирующего устройства на характеристики напыляемых покрытий.

Во второй главе представлены математическая модель и методика расчета сверхзвукового двухфазного потока в установке СГН, дана оценка ее ра

ботоспособности на примере тестовых задач, а также приведены результаты численного эксперимента для участка двухфазной струи от выходного сечения установки до напыляемой поверхности. Проанализировано влияние сепарирующего устройства (маски) на характеристики двухфазного потока (u, T, u_S, T_S,).

Для описания течения двухфазной смеси применен комбинированный метод Эйлера-Лагранжа. При этом стационарное решение системы уравнений Эйлера (1) для газа, записанных в квазиконсервативной форме, находится методом установления. Влияние конденсированной фазы на газ учитывается через источниковые члены.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t}+\frac{\partial A}{\partial x}+\frac{\partial B}{\partial r}+\frac{F}{r}=S,$$

где $\sigma=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ e\end{bmatrix}; A=\begin{bmatrix}\rho u\\ p+\rho u^2\\ \rho uv\\ (e+p)u\end{bmatrix}; B=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ p+\rho v^2\\ (e+p)v\end{bmatrix}; F=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2\\ (e+p)v\end{bmatrix}; S=\begin{bmatrix}0\\ Su\\ Sv\\ Se\end{bmatrix};$ (1)

u, v — осевая и радиальная составляющие скорости; p,ρ — давление и плотность газа; $e=\rho\left(\varepsilon+\frac{u^2+v^2}{2}\right)$ — полная энергия единицы объема; $\varepsilon=\frac{p}{(k-1)\rho}$ — внутренняя энергия единицы массы; S_u , S_v - источниковые члены в уравнениях сохранения импульсов по осям X и R

$$S_u=\frac{3\rho}{4\rho_S d_S}\sum_{j=0}^{j=n}\left[\left(\frac{\sum_{i=0}^{i=k}C_x\left(u-u_S\right)\cdot\left|u-u_S\right|\Delta\tau_i}{\sum_{i=0}^{i=k}\Delta\tau_i}\right)\cdot\rho_{Sj}\right];$$

$$S_v=\frac{3\rho}{4\rho_S d_S}\sum_{j=0}^{j=n}\left[\left(\frac{\sum_{i=0}^{i=k}C_x\left(v-v_S\right)\cdot\left|v-v_S\right|\Delta\tau_i}{\sum_{i=0}^{i=k}\Delta\tau_i}\right)\cdot\rho_{Sj}\right];$$

S_e - источниковые члены в уравнении сохранения энергии

$$S_e = \frac{6\lambda}{\rho_S d_S^2} \sum_{j=0}^{j=n} \left[\left(\frac{\sum_{i=0}^{i=k} Nu(T - T_S)\ \Delta\tau_i}{\sum_{i=0}^{i=k} \Delta\tau_i} \right) \cdot \rho_{Sj} \right].$$

Для описания движения частиц применяется траекторная модель. Изменение параметров частиц по траектории определяется из уравнений движения

$$\frac{du_S}{dt} m_S = F_S \cdot C_x \cdot \frac{(u - u_S) \cdot |u - u_S|}{2} \cdot \rho; \qquad (2)$$

$$\frac{dv_S}{dt} m_S = F_S \cdot C_x \cdot \frac{(v - v_S) \cdot |v - v_S|}{2} \cdot \rho \qquad (3)$$

и прогрева единичной частицы

$$\frac{dT_S}{dt}(m_S \cdot C_S) = S_S \cdot Nu \cdot \frac{\lambda \cdot (T - T_S)}{d_S}, \qquad (4)$$

где d_S - диаметр частиц порошка; ρ_S и C_S - соответственно плотность и коэффициент теплоемкости материала частиц; n - число траекторий частиц, проходящих через заданную расчетную ячейку; $\rho_{Si}=\rho_{S0}\ r_0/r_j$ - плотность частиц на j-той траектории; ρ_{S0} - плотность частиц в начальном сечении; r_j - текущая радиальная координата j-той траектории частицы; m_S, F_S, S_S - масса, площадь миделя, площадь поверхности частицы соответственно; C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления сферы ($0<M<2$); Nu - число Нуссельта; λ - коэффициент теплопроводности газа.

Схема расчетной области (120x40) приведена на рис. 2. Для численного решения применялась гибридная конечно-разностная схема с центральными разностями.

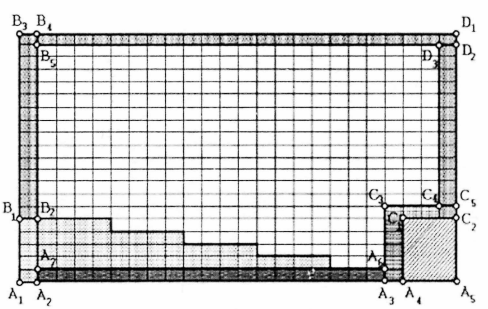


Рис. 2. Схема расчетной области

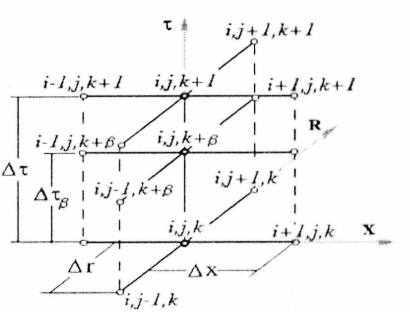


Рис. 3. Шаблон схемы расчета

Для подавления осцилляций по четным и нечетным узлам используется новая схема со сглаживанием по четырем точкам. Шаблон схемы расчета приведен на рис. 3, где $\Delta\tau$, Δx, Δr — шаги по времени, по координате X и по координате R соответственно; $\Delta\tau_\beta = \beta \times \Delta\tau$ — промежуточный шаг по времени. При этом β принимает значения от 0 до 1 и может быть рассмотрена как степень неявности схемы.

Данные, хранящиеся в ячейке, содержат информацию как о самом потоке, так и о типе ячейки и структуре расчетной области соседних ячеек. Это позволяет рассматривать расчетную область как однородную и проводить расчеты, не выделяя особенностей течения и не изменяя разностной схемы по всей области.

Поскольку в опубликованных материалах практически отсутствуют результаты расчетов двухфазных струй с небольшой степенью перерасширения, с целью подтверждения работоспособности разработанной математической модели и программы расчета были численно промоделированны две тестовые задачи: расчет двухфазной струи, истекающей в затопленное пространство, и расчет двухфазного течения в сопле модельного двигателя. Удовлетворительное согласование опубликованных материалов с данными тестовых расчетов указывает на корректность основных допущений и положений разработанной программы.

В процессе численного эксперимента моделировались следующие варианты задачи о движении двухфазного потока:

- свободная осесимметричная двухфазная струя истекает в затопленное пространство;
- двухфазная струя натекает на торцевую поверхность осесимметрично расположенного цилиндрического образца для напыления;
- двухфазная струя взаимодействует с симметрично расположенной сепарирующей маской;
- двухфазная струя взаимодействует с маской и натекает на торец цилиндрического образца.

Изменяемыми параметрами являются дистанция напыления L_H, диаметр частиц порошкообразного материала d_S, массовое содержание дисперсной фазы Z, расстояние от среза насадка до передней кромки маски L_M а так

же геометрические размеры самой маски — ее внутренний диаметр D_M и двойной угол конуса $2\alpha_M$.

Для каждого из вариантов расчета получены поля изменения параметров газа (плотности ρ, осевой скорости u, радиальной скорости v, давления p, температуры T, числа Маха M) и частиц (осевой скорости u_S, радиальной скорости v_S, температуры T_S), распределение параметров на оси струи для газа (u, p, T, M) и частиц (u_S, T_S), а также распределение этих параметров в поперечном сечении на расстояниях от среза насадка 5, 20, 50, 78 мм.

В ходе численного эксперимента проанализировано влияние режимных параметров процесса напыления и внешнего сепарирующего устройства (маски) на характеристики двухфазного потока.

В результате расчетов выявлено, что на u, T, u_S, T_S существенное влияние оказывает расстояние L_M (рис. 4). Так, при его уменьшении (от 10 до 30 мм) наблюдается заметное увеличение максимальной осевой скорости частиц в конце траектории (рис. 4,а). Объясняется это тем, что при внесении маски в поток она оказывает изолирующее действие, внутри нее существует область "стабилизации" параметров газа. Причем скорость газа оказывается тем выше, чем раньше поток будет изолирован, т. е. при L_M=10 мм (рис. 4,а). Процесс обмена энергиями между фазами продолжается и внутри маски. Частицы разгоняются до больших скоростей при больших разностях $\Delta u=u-u_S$, что также соответствует L_M=10 мм (рис. 4, б).

В схеме течения с маской температура частиц T_S перед образцом повышается (в зависимости от L_M на 15...27%). Для зависимости T=f(L) также характерно наличие области "стабилизации" внутри маски: T≈const тем выше, чем меньше L_M. Максимальное значение разности температур $\Delta T=T-T_S$ соответствует L_M=10 мм, что позволяет частицам нагреваться до больших температур (рис. 4,г).

Наличие маски также выравнивает распределение параметров в поперечном сечении струи перед образцом: отношение среднего значения к максимальному для u_S увеличивается с 0,69 до 0,86; для T_S — с 0,83 до 0,93.

В третьей главе приведено описание разработанной экспериментальной установки и методики проведения эксперимента. Рассмотрены полученные результаты по влиянию внешних сепарирующих устройств и режимных параметров на характеристики покрытий.

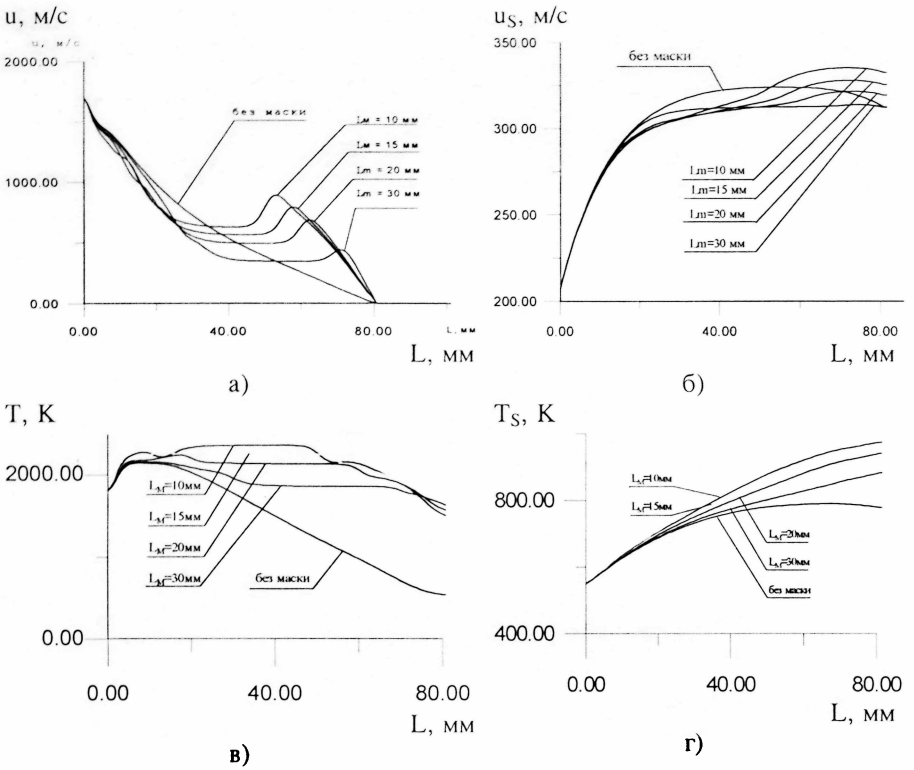


Рис. 4. Распределение осевой скорости и температуры для различных Lm и без маски (d_S=30 мкм, Z=10%, Dm=7 мм, $2\alpha_m$=90°, $L_н$=80 мм)

Покрытия напылялись при различных режимных параметрах (p_K, α), различными порошками (рис. 5,а, 6,а хромоникелевый сплав Рок-Дюр 47-2; рис. 5,б, 6,б и 7,б карбид вольфрама WC-Co 83-17; рис. 7,а интерметаллидный порошок NiAl ПН85Ю15М) и с применением сепарирующих масок, отличавшихся D_M, $2\alpha_M$, L_M.

Испытание покрытий на адгезионную прочность σ проводилось по методу клеевой пробы, на твердость — по методу Виккерса. При обработке экспериментальных значений адгезионной прочности и твердости покрытий, применялись статистические методы.

Как видно из рис. 5, возрастание давления в камере $p_к$ от 0,3 до 0,45 МПа повышает как адгезионную прочность σ, так и твердость $HV_{0,3}$ покрытия, что объясняется увеличением скорости частиц напыляемого материала.

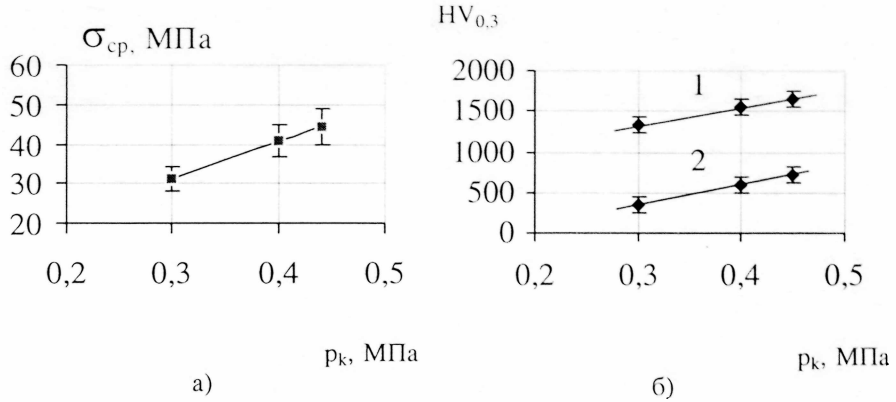


Рис. 5. Зависимость адгезионной прочности и твердости от давления в КС

Следует отметить, что наблюдается значительное увеличение твердости поверхностного слоя покрытия после шлифования (кривая 1 рис. 5,а) по сравнению с его твердостью в исходном состоянии (кривая 2, там же). Происходит это по причине зашлифовывания пор в наружном слое покрытия и некоторого наклепа верхнего слоя материала покрытия.

Другой режимный параметр α варьировался от 0,5 до 1,5. Зависимости $\sigma=f(\alpha)$ и $HV_{0,3}=f(\alpha)$ имеют качественно иной характер. Как видно из рис. 6, в распределении обеих характеристик (σ и $HV_{0,3}$) наблюдается максимум. Причем для адгезионной прочности σ он соответствует α=0,7 (см. рис. 6,а), а для твердости — α=0,75...0,8 (там же, б).

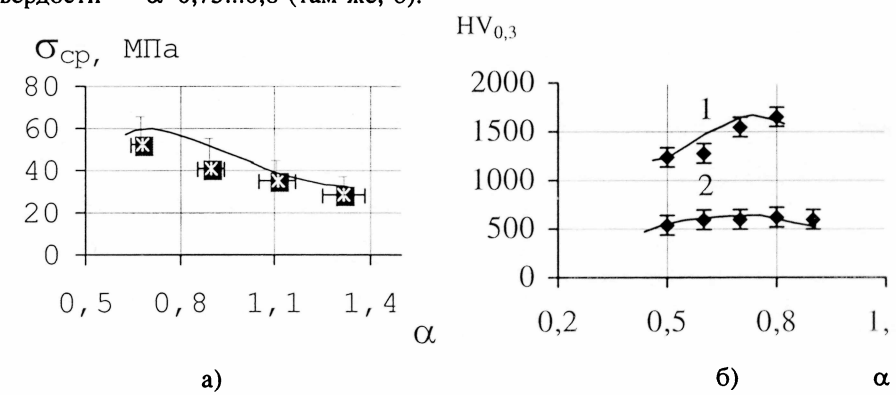


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности и твердости от коэффициента избытка окислителя

Первоначально рост σ с изменением α от 1,3 до 0,7 связан с тем, что в восстановительной среде сводится к минимуму отрицательное влияние окислительных процессов (как на поверхности напыления, так и на поверхности частиц). Дальнейшего роста σ с уменьшением α не происходит из-за уменьшения u и T газа. Если говорить о твердости, то для этого параметра определяющим является расходный комплекс ρu, характеризующий кинетическую энергию потока, который принимает экстремальное значение при α=0,75...0,8 и обеспечивает максимальную скорость частиц.

Значительное увеличение $HV_{0,3}$ покрытия после шлифования поверхности имело место и в этом случае.

Как показали результаты экспериментов, внешнее сепарирующее устройство позволяет заметно форсировать параметры процесса напыления и повысить характеристики покрытия.

Выявлено, что маска, помещаемая между выходным сечением насадка и поверхностью напыления позволяет повысить адгезионную прочность покрытия (до 45%) и твердость (на 10-15 %). Причем, σ и $HV_{0,3}$ существенно зависят от расстояния между выходным сечением насадка и передней кромкой маски L_M. На рис. 7 представлены результаты, полученные при использовании масок с диаметром внутреннего канала 7...8,5 мм и двойным углом при конической части 90^0. При напылении штифтов для определения адгезионной прочности маска устанавливалась на расстояниях L_M от 10 до 40 мм. При это

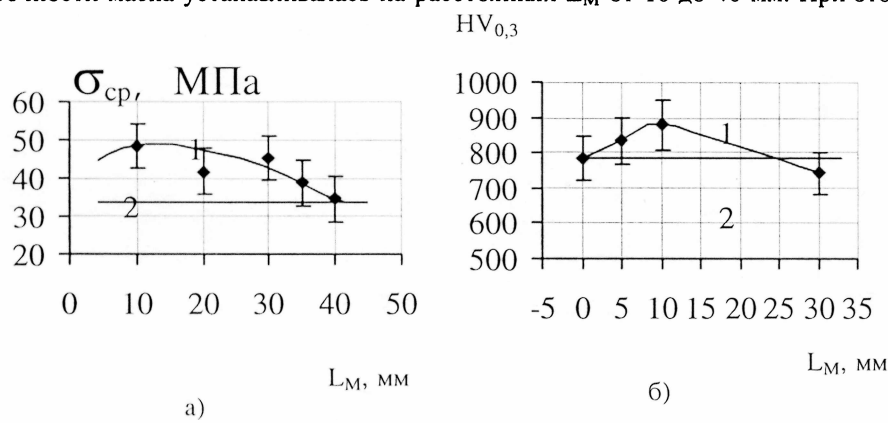


Рис. 7. Зависимость адгезионной прочности и твердости от расстояния между выходным сечением насадка и передней кромкой маски

этом максимальное значение σ соответствует расстоянию до маски L_M=10 мм (рис. 7,а). Отодвинутая на 30 мм маска уже не приводит к увеличению прочности сцепления (по сравнению с конструктивной схемой без маски).

Показано, что максимальная твердость покрытий соответствует расстоянию до маски L_M=10 мм (рис. 7,б). Придвинутая же вплотную к выходному сечению насадка маска не дает выигрыша по твердости по сравнению с обычной схемой напыления без внешнего сепарирующего устройства.

Полученные результаты можно объяснить, используя результаты расчетно-теоретического исследования. В случае применения маски наблюдается некоторое торможение потока, кривая распределения скорости газа u ложится немного ниже, чем при традиционной схеме напыления (рис. 4,а). Однако, внутри маски u остается практически постоянной, в то время как в случае без маски u продолжает падать. Причем u внутри канала оказывается тем выше, чем меньше L_M. Давление внутри маски больше атмосферного, поэтому на выходе из канала дозвуковая струя расширяется и ускоряется, что приводит к некоторому локальному повышению скорости u на расстоянии, соответствующем выходному сечению маски (рис. 4,а). Это увеличение скорости газа отзывается и некоторым дополнительным увеличением скорости частиц (4,б).

Если говорить о температуре газа, то в схеме испытаний с маской она оказывается выше (чем в случае без маски) для любых L_M. Во внутреннем канале, как и для скорости, T остается постоянной. На выходе из маски, в зоне падения давления имеет место некоторое локальное понижение температуры газа (рис. 4,в).

Однако, заметное повышение u_S и T_S наблюдается только при вполне определенных значениях L_M и D_M. При $L_M > L_M^{опт}$ газ успевает остыть и затормозиться до попадания во внутренний канал маски. Таким образом, маска как бы превращается в преграду, а σ и HV покрытия уменьшаются. При L_M=0 маска изменяет характер течения "насадок-маска-мишень" на "ступенчатый канал - мишень". Если диаметр внутреннего канала D_M маски превышает определенное значение, ее влияние становится не существенным и твердость покрытия снижается до значений, получаемых при напылении по обычной схеме.

Таким образом, применяя внешнее сепарирующее устройство с оптимальными геометрическими размерами, расположенное на определенном рас-

стоянии от среза насадка, можно повысить как адгезионную прочность, так и твердость напыляемых покрытий за счет изолирующего эффекта и за счет некоторого уменьшения "пятна контакта" струи с образцом, в результате чего отсекаются ее сравнительно низкоскоростные низкотемпературные зоны, что также улучшает характеристики покрытия.

В третьей главе приведены также результаты измерений температуры газа и скорости частиц. Скорость частиц определялась с помощью измерителя скорости светящихся объектов. Измерение температуры газа осуществлялось двумя способами: платинородий-платиновой термопарой и спектрозональной съемкой. Экспериментально полученные распределения скорости частиц и температуры газа даны в сравнении с рассчитанными значениями. Удовлетворительное согласование результатов подтверждает корректность основных положений разработанной методики расчета.

В экспериментальной части приведены также результаты фракционных исследований применявшихся ПМ и оценка точности полученных экспериментальных результатов.

В заключительной части диссертации представлены основные выводы и рекомендации по применению внешних устройств.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведенный анализ показал, что использование сверхзвуковых технологических установок позволяет существенно повысить качество напыляемых покрытий: основные характеристики покрытий выше, чем при напылении плазменными установками, и близки к получаемым детонационным методом. Дополнительная интенсификация процесса напыления возможна путем применения внешних сепарирующих устройств (масок).

2. Дано обоснование выбора для математического описания процессов, протекающих в современных технологических установках СГН, численного метода установления со сглаживанием по модифицированной схеме Лакса, как обеспечивающего наибольшую универсальность и простоту при достаточной точности решения.

3. Разработана универсальная двумерная расчетная инженерная методика, позволяющая рассчитывать до-, сверх- и трансзвуковые течения, задачи внутреннего, внешнего и струйного течений применительно к установкам

СГН. Открытая объектная архитектура программы позволяет совершенствовать и детализировать математическую модель. Проведена проверка корректности разработанной программы на примере тестовых задач расчета характеристик свободной двухфазной струи и двухфазного течения в модельном сопле. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с опубликованными материалами.

4. Проведено комплексное расчетно-теоретическое исследование газодинамической картины течения применительно к установкам СГН со схемами: "струя — маска — образец"; "струя — образец"; "струя — маска"; "свободная струя".

5. Впервые в ходе численного эксперимента выявлено влияние маски на параметры сверхзвукового потока в установках СГН. В частности, установлено:

- наличие маски существенно выравнивает параметры частиц в поперечном сечении перед образцом: по средней температуре с 0,83 до 0,97, по средней скорости с 0,69 до 0,86;
- изменяя расстояние до маски от 10 до 30 мм можно повысить максимальную (27%) и среднюю (46%) температуры частиц и максимальную (5,7%) и среднюю (24%) скорости частиц;
- максимальное повышение скорости и температуры соответствует расстоянию до маски 10 мм.

6. Разработаны экспериментальная установка и методика проведения эксперимента для исследования влияния режимных параметров процесса напыления (p_K, α, L_M, L_H) на характеристики получаемых покрытий, в частности на адгезионную прочность $\sigma_{сц}$.

7. Выполнено зондирование факела установки. Полученные значения температуры потока и скорости частиц удовлетворительно согласуются с результатами расчетов.

8. Проведено комплексное экспериментальное исследование, позволившее выявить следующие закономерности:

- при увеличении давления в КС с 0,3 до 0,44 МПа возможно увеличение σ на 40% и твердости $HV_{0,3}$ на 60%;
- при снижении α с 1,3 до 0,7 может быть достигнуто увеличение σ до 80% и твердости $HV_{0,3}$ до 10%;

- впервые показано, что оптимизация геометрических параметров маски и ее положения позволяет увеличить более чем на 10% твердость $HV_{0,3}$ и более чем на 40% адгезионную прочность напыляемых покрытий, а также повысить стабильность характеристик последних (отношение средних к максимальным значений σ увеличивается с 0,5 до 0,75).

Публикации по диссертации

1. Воронецкий А. В., Сучков С. А., Ширяева Н. В. Численное моделирование обтекания двухфазной осесимметричной струей сепарирующего устройства // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем: Сборник материалов 2-ой международной школы-семинара. — Санкт-Петербург, 1997. — С. 105-106.

2. Использование сверхзвуковых технологических установок для повышения эффективности коррозионной защиты трубопроводов. / А.В. Воронецкий, С.А. Сучков, Н.В. Ширяева и др. // Безопасность трубопроводов: Доклады участников Международной конференции. — Москва, 1997. — Т. 6. — С. 20-27.

3. Получение высококачественных износостойких покрытий методом сверхзвукового газопламенного напыления / А.В.Воронецкий, Д.А.Ягодников, Н.В.Ширяева и др. // Передовые термические технологии и материалы: Сборник аннотаций докладов I Международного симпозиума. — 22-26 сентября 1997 г., Кацивели (Украина). — М., 1997. — С. 38.

4. Воронецкий А. В., Ширяева Н. В., Сучков С. А. Математическое моделированиепроцесса сверхзвукового газопламенного напыления покрытий // Передовые термические технологии и материалы: Сборник аннотаций докладов I Международного симпозиума. — 22-26 сентября 1997 г., Кацивели (Украина). — М., 1997. — С. 39.