

## **АНАЛИЗ И ВЫБОР БЕЗРАЗМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ**

**М.В. Радченко<sup>1</sup>, Ю.О. Шевцов<sup>1</sup>, Т.Б. Радченко<sup>1</sup>,  
В.С.Киселёв<sup>1</sup>, А.В. Селиванов<sup>2</sup>**

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул

В статье рассмотрены основные безразмерные критерии, применяющиеся в сварочной науке для оценки качества технологических процессов. Сделан вывод о наибольшей применимости для процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки критерия Маха.

**Ключевые слова.** Безразмерные критерии, СГП-наплавка, теплофизическая картина, анализ

## **ANALYSIS AND CHOICE OF DIMENSIONLESS CRITERIA FOR AN ASSESSMENT OF QUALITY OF PROCESS OF SUPERSONIC-GAS POWDER CLADDING**

**M.V. Radchenko<sup>1</sup>, Yu.O. Shevtsov<sup>1</sup>, T.B. Radchenko<sup>1</sup>,  
V.S.Kiselyov<sup>1</sup>, A.V. Selivanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>The Altai state technical university of I.I. Polzunov, Barnaul

<sup>2</sup>LLC «Altaytekhnoservis», Barnaul

The main dimensionless criteria which are applied in welding science to an assessment of quality of technological processes are considered. As a result, the criterion of the Mahe is considered to have the greatest applicability for process of a supersonic gas powder cladding.

**Keywords:** The dimensionless criteria SGP-surfacing, thermal pattern analysis

Как известно, в сварочной науке достаточно давно используются т.н. безразмерные критерии, позволяющие выполнить предварительную оценку теплофизической картины в процессе сварки или наплавки, как вероятности получения качественного металла шва или наплавленного слоя. Среди них наиболее часто используются критерии, рассмотренные ниже.

При этом в процессе сравнения использованы два сварочных источника теплоты, применяемых для порошковой наплавки: 1) электронный пучок в вакууме (плотность мощности в пятне нагрева  $q \sim 105 \text{ Вт/см}^2$ ) и 2) сверхзвуковая газопорошковая струя (плотность мощности в пятне нагрева  $q \sim 103 \text{ Вт/см}^2$ ). В качестве исследуемых материалов были выбраны сталь 20, сталь 40 и сплав X20H80 близкий по химическому составу наплавленному порошковым сплавам системы Ni-Cr-B-Si, но с известными теплофизическими параметрами.

Процесс СГП-наплавки многофакторный процесс и весьма трудоемкий. Анализ результатов множества предварительных экспериментальных исследований, выполненных в авторском коллективе [82-87], показал, что среди всех возможных факторов, по общему мнению, необходимо выделить две группы факторов, оказывающих наиболее заметное влияние на конечное качество наплавленных покрытий:

### **1. Технологические:**

- конструкция сверхзвукового сопла Лавалля (число Маха);
- состав, соотношение, давление и расход рабочих газов;
- химический, фазовый и гранулометрический состав сложного легированных металлических сплавов;
- рабочее расстояние от сопла до наплавленной поверхности;
- скорость перемещения сопла по поверхности изделия;

# АНАЛИЗ И ВЫБОР БЕЗРАЗМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

- скорость подачи порошкового сплава в зону наплавки;
  - время предварительного подогрева поверхности перед началом процесса наплавки;
  - степень автоматизации технологического процесса;
2. Физические:

- неопределённый характер истечения собственно газовой струи (ламинарный, турбулентный, смешанный);
- многокомпонентность сверхзвуковой газовой струи (как минимум два вида газа - пропан  $C_3H_8$  и кислород  $O_2$ );
- нестационарный теплофизический характер взаимодействия высокотемпературной газовой струи и сложнелегированного гранулированного металлического сплава;
- характер термического цикла в процессе наплавки;

Если производить наплавку вручную, то качество детали будет неудовлетворительным, потому что оператор не может с нужной точностью и скоростью перемещать газопламенную горелку вдоль детали, что приводит к нестабильным эксплуатационным показателям защитных покрытий. Это связано с тем, что в процессе нанесения защитного покрытия необходимо контролировать значительное количество обозначенных выше параметров, т.е. иметь дело с многофакторным процессом, что в полном объеме абсолютно невозможно при ручном управлении.

Для анализа и прогнозирования влияния этих факторов, необходимо использовать теорию планирования. В настоящее время разработаны и используются методы прогнозирования на основе планирования эксперимента и использования критериев подобия.

Ниже рассмотрен один из наиболее распространенных в области сварки методов – планирование эксперимента на основе регрессионного анализа, выполненное применительно к процессу сверхзвуковой газопоршковой наплавки.

Как известно, критерий подобия – это безразмерное (отвлечённое) число, составленное из размерных физических параметров, определяющих рассматриваемое физическое явление. Равенство всех однотипных критериев подобия для двух физических явлений и систем – необходимое и достаточное условие физического подобия этих систем.

Среди множества критериев подобия есть ряд таких, которые на первый взгляд, в условиях отсутствия массива экспериментальных данных, могут упростить понимание процедуры формирования или выбора наиболее рациональных технологических параметров процесса создания защитных покрытий методами наплавки, в частности методом СГП-наплавки.

Первичный анализ показал, что принципиально в физико-технической области исследований существует более 30 видов различных безразмерных критериев [1]. Однако, только 10-12 из них, на наш взгляд, имеет смысл рассматривать с точки зрения потенциального показателя качества покрытий, наплавленных относительно новым технологическим инструментом – сверхзвуковой газовой струей с использованием сложнелегированных порошковых материалов с фракцией частиц в пределах 40-220 мкм.

Так, например, **Число Био (Bi)** – один из критериев подобия стационарного теплообмена между нагретым телом (в данном случае, частицами наплавляемого порошкового сплава) и окружающей средой (пропан-кислородным газовым пламенем в атмосфере воздуха).

Число Био характеризует соотношение между перепадом температуры  $\delta T = T_2 - T_1$ , где  $T_1, T_2$  – температуры в двух точках тела, находящихся на характерном расстоянии  $L$  друг от друга, и температурным напором  $\Delta T = T_w - T_a$  ( $T_w$  – температура поверхности тела,  $T_a$  – температура окружающей среды).

Классическое определение **Числа Био**

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (1),$$

где  $\alpha$  – коэффициент *теплоотдачи* от поверхности тела к окружающей среде,  $\lambda$  – коэффициент *теплопроводности*,

**l-рабочее** расстояние от среза сопла до наплавляемой поверхности.

$\lambda = 0,366 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;  $\lambda = 0,4095 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)}$  ;  
 $\lambda = 0,51 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)}$  (для СГП-наплавки),

$\lambda = 0,4095 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)}$  (для электронно-лучевой наплавки)

$\alpha = 0,0438 \text{ Вт/(см}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$  (для СГП-наплавки),  
 $\alpha = 0,03 \text{ Вт/(см}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$  (для электронно-лучевой наплавки)

$l$  – var;  $l = 10 \dots 60 \text{ см}$

$\frac{\alpha}{\lambda} = 0,11967$ ;  $\frac{\alpha}{\lambda} = 0,10695$ ;  $\frac{\alpha}{\lambda} = 0,0859$ ;

$\frac{\alpha}{\lambda} = 0,0733$

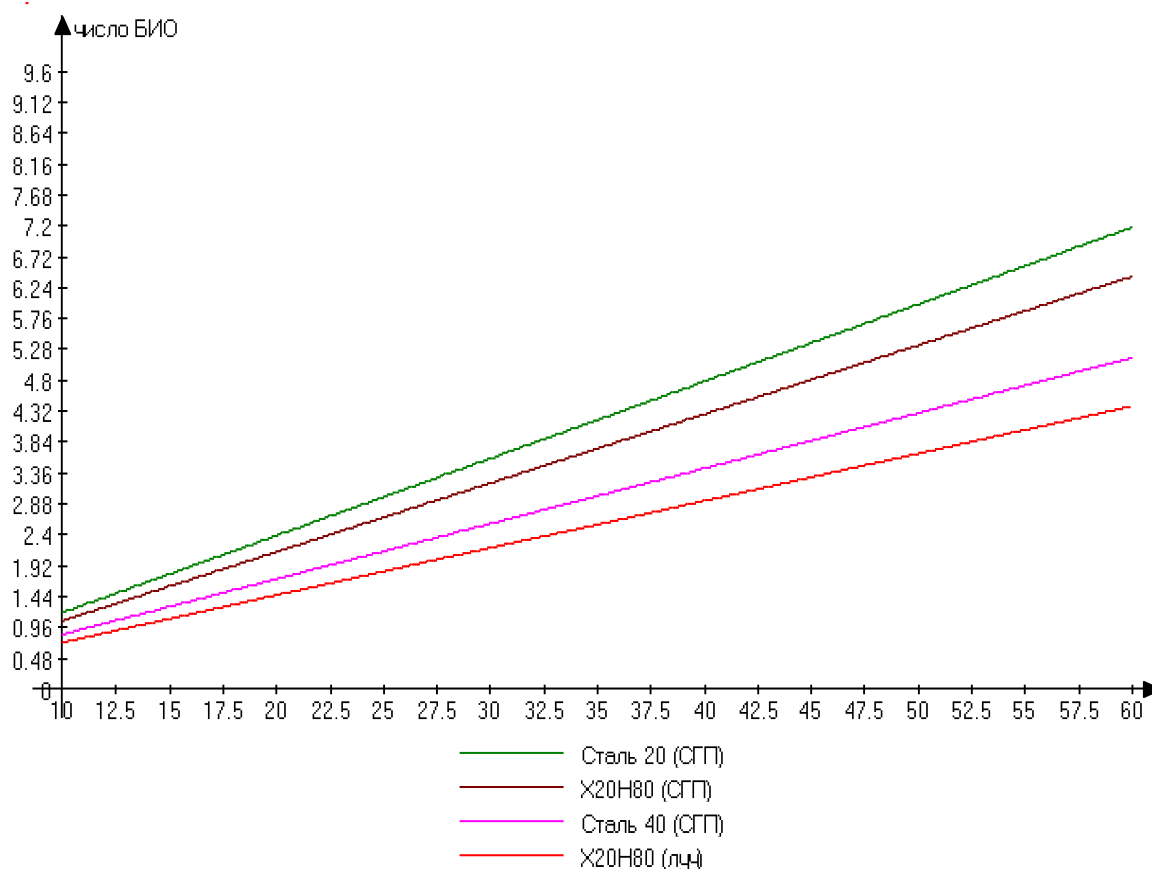


Рисунок 1 - Зависимость безразмерного критерия Био от рабочего расстояния от среза сопла до наплавляемой поверхности

Как видно из графика с увеличением расстояния между заготовкой и газопламенной горелкой число Био увеличивается линейно. Причем самое большое значение этот коэффициент имеет у стали 20 при СГП наплавке (имеющей самую маленькую теплопроводность) и самое низкое у сплава X20H80 при лучевой наплавке [2,3].

Как видно из определения и графика этот безразмерный параметр не может быть использован для целей, поставленных в работе, из-за отсутствия в настоящее время массива достоверных данных о теплофизических характеристиках сверхзвуковых струй и порошковых сплавах в нестационарном режиме нагрева.

В первом приближении анализа число Кнудсена ( $K_n$ ) - один из критериев подобия движения разреженных газов, соответствует критериям выбора рациональных моделей технологических процессов, в частности СГПН-наплавки. Критерий назван в честь датского физика Мартина Кнудсена (1871—1949 гг.).

Этот критерий определяется соотношением

$$K_n = \frac{\lambda}{L} = \frac{K_B \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot P \cdot L}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  - средняя длина свободного пробега молекул в газе;

$L$  - характерный размер течения, например, диаметр свободной струи;

$K_B$  - постоянная Больцмана;

$P$  - давление;

$T$  - температура;

$\sigma$  - поперечный размер частицы.

Численная величина  $K_n$  характеризует степень разреженности газового потока, что является косвенным критерием стабильности газовой струи. Так, если  $K_n \gg 1$  (теоретически при  $K_n \rightarrow \infty$ ), аэродинамические характеристики обтекаемых газовым потоком порошковых частиц наплавляемого сплава можно рассчитывать, не рассматривая

# АНАЛИЗ И ВЫБОР БЕЗРАЗМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

столкновений молекул между собой, а учитывая лишь удары молекул о твёрдую поверхность (т.н. свободное молекулярное течение). Практически такие методы становятся применимыми и используются уже при  $Kn \sim 1$ .

Если  $Kn \ll 1$  (теоретически — при  $Kn \rightarrow 0$ ), справедливо основное предположение гидроаэромеханики о сплошности (континуальности) среды и при расчете течения можно пользоваться уравнениями Эйлера или уравнениями Навье — Стокса с соответствующими граничными условиями. Практически эти методы справедливы и используются уже при  $Kn \sim 10^{-3}$ . В области значений числа Кнудсена  $10^{-3} < Kn < 1$  реализуются различные промежуточные режимы течения разреженного газа с новыми граничными условиями - между свободномолекулярным и континуальным.

Очевидно, что определение последних четырёх параметров для расчёта числа Кнудсена ( $Kn$ ,  $P$ ,  $T$ ,  $\sigma$ ) представляют собой самостоятельную исследовательскую задачу, что делает неприемлемым на данный момент использование этого безразмерного критерия.

**Число Нуссельта ( $Nu$ )** — один из основных критериев подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена (направляемой поверхностью) за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности (в условиях неподвижной среды). Названо в честь немецкого инженера Вильгельма Нуссельта.

$$Nu_l = \frac{al}{\lambda} = \frac{q_c}{q_\lambda}, \quad (3)$$

где  $l$  - характерный размер;  
 $\lambda$  - коэффициент теплопроводности среды;

$a$  - коэффициент теплоотдачи;  
 $q_c$  - тепловой поток за счёт конвекции;  
 $q_\lambda$  - тепловой поток за счёт теплопроводности.

Число Нуссельта всегда больше или равно 1. То есть тепловой поток за счёт конвекции всегда превышает по своей величине тепловой поток за счёт теплопроводности.

Обычно для ламинарных течений число Нуссельта находится в диапазоне от 1 до 20. Большие числа Нуссельта ( $>100$ ) свидетельствуют о сильном конвективном тепловом потоке, что является характеристикой турбулентных течений.

Очевидно, этот критерий с одной стороны, приемлем, поскольку с его помощью возможно оценить степень турбулентности газового и газопорошкового потока при сверхзвуковой наплавке. Но, поскольку для его расчёта требуется знание фундаментальных физических величин он, на наш взгляд, не может быть использован для достоверного анализа конкретного технологического процесса СГП-наплавки.

**Число Пекле, ( $Pe$ )** — безразмерное число, которое характеризует соотношение между конвективным и молекулярным процессами переноса тепла (в частности, характеристик турбулентности) в потоке жидкости или газа (соотношение конвекции и диффузии), а также является критерием подобия для процессов конвективного теплообмена. Названо по имени французского физика Ж. К. Пекле (фр. J. C. Péclet), 1793 – 1857 гг.).

Чаще этот критерий используется при построении расчетных схем (методом конечных элементов) для решения дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих течения вязкой жидкости.

$$Pe = \frac{v \times l}{a}, \quad (4)$$

где  $l$  - характерный линейный размер поверхности теплообмена;

$v$  - скорость потока жидкости относительно поверхности теплообмена;

$a$  - коэффициент температуропроводности;

$C_p$  - теплоемкость при постоянном давлении;

$\rho$  - плотность жидкости;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности жидкости.

**Число Прандтля ( $Pr$ )** — также один из критериев подобия тепловых процессов в жидкостях и газах (названо по имени Людвиг Прандтля):

$$Pr = \frac{n}{a}, \quad (5)$$

$$Pr = \frac{m \times C_p}{l}, \quad (6)$$

где  $n = m/\rho$  - кинематический коэффициент вязкости;

$m$  - динамический коэффициент вязкости;

$\rho$  - плотность;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  
 $a = \lambda / (r \times C_p)$  - коэффициент температуропроводности;

$C_p$  - удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении.

Число Прандтля - физическая характеристика среды и зависит только от её термодинамического состояния.

Следует подчеркнуть, что у газов число Прандтля с изменением температуры практически не изменяется (для двухатомных газов  $Pr \geq 0,72$ , для трёх- и многоатомных газов  $0,75 \geq Pr \geq 1$ ).

Число Прандтля связано с другими критериями подобия - числом Пекле  $Pe$  и числом Рейнольдса  $Re$  соотношением  $Pr = Pe/Re$ .

**Число Рейнольдса ( $Re$ )** - безразмерное соотношение, которое, как принято считать, определяет ламинарный или турбулентный режим течения жидкости или газа, что определяет интерес с точки зрения приемлемости этого критерия для определения параметров качества сверхзвуковой газовой струи. Так как предположительно именно ламинарный газопорошковый поток, по нашему мнению, должен рассматриваться как инструмент для создания однородных структур наплавленных износостойких покрытий.

Критерий назван в честь выдающегося английского физика О. Рейнольдса (1842—1912 гг.). Физический смысл числа Рейнольдса – это отношение сил инерции, действующих в потоке, к силам вязкости.

Число Рейнольдса определяется следующим соотношением: (7)

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}$$

где  $\rho$  - плотность среды;

$v$  - характерная скорость;

$l$  - характерный размер;

$\mu$  - динамическая вязкость среды.

Переход от ламинарного к турбулентному режиму происходит по достижении так называемого критического числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ . При  $Re < Re_{кр}$  течение происходит в ламинарном режиме, при  $Re > Re_{кр}$  возможно возникновение турбулентности. Критическое значение числа Рейнольдса зависит от конкретного вида течения (течение в круглой трубе, обтекание конусных поверхностей и т. п.). Например, для течения в круглой трубе  $Re_{кр} \sim 2300$ . Число Рейнольдса как критерий перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения и обратно относи-

тельно хорошо действует для напорных потоков. Очевидно, что это отвечает требованиям к критериям для оценки качества сверхзвукового газопорошкового потока. При переходе к безнапорным потокам переходная зона между ламинарным и турбулентным режимами возрастает, и использование числа Рейнольдса как критерия не всегда правомерно.

Однако анализ наличия в справочной литературе фундаментальных физических величин, в частности 1 и 4 параметров ( $\rho$  и  $\mu$ ) показал практическое отсутствие данных, которые можно было бы использовать при расчёте этого критерия как показателя степени турбулентности газопорошкового потока в процессе СГП – наплавки.

В качестве безразмерных критериев, заслуживающих внимание с точки зрения решения диссертационных задач, рассмотрено также **число Стэнтона ( $St$ )**. Число названо по имени английского учёного Т. Стэнтона (англ. Th. Stanton; 1865 — 1931 гг.).

Это - один из критериев подобия тепловых процессов, характеризующий интенсивность диссипации энергии в потоке жидкости или газа:

$$St = \frac{a}{C_p \times r \times v}, \quad (8)$$

где  $a$  - коэффициент теплоотдачи;

$C_p$  - удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении;

$r$  - плотность;

$v$  - скорость течения.

Число Стэнтона является безразмерной формой коэффициента теплоотдачи и связано с числом Нуссельта и числом Пекле соотношением:

$$St = \frac{Nu}{Pe} \quad (9)$$

Неприемлемость использования этого критерия в данном диссертационном исследовании также определяется отсутствием фактических числовых значений расчётных параметров и сложностью их экспериментального определения.

**Число Струхалёва ( $Sh$ )** - один из безразмерных критериев подобия нестационарных течений жидкостей и газов, характеризующий постоянство протекания процессов во времени. Поэтому в первом приближении этот критерий приемлем для оценки постоянства параметров истечения газопорошко-

# АНАЛИЗ И ВЫБОР БЕЗРАЗМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

вой струи, как одного из факторов, влияющих на качество покрытий, наплавляемых способом СГПН. Число названо по имени чешского учёного Винсенса Струхали (1850—1923 гг.).

Одна из формул, описывающих число Струхали:

$$Sh = \frac{fL}{V}, \quad (10)$$

где  $f$  - частота вихреобразования;  
 $L$  - характерная длина (например, диаметр газопоршковой струи);  
 $u$  - скорость потока.

Число Струхали является функцией числа Рейнольдса  $Re$ , и в диапазоне  $200 < Re < 200\,000$  действует эмпирический закон постоянства числа Струхали:  
 $Sh \simeq 0.2 - 0.3$ .

**Число Фруда (Fr)** - также один из критериев подобия движения жидкостей и газов, является безразмерной величиной. Применяется в случаях, когда существенно воздействие силы тяжести, т.е. возможно для процессов наплавки порошковых сплавов крупной фракции (порядка 240 мкм и выше). Введено Уильямом Фрудом (William Froude) в 1870 г.

Число Фруда характеризует соотношение между силами инерции и тяжести, действующими на элементарный объём в данном случае газа:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \quad (11)$$

где  $u$  - скорость (в данном случае скорость пролёта частицы сплава);  
 $g$  - ускорение свободного падения;  
 $L$  - характерный размер тела (в нашем случае частицы порошкового сплава).

Следует сразу отметить, что, несмотря на внешнюю схожесть задач, Число Фруда практически всегда применяют при моделировании течений жидкости, в частности, воды в открытых руслах и испытаниях моделей гидротехнических сооружений. Это делает неприемлемым использование этого критерия для оценки качества сверхзвуковых газопоршковых струй в технологических процессах наплавки.

**Число Фурье (Fo)** или критерий Фурье (назван в честь французского физика и математика Жана Фурье) - один из критериев подобия нестационарных тепловых процессов, к которым, по сути, относится процесс наплавки сложнолегированных порошковых сплавов газовой струей со сверхзвуковой скоростью истечения. Характеризует соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей среде (газовом потоке) и скоростью перестройки поля температуры внутри рассматриваемой системы (частицы порошкового сплава).

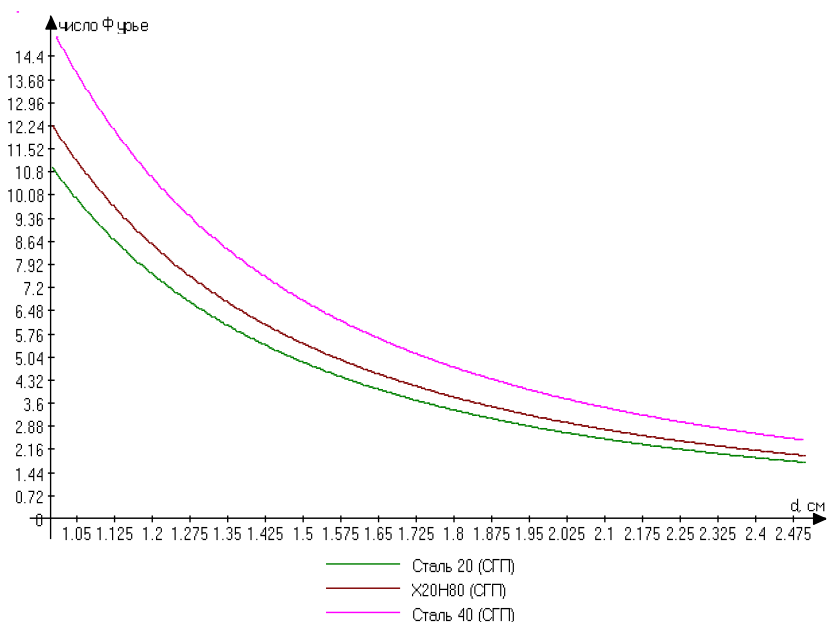


Рисунок 2 - Зависимость безразмерного критерия Фурье от диаметра пятна нагрева сверхзвуковой газовой струей

Величина этого критерия зависит от размеров тела и коэффициента его теплопроводности:

$$Fo = \frac{\alpha t}{d^2}, \quad (12)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплопроводности (в данном случае частицы легированного сплава);

$t$  - характерное время изменения внешних условий (время пролёта частицы в газовом пламени от среза сопла до наплавляемой поверхности);

$d$  - характерный размер тела (фракция порошкового сплава).

Число Фурье является критерием гомохронности тепловых процессов, т.е. связывает времена различных эффектов. Критерий Фурье вместе с критерием Био являются определяющими при решении задач нестационарной теплопроводности, описываемых уравнением теплопроводности. Определяемым критерием в таких задачах является безразмерная температура:

$$\theta = \frac{T - T_f}{T_0 - T_f}, \quad (13)$$

где  $T$  - текущая температура тела;

$T_f$  - температура среды;

$T_0$  - начальная температура тела.

Анализ приемлемости этого критерия для исследуемого процесса показал, что параметры, необходимые для вычисления числа Фурье в данном конкретном технологическом процессе, могут иметь широкий диапазон вариаций. Так, например, фракция порошковых сплавов, выпускаемых отечественной промышленностью, предполагает достаточно большой разброс: до 50% от минимального размера частиц в каждом диапазоне. Это в свою очередь будет определять нестабильность времени пролёта частиц в газовом пламени. Следовательно, 2 параметра из 3-х в этом критерии будут иметь неопределённость, что не позволяет использовать число Фурье в роли критерия качества процесса СГП-наплавки.

Следующий критерий - Число Шмидта ( $Sc$ ) - безразмерное число, показывающее соотношение интенсивностей диффузии импульса (то есть вязкость среды) и диффузии вещества.

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \quad (14)$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость среды;

$D$  - коэффициент диффузии.

В некоторых случаях этот критерий используется для описания состояния газовой среды. Так в совершенных газах  $Sc = 1$ , а в реальных газах оно может отличаться от 1 на десятки процентов. Но преимущественно число Шмидта является критерием подобия для течений жидкости, в которых наблюдаются одновременно как переносы вещества (обычно примеси), так и вязкие эффекты, поэтому он также неприемлем для оценки состояния сверхзвукового газопорошкового потока в процессе наплавки.

Рассмотрим ещё один критерий подобия с этой же точки зрения.

Число Маха ( $M$ ) — один из критериев подобия в механике жидкости и газа. Представляет собой отношение скорости течения в данной точке газового потока к местной скорости распространения звука в движущейся среде. Зачастую используется упрощённое определение числа Маха как отношения скорости тела, движущегося в газовой среде, к скорости звука в данной среде. Такое определение не вполне корректно, так как скорости потоков в окрестностях движущегося тела зависят от его формы.

Чаще всего такое определение используется в оценочных характеристиках летательных аппаратов: их скорость задаётся безразмерным числом в формате  $M \times n$ , где  $n$  - десятичное число. Например, скорость  $M4$  - обозначает что скорость пролёта частицы порошкового сплава в газовом потоке в 4 раза превышает скорость звука. Пересчёт такой скорости в линейную скорость затруднён, так как скорость звука в воздухе зависит от его плотности и температуры.

Вместе с тем шкала скоростей Маха широко применяется в технике, так как аэродинамические свойства и условия обтекания твёрдых тел при близких значениях числа Маха также близки.

Число Маха рассчитывается как

$$M = V/a, \quad (15)$$

где  $V$  - скорость газового потока;

$a$  - скорость звука.

Этот критерий является мерой влияния сжимаемости газовой среды в потоке при заданной скорости на его поведение (турбулентность или ламинарная истечения потока газа).

# АНАЛИЗ И ВЫБОР БЕЗРАЗМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

Из уравнения состояния идеального газа следует, что относительное изменение плотности (при постоянной температуре) пропорционально изменению давления:

$$dp/\rho \sim dp/p.$$

А согласно закону Бернулли разность давлений в потоке  $dp \sim dV$ , то есть относительное изменение плотности определяется как:  $dp/\rho \sim dp/p \sim dV/p$ .

Поскольку скорость звука  $a \sim \sqrt{p/\rho}$ , то относительное изменение плотности в газовом потоке пропорционально квадрату числа Маха:

$$\frac{dp}{\rho} \sim \frac{v^2}{a^2} = M^2 \quad (16)$$

Таким образом, анализ наиболее часто используемых в технике безразмерных критериев показал следующее. Ввиду отсутствия фактических сведений о характеристиках сверхзвукового газового потока, насыщенного твёрдыми частицами сложнолеги-

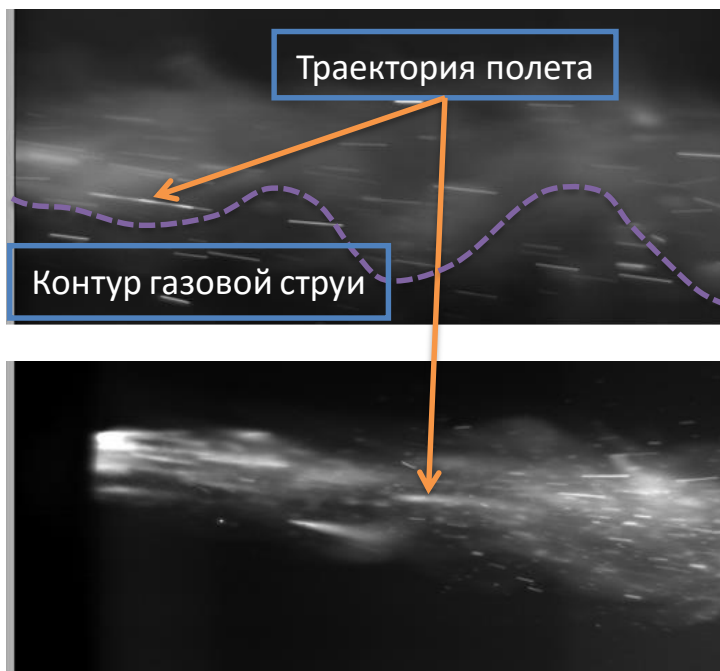
рованных сплавов (в данном случае системы Ni-Cr-B-Si) нестационарных по массе и объёму число Маха как безразмерный показатель наиболее приемлем в оценке процесса СГП-наплавки по своей физической сути.

Кроме того число Маха относительно просто и точно определяется по меньшей мере двумя методами:

1) расчётным, т.к. в его формулу входят два параметра, достаточно просто определяемые расчётно-экспериментальным путём,

2) конструктивным способом – соблюдением размеров при исполнении конфигурации сопла Лавалья для формирования сверхзвуковой газопоршковой струи [65].

При этом в результате совместно с соавторами экспериментальных исследований с помощью методики высокоскоростной съёмки быстротекающих физических явлений в сверхзвуковых газопоршковых струях. В результате установлено, что в диапазоне M4-M5 сверхзвуковой газопоршковый поток обладает существенно большей стабильностью, чем при M3 (рисунок 3).



Турбулентный характер истечения сверхзвукового газопоршкового потока, число Маха M3

Ламинарный характер истечения сверхзвукового газопоршкового потока, число Маха M4

Сплав ПГ-СР4

Рисунок 3 - Характерные фотографии турбулентного и ламинарного истечения сверхзвукового газопоршкового потока в процессе наплавки покрытий

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования [4], более плотная в видимом спектре по своему сечению газопорш-

ковая струя при числе Маха M5, в отличие от распределённой, в процессе наплавки способствует формированию стабильных по внешнему виду наплавленных



защитных покрытий, а также позволяет предполагать сохранение и повторяемость качественных характеристик наплавленных покрытий, в частности фазового состава по всему объёму наплавленного металла, а соответственно характеристик износостойкости, как искомой величины.

**Список литературы**

1. Кирпичев М. В. Теория подобию — М., 1953;
2. Радченко М.В., Киселёв В.С., Шевцов Ю.О. Состояние и перспективы развития сверхзвуковой газопорошковой наплавки покрытий из сплавов системы Ni-Cr-B-Si Ползуновский альманах, 2011. - № 4.- С. 96-98. 3 с.
3. Радченко М.В., Радченко В.Г., Шевцов Ю.О. Комплексный анализ износостойких защитных покрытий, наплавленных электронными пучками в вакууме. Ползуновский вестник, № 2 с. 67-71. 2006.
4. Радченко М.В., В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко, В.Г. Радченко
5. Уварова С.Г. Методика прогнозирования качества защитных износостойких покрытий, выполненных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки на объектах Ростехнадзора. Сварка и диагностика, 2014. - № 4. - с. 14-18.