

Горбунов А. В.¹, Девойно О. Г.¹, Поляков А. Н.¹,

Есипчук А. М.², Горбунова В. А.¹, Яцкевич О. К.¹

**О ПРИМЕНЕНИИ ПЛАЗМЕННЫХ АППАРАТОВ
С РЕАКЦИОННО-АКТИВНЫМИ ГАЗАМИ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ
ПОКРЫТИЙ И ПРИ СФЕРОИДИЗАЦИИ ПОРОШКОВ
ИЗ СПЛАВОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ**

1. Белорусский национальный технический университет,

Минск, Беларусь

2. Aeronautics Institute of Technology (ITA),

Сан Жозе дос Кампос, Бразилия

В работе рассмотрены некоторые особенности применения особой разновидности плазменных аппаратов (дуговых плазмотронов постоянного тока для напыления и плазмотермических реакторов) – на химически реагирующих (в области > 1500 К) газах, перспективной для технологий получения при давлении, близком к 0,1 МПа, покрытий из сплавов или из оксидных и карбидных материалов и при сфероидизации порошков из сплавов (причем, потенциально, и высокоэнтропийного типа, содержащих ~ 20 % никеля). Проведен подбор группы специальных теплотехнических параметров для инженерной оценки и прогнозирования оптимальных режимов работы названных плазменно-топливных систем (в интервале мощности до 50 кВт), с использованием упрощенной модели для высокоэнтальпийной среды, генерируемой плазмотронами на реагирующих газах. Данные системы, как показал анализ, могут обеспечить повышенную энергоэффективность (по предварительным расчетным данным) как при напылении ряда металлических и других износостойких покрытий, так и для процесса получения сфероидизированных оплавленных порошков сплавов.

Введение и задача исследования. Обзор технической информации за последние годы показывает, что группа технологий плазменного напыления (в первую очередь, напыления при атмосферном давлении – APS (atmospheric plasma spraying)) занимает в общем объеме рынка газотермических функциональных (износостойких и других) покрытий в высокоразвитых странах долю в 30 % и выше [1]. В этой группе процессов, использующих в основном электродуговые плазмотроны (ЭДП) постоянного тока, формируется новое направление – с применением углеводородов (алкановых и других C_xH_y) в ЭДП и в комбинированных устройствах (его можно назвать FA-APS (fuel assisted APS)), в частности, с использованием синтез-газа (СГ) на основе смесей H_2 и CO , как плазмообразующих сред. Данного

типа аппараты апробированы в ряде стран (благодаря их техническим преимуществам, в т. ч. экзотермичности), – не только для FA-APS, но и для смежных процессов – при обработке ряда материалов, в металлургии и химических технологиях, – при мощности ЭДП и плазменных реакторов на их основе до 1500 кВт. Систематизация данной подгруппы показывает, что широкое применение плазмотронов с C_xH_y пока затруднено как из-за широкого диапазона варьирования состава и степени окисленности данного СГ-плазмообразователя и тепловых параметров его струй (что осложняет моделирование и прогноз параметров для ЭДП), так и из-за недостатков применявшихся аппаратов, в частности, не всегда высокого теплового КПД плазмотронов (его значения по опубликованным данным – 44–82 %). В таких ЭДП в ряде случаев наблюдалось снижение КПД на 20–30 % (по сравнению с конструкциями, работающими на азоте или воздухе), из-за теплотерь в электроды от высокотеплопроводных и сильно излучающих газов, таких, как продукты сгорания углеводородов (CO_2 и H_2O) или от синтез-газа. По данным анализа ЭДП на газовых смесях с C_xH_y (в [2–14]), – элементные формулы (ЭФ) типичных СГ-плазмообразователей следующие: $CH_{2,67}O$, $CH_{0,8}O_{1,6}$, CH_2O , $CH_3O_{1,25}$ и $CH_{0,021}O_{1,368}N_{0,084}$ [7]; $CH_{4,52}O_{2,57}$ [8]; от $CH_{0,68}O_{1,66}$ до $CH_{1,43}O_{1,29}$ [2–3; 6]; от $CH_{0,49}O_{1,75}$ до $CH_{1,43}O_{1,29}$ [2–3; 6; 9]; от $CH_{0,53}O_{1,73}$ до $CH_{0,55}O_{1,73}$ и $CH_4O_{3,36}N_{12,65}$ [5]; от $CH_{1,51}O_{0,87}$ до $CH_{0,35}O_{1,74}$ [10]; от $CH_{2,65}O_{0,041}N_{0,155}$ до $CH_{2,65}O_{3,44}N_{12,95}$ [11]; от $CH_4O_{1,08}N_{4,061}$ до $CH_4O_{0,892}N_{3,356}$ [12]. Соответствующий этим составам концентрационный показатель (описан далее) – общая степень окисленности O х D основных компонентов ($CO + H_2$) синтез-газа – находится в интервале от –0,26 до 0,34.

Использование СГ в плазмотронах в FA-APS-технологиях позволяет, как показано [2–6; 12–15], применять их при обработке различных порошков – металлических (из никелевых сплавов и др.) и керамических (карбидных, оксидных). При этом, генерацию СГ для FA-APS осуществляли из алканов (природный и сжиженный газы) с вводом CO_2 , водяного пара или воздуха. В целом, анализ информации по формированию износостойких покрытий на сталях с плазменно-топливными аппаратами (ПТА) показал возможность опытно-промышленного применения ряда процессов уже в краткосрочной перспективе. Анализ по интенсификации APS с порошковыми материалами показывает целесообразность использования C_xH_y –компонентов в системах напыления для целей: а) повышения энергоэффективности (за счет интенсификации нагрева порошков в газах систем $C-H-O$ и $C-H-O-N$) по сравнению с ЭДП для аналогичного нанесения покрытий, работающими на традиционных газах (азот, аргон и их смеси с H_2 ; б) оптимизации химического состава газового потока (путем управления степенью окисленности смеси за счет ввода топлива) при напылении материалов, чувствительных к другим плазмообразующим газам при APS (что может вызывать их нежелательную диссоциацию (как, например, карбидов Cr_7C_3 , WC в среде Ar или N_2) или окисление (в воздушной плазме, например, в ряде сверхзвуковых APS-установок разработки ИЭС НАН

Украины). Сделанный анализ известных ПТА-систем (в основном, демонстрационного масштаба) включает устройства для нанесения покрытий и родственных процессов с топливными добавками – как с вводом их (в сочетании с CO_2 , воздухом или N_2) в сам плазмотрон, так и более сложной «комбинированной» конструкции. Данные [4–16], позволяют выделить направления, дающие предпосылки для интенсификации: 1) мощность плазменного источника нагрева напыляемого материала; 2) составляющая удельной интенсивности нагрева материала, определяемая свойствами теплоносителя (струи ЭДП), выражаемыми термодинамическими функциями (в т. ч. энтальпии); 3) составляющая интенсивности нагрева материала, зависящая в основном от уровня переносных свойств теплоносителя – его теплопроводности k , вязкости η и излучательной способности ϵ (в т. ч. в ИК-области спектра).

С учетом сказанного, как *задача данной работы* нами была выбрана попытка подбора группы упрощенных теплотехнических параметров, удобных для инженерной оценки и прогнозирования оптимальных режимов названных плазменно-топливных систем (которые пригодны как для напыления покрытий, так и, в определенной степени, для получения сфероидизированных металлических порошков), с использованием моделей высокоэнтальпийной среды, создаваемой ЭДП на реакционно-активных газовых смесях (с участием активных или пассивных (например, CO_2) окислителей). При этом, как один из удобных для анализа объектов можно использовать опубликованный в [17, 18] набор экспериментальных данных.

Методика исследования и результаты. С целью получения информации для прогнозирования оптимальных режимов плазменно-топливных систем как для напыления износостойких покрытий, так и для получения сфероидизированных порошков (с их оплавлением в плазменных струях), возможно использование упрощенных тепловых моделей высокоэнтальпийной среды, создаваемой ЭДП. В частности, при оценке особенностей тепло- и массопереноса в условиях аппаратов плазменно-топливного типа может быть применен такой упрощенный теплотехнический параметр, как фактор нагревательной способности AHF_s [19]. Он позволяет приблизительно сравнивать режимы с разными вариантами теплоносителей, т. к. учитывает конвективный теплообмен теплоносителя с нагреваемым порошком, и он был апробирован (при анализе плазменных струй разных газов [19]) в следующей форме:

$$AHF_s = \frac{\langle k_g \rangle}{(\langle \eta_g \rangle)^{1/2}}. \quad (1)$$

Формула (1) получена при упрощении зависимости для этого фактора:

$$AHF = \frac{L(T_g - T_p)^2 (\langle k_g \rangle)^2}{\langle \eta_g \rangle \nu_g} = \frac{\tau(T_g - T_p)^2 (\langle k_g \rangle)^2}{\langle \eta_g \rangle}. \quad (2)$$

Здесь: L – длина термической зоны плазменной струи (где идет нагрев частиц порошка), $\tau = L / v_g$ – усредненное время прохождения плазменным газом данной зоны, T – температура, начальная температура частиц $T_p \approx 300$ К, v – линейная скорость, d_p – диаметр частиц, ρ – плотность; индексы: g – газ, p – частицы. Данный фактор использует осредненные (в пределах выбранной разности температур теплоносителя и нагреваемого порошка) коэффициенты динамической вязкости $\langle \eta \rangle$ и теплопроводности $\langle k \rangle$ для газа (или газовой смеси), вычисляемые по интегральным выражениям [19]:

$$\langle \eta_g \rangle = \frac{1}{(T_g - T_p)} \int_{T_p}^{T_g} \eta_g(T) dT \text{ и } \langle k_g \rangle = \frac{1}{(T_g - T_p)} \int_{T_p}^{T_g} k_g(T) dT. \quad (3)$$

Фактор ANF выводится на основе кинетической модели нагрева порошков при плазмоструйной обработке (в допущении упрощенного механизма межфазового теплопереноса в системе), которая использует уравнение энергобаланса гетерогенного одномерного потока с частицами.

При нагреве частиц в режимах газотермического струйного нагрева, частицы порошка диаметром d_p могут быть полностью расплавлены при условии, что: $ANF > DMF$. В упрощенном случае для плавящихся керамических и иных частиц авторами [20] показано, что имеет место прямо пропорциональная зависимость: $DMF \sim \Delta H_m^2 d_p^2$. Здесь обозначены: DMF – фактор трудности плавления материала, ΔH_m – энтальпия плавления, d_p – диаметр нагреваемых частиц. Например, для такой группы материалов, как $Zr B_2$, Cu , W , Ta , при напылении их порошков (диаметром 25 мкм), интервал значений DMF , как установлено, составляет $(1,5-10,8) \cdot 10^5$ Дж² / (кг м) [20].

Для нашей задачи оценивания режимов работы ПТА желательно рассмотреть и иные параметры реагирующих высокотемпературных систем. Так, в частности, одни из важнейших показателей – это химические факторы для определения соотношения H_2 / CO в реагирующих смесях. Т. к. доля кислорода в таких смесях влияет на соотношение H_2 / CO в получаемом СГ (как выявлено на примере ряда аллотермических процессов с конверсией органических топлив), то китайскими специалистами (группа *Yi Cheng*) ранее был предложен новый параметр – эффективное отношение H / C ($R_{H/C}$):

$$R_{H/C} = \frac{n_H - n_O}{n_C}, \quad (4),$$

где n – число молей атомов C , H , O (во всех веществах газа) в составе газовой фазы в высокоэнтальпийных системах (в т. ч. в процессах напыления).

Кроме этого важного коэффициента $R_{H/C}$, может быть потенциально информативен еще и такой параметр (как упоминалось) для обсуждаемых ре-

акционных систем с разными окислителями, как степень окисленности основных компонентов СГ (при его составе, условно описываемом брутто-формулой (БФ) $C_{k1} H_{k2} O_{k3} N_{k4}$), т. е. избыточное содержание атомов кислорода в его формуле (упрощенно отображая СГ как простую смесь газов: $k_1 CO + 0,5k_2 H_2 + 0,5(k_3 - k_1) O_2 + 0,5k_4 N_2$), равное:

$$OxD = \frac{(k_3 - k_1)}{k_1 + k_2 + k_3}, \quad (5)$$

и максимальное ее значение (при достижении полного окисления СГ в H_2O и CO_2): $OxD_{max} = 1/3$. Нормированное же значение данной степени окисленности (фактически, это мольная доля избыточных (сверх содержащихся в СО) атомов кислорода) будет следующим: $OxD(n) = 3OxD$.

При этом массовая степень окисленности (не нормированная) для смеси на входе в ЭДП $OxD'(n)_{i-m}$ или для СГ на выходе из ЭДП $OxD'(n)_{f-m}$ может быть выражена в следующем виде (приняв ее как уровень накопления атомов кислорода в составе газообразных веществ С–Н–О-системы (побочных продуктов при образовании СГ) со стехиометрией, при которой число атомов О в веществе больше числа атомов С в нем, т. е. $n_O/n_C > 1,0$ (причем в вещество могут входить как С и/или О, так и другие элементы)):

$$OxD' = \frac{m_O}{m_{sum}} = \frac{(k_3 - k_1) \cdot M_O}{m_{sum}}, \quad (6)$$

где $m_O = \{(k_3 - k_1) \cdot M_O\}$ – масса «избыточного» кислорода во входной газовой смеси или в выходном СГ с брутто-формулой $C_{k1} H_{k2} O_{k3} N_{k4}$, M_O – молярная масса кислорода (15,99 кг/кмоль), m_{sum} – полная масса условной формульной единицы $C_{k1} H_{k2} O_{k3}$ (т. е. безазотной части (точнее «углеродно-водородно-кислородной») входной газовой смеси или выходного СГ системы С – Н – О – N (с брутто-формулой $C_{k1} H_{k2} O_{k3} N_{k4}$) или более многокомпонентных систем).

В ходе теоретической оценки мы также применяли термохимический анализ на основе термодинамического (ТД) метода, при котором состав и ряд свойств реагирующей смеси рассчитывается по критерию нахождения максимума энтропии для выбранных равновесных или квазиравновесных систем в изобарном приближении. Для расчета использовался проверенный ранее для задач химической термодинамики [21; 4] код «ТЕРРА» (МГТУ).

Далее в табл. 1 приведены данные по химическому составу синтез-газа на выходе из анода ЭДП по экспериментальным данным [17] (в режимах с отношением объемных расходов газов в плазмообразующей смеси на входе в ЭДП $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 1:1$ и $2:1$, а также группа рассчитанных нами (на основании данных по составу СГ) теплотехнических параметров плазменных струй газовых смесей системы С – Н – О после данных ЭДП в сравнении с данными для индивидуальных газов – CO_2 и метана. В данную группу

параметров нами внесен как набор значений вышеуказанных концентрационных характеристик для СГ (по выражениям (4–6)), так и обобщенные тепловые/термохимические параметры (удобные в соответствии с методами теории подобия для моделирования и инженерного расчета [11; 14] рассматриваемых видов ЭДП и аппаратов с их использованием): а) значения фактора $АНF_s$ (по выражению (1)); б) числа Прандтля для газа ($Pr = \eta \cdot c_p / \kappa$, где c_p – изобарная теплоемкость газа) для «замороженной» и для равновесной (реагирующей) газовой смеси (для СГ); в) безразмерный энергокритерий K^*_{en} (определяемый с использованием нормировки «реакционной составляющей» энтальпии данной газовой системы (не входящей в «замороженную» часть энтальпии) по тепловому эффекту возможной преобладающей реакции в данной системе $\Delta_r H^0_{298}$); г) удельные «полные» энергозатраты EC на 1 кг конвертируемого CH_4 в ЭДП и аналогичные «химические» энергозатраты EC_{ch} (полуэмпирический параметр, равный отношению части, идущей на «химизм» от расчетного значения разности полных энтальпий реакционной смеси при T_0 (≈ 300 К) и при характеристической температуре T_{max} (при 3,0 кК, 4,5 кК или иной) к произведению степени конверсии метана в ЭДП α_{ig}^* на его массовую долю во входной смеси перед ЭДП. Также нами в проведенных расчетах была приближенно учтена возможность эффекта сепарации плазмообразователя в разрядной камере ЭДП (в основном, вероятно, в его анодной части) на две зоны (первую, обогащенную более тяжелым компонентом – молекулами CO_2 , и вторую – обедненную по CO_2 (в ней принято 0 % CO_2)). Найденный при этом элементный состав смеси в условной зоне № 2 в ЭДП и значения термохимических и тепловых параметров для этой зоны даны в табл. 1.

Сравнение полученных характеристик для рассмотренных вариантов трансформации исходной двухкомпонентной газовой смеси в условиях ЭДП показывает достаточной сложный характер физико-химических процессов в плазменной среде, в которой может в той или иной степени реализовываться ряд слабо и сильно эндотермических реакций, указанных в табл. 2 (и даже возможны экзотермические реакции, например, № (6–8) в этой табл.). Полученный набор данных характеристик, очевидно, будет полезен в дальнейшей разработке ПТА с повышенным уровнем энтальпии теплоносителя для технологий напыления металлических и иных покрытий из порошковых материалов (никелевых сплавов и других) и технологий сфероидизации подобных порошков. При этом особо отметим, что значения такого информативного полуэмпирического параметра, как удельные энергозатраты на «незамороженную» часть прироста энтальпии (т. е. на химические превращения в газах) EC_{ch} для обоих базовых случаев работы ЭДП (при $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 1:1$ и $2:1$) очень близки в области температур до 3000 К и не превышают уровня в ~ 30 – 31 МДж на 1 кг конвертируемого (в синтез-газ) метана. Кроме того, характерно, что, не смотря на то, что в режиме ЭДП с $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 1:1$ значения доли энтальпии на «химическую» конверсию исходной ($CO_2 + CH_4$) – смеси в синтез-газ $\Delta H / H_0$, превосходят уровень

$\Delta H / H_0$ для режима с $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 2:1$ и для случая чистого CO_2 , – но значения безразмерного энергокритерия K_{en}^* (введенного нами (как аналога плазмохимическому энергетическому критерию Суриса для реакторов [22]) и отражающего степень завышения величины «реакционной/химической» части от полной энтальпии системы (рассчитанной в ТД-приближении) над тепловым эффектом реакции, преобладающей в этой системе) в данном режиме работы ЭДП при $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 1:1$ явно выше, т. е. хуже (на 30–50 %), по сравнению с режимом ЭДП при $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 2:1$ (для которого $K_{en}^* = 0,95 \div 3,76$ в области T до 4,5 кК) и со случаем индивидуального CO_2 .

Также существенно (с учетом данных, суммированных в табл. 1 и 2), что в условиях ЭДП и, возможно, также комбинированных ПТА, работающих на плазмообразователях с метаном или другими алканами, с достаточной вероятностью имеет место (судя по наличию на выходе из ЭДП C_2H_2 и водяного пара в существенных концентрациях) значительный вклад (> 50 %) пиролизного механизма разложения углеводорода по реакциям типа (3), (5) и по механизму Касселя [22] (см. табл. 2) как для систем на эндотермически реагирующих смесях ($CO_2 + CH_4$), так и для ЭДП и ПТА на экзотермических плазмообразующих смесях типа (алкан + O_2 (или воздух)).

Отметим, что для систем с плавлением материалов, как в анализируемой нами группе FA-APS может быть проведено приближенное сравнение характеристик, характеризующих интенсивность нагрева в условиях теплоносителей, генерируемых различными плазменными аппаратами. С использованием данных табл. 1 и табл. 3 нами проведено сравнение значений ANF_s и также безразмерного энтальпийного фактора $\Delta H_{gT} / \Delta H_w$ (прямо пропорционального величине энтальпии теплоносителя при выбранных температурах) для газов химически инертного типа (N_2), восстановительного типа (смесь H_2 и Ar) и высокоэнтальпийных смесей из комбинаций углеводородов с окислителями (т. е. применимых в FA-APS-аппаратах для напыления). Результаты данного сравнения указывают на возможность более интенсивной теплоотдачи к порошковым материалам в теплоносителях, получаемых в смесях с C_xH_y (причем, особенно, при температурах ≥ 3000 К), для которых значения ANF_s (и производного от него параметра, выражаемого как $ANF_s / (\Delta H_{gT} / \Delta H_w)$) существенно выше (в $\sim 2,5$ –3 раза (при 3000 К)), чем для азота или воздуха. По переносным свойствам воздух при $T > 1500$ К достаточно близок к N_2 .

Таблица 1 – Состав синтез-газа на выходе из анода плазмотрона по экспериментальным данным [17] – в режимах с соотношением объемных расходов газов (CO_2 и CH_4) в плазмообразующей смеси на входе в ЭДП $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 1:1$ и 2:1 (т. е. при 2,743 и 5,486 по массовому соотношению), а также теплотехнические параметры струй после ЭДП (в условиях с $P = 0,101$ МПа); для сравнения даны расчетные данные для CO_2 и CH_4

Режим работы ЭДП → ↓ Состав СГ и параметры плазменных струй ↓		При $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 1:1$ на входе в ЭДП	При $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 2:1$ на входе в ЭДП	100 % CO_2	100 % CH_4
Концентрации газов в струе экспериментального СГ на выходе из ЭДП (из его анода), об. % (нормированные к сумме 100 %)	водород H_2	1,4 / 33,02 (**)	1,3 / 9,83 (**)	–	–
	монооксид углерода CO				
	метан CH_4	21,7 / 14,74 (**)	18,5 / 16,90 (**)	–	–
	диоксид углерода CO_2	11,7 / 7,95 (**) 32,7 / 22,21 (**)	10,6 / 9,68 (**) 42,3 / 38,65 (**)	– 100	100 –
	ацетилен C_2H_2	19,1 / 12,97 (**) 13,2 / 8,97 (**) 0,2 / 0,14 (**)	8,3 / 7,58 (**) 18,4 / 16,81 (**) 0,6 / 0,55 (**)	– – –	– – –
Отношение H_2 / CO в экспериментальном СГ (#)		0,065 (2,240 (\$))	0,070 (0,582 (\$))	–	–
Элементный состав (брутто-формула (БФ)) для смеси перед ЭДП / и для СГ на выходе из ЭДП		$CH_2O / CH_{1,095}O_{0,965}$	$CH_{1,333}O_{1,333} / CH_{1,118}O_{1,394}$	CO_2	CH_4
Усредненная молярная масса смеси (по БФ) перед ЭДП и / СГ на выходе из ЭДП (г/моль)		30,026 / 28,553 (29,466 (\$))	34,681 / 35,440 (35,657 (\$))	44,01 / 44,01(‡)	16,04 / 16,04(‡)
Степень конверсии входных газов внутри ЭДП α_{ig} (по экспериментальному составу СГ), мас. %; α_{ig}^* (по «исправленному» составу СГ), мас. % (\$)		34,08 для CO_2 (*) и 76,41 для CH_4 (*); 36,12 – CO_2 и 77,14 – CH_4	29,44 для CO_2 (*) и 82,32 для CH_4 (*); 29,87 – CO_2 и 82,43 – CH_4	0 (‡)	0 (‡)
Отношение H / C ($R_{H/C}$); для смеси на входе в ЭДП, мольные доли		1,0	0	–2,0	4,0 (и 0 для С)
Отношение H / C ($R_{H/C}$) _f в струе СГ на выходе из ЭДП, мольные доли		0,129 (1,035 (\$))	–0,276 (–0,061 (\$))	–2,0 (‡)	4,0 (‡)
Нормированная степень окисленности перед ЭДП $Ox D(n)_i$		0	0,0909	1,0 (‡)	–0,2
Нормированная степень окисленности после ЭДП $Ox D(n)_f$		–0,034 (–0,026 (\$))	0,337 (0,317 (\$))	1,0 (‡)	–0,2 (‡)
Массовая степень окисленности (по БФ) перед ЭДП $Ox D'_{i-m}$		0	0,154	0,364	0
Массовая степень окисленности СГ на выходе из ЭДП по экспериментальному составу СГ $Ox D'_{f-m-e}$		–0,020; –0,019 (\$)	0,178; 0,177 (\$)	0,364 (‡)	0 (‡)

Массовая степень окисленности СГ на выходе из ЭДП по ТД-расчету $Ox D'_{f-m-c}$		0 (при $T \geq 1500$ К)	0,154 (при $T \geq 1000$ К)	0,364 (±)	0 (±)
Значения числа Прандтля ($\dagger$) Pr (и Pr') для СГ в эксперименте (и с поправкой (§)) на выходе из ЭДП	при 3000 К	0,45, 0,25; 0,42, 0,27 (§*)	0,53, 0,28; 0,51, 0,28 (§*)	0,72 и 0,59	0,47 и 0,39
	при 4500 К	0,40, 0,40; 0,38, 0,46 (§*)	0,43, 0,48; 0,42 и 0,48 (§*)	0,69 и 0,84	0,43 и 1,11
Значения числа Pr (и Pr') по ТД-расчету по квазиравновесному составу для ($CO_2 + CH_4$)	при 3000 К	0,42 и 0,27	0,50 и 0,27	0,72 и 0,59	0,43 и 0,53
	при 4500 К	0,37 и 0,45	0,41 и 0,47	0,69 и 0,84	0,43 и 1,11
Элементный состав смеси в условной зоне №2 в ЭДП; ее усредненная молярная масса (г/моль)		$CH_{2,724} O_{0,638}$; (24,964)	$CH_{2,319} O_{0,840}$; (27,788)	CO_2 (44,01)	CH_4 (16,04)
$H / C (R_{H/C})$ в смеси в условной зоне №2 в ЭДП		2,086	1,479	-2,0	4,0
$H / C (R_{H/C})$ в смеси в условной зоне №2 в ЭДП (§)		1,035	-0,0607	-2,0 (±)	4,0 (±)
ANF_s смеси в условной зоне №2 в ЭДП (с допущением ТД-квазиравновесия для состава (с заданной БФ)), $Вт/(К \cdot м \cdot (Па \cdot c)^{1/2})$	при 1500 К	104,10	108,88	10,09	99,62
	при 3000 К	109,66	102,98	38,97	154,66
	при 4500 К	207,97	192,67	59,73	269,19
ANF_s по ТД-расчетным данным ($\ddagger$), $Вт/(К \cdot м \cdot (Па \cdot c)^{1/2})$	при 3000 К	98,63	75,68	38,97	154,66
	при 4500 К	178,35	145,52	59,73	269,19
Степень $Ox D'_{f-m-c}$ на выходе ЭДП по ТД-расчету (в равновесии) (§)		-0,019 (при $T \geq 2600$ К)	0,177 (при $T \geq 1000$ К)	0,364 (±)	0 (±)
Доля энтальпии (в Дж/Дж) на «химическую» конверсию смеси (по БФ) в СГ $\Delta H/H_0$ по ТД-расчету (по аналогии с ТД-расчетными результатами [10]) – по квазиравновесному составу для смесей ($CO_2 + CH_4$)	при 1500 К	0,67	0,58	0	0,53 (1) и 0,55 (2)(₹)
	при 3000 К	0,51	0,45	0,47	0,48 (1) и 0,55 (2)(₹)
	при 4500 К	0,66	0,66	0,67	0,75 (1) и 0,75 (2)(₹)
Приближенный энергокритерий для процесса нагрева газа (или смеси газов) K^*_{en} (₹₹)	при 3000 К	1,49	0,95	0,49	3,84
	при 4500 К	4,49	3,76	1,76	16,73

Удельные энергозатраты на «незамороженную» часть прироста энтальпии (т. е. на химические превращения в газах) ES_{ch} (в МДж/кг CH_4) в расчете на 1 кг конвертируемого внутри ЭДП метана (£)	при 1500 К	21,41 (16,52 – при степени $\alpha_{ig} = 1,0$)	20,94 ((17,26 – при степени $\alpha_{ig} = 1,0$))	–	–
	при 3000 К	29,70 (22,91 – при степени $\alpha_{ig} = 1,0$)	30,73 (25,33 – при степени $\alpha_{ig} = 1,0$)	–	–
	при 4500 К	89,69 (69,19 – при степени $\alpha_{ig} = 1,0$)	121,78 (100,38 – при степени $\alpha_{ig} = 1,0$)	–	–

$\dagger$ – при допущении полного сохранения входного газа (CO_2 или CH_4) в недиссоциированном виде после выхода из ЭДП; # – по частному объемных концентраций газов (H_2 и CO); $\dagger$ – число Pr для «замороженной» газовой смеси (СГ) и число Pr для равновесной (реактирующей) газовой смеси (СГ); * – расчет α_{ig} с использованием массовых концентраций CO_2 и CH_4 в СГ и во входной смеси перед ЭДП, причем, с учетом допущения равенства массового выхода синтез-газа из ЭДП массовому расходу входной смеси; $\ddagger$ – то же значение (1,0) для H_2O ; § – по «исправленному» составу СГ (с приведением этого состава к виду, при котором БФ выходного СГ идентична БФ исходной смеси газов на входе в ЭДП по фракциям углерода и водорода (в т. ч. при этом для режима с $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 1 : 1$ имеем $CH_2 O_{0,965}$ (масса формульной единицы (эквивалентной одному условному молю) – 29,466 г)), а для режима с $G_{CO_2} / G_{CH_4} = 2 : 1$ имеем БФ $CH_{1,333} O_{1,394}$ (масса формульной единицы – 35,657 г)); ** – «исправленный» экспериментальный состав СГ; (§*) – значения числа Прандтля Pr и Pr^* для «замороженной» и для равновесной (реактирующей) газовой смеси (СГ) по «исправленному» составу СГ; $\ddot{\cdot}$ – по ТД-расчету по квазиравновесному составу для CH_4 и для смесей ($CO_2 + CH_4$); ($\tilde{\cdot}$) – по равновесному (1) и по квазиравновесному (2) составам продуктов диссоциации CH_4 (т. е. в (2) – ТД-расчет без образования в системе конденсированных фаз); $\tilde{\cdot}$ – энергокритерий K^*_{en} определяется в первом приближении с использованием нормирования «реакционной составляющей» (не входящей в «замороженную» часть энтальпии (интеграла от температуры зависимости «замороженной» теплоемкости)) энтальпии системы (в ТД-приближении при квазиравновесии) на тепловой эффект возможной преобладающей реакции в данной системе $\Delta_r H^o_{298}$ (для случая смесей $CO_2 + CH_4$ – для реакции (1) по табл. 3 (см. ниже); для случая чистого CO_2 : для реакции диссоциации CO_2 до $(CO + 1/2 O_2)$ энтальпия $\Delta_r H^o_{298} \approx 283,0$ кДж/моль $\approx 6,43$ МДж/кг CO_2 и для реакции диссоциации CO_2 до $(CO + O(g))$ энтальпия $\Delta_r H^o_{298} \approx 532,16$ кДж/моль $\approx 12,09$ МДж/кг CO_2 ; для случая чистого CH_4 – для реакции диссоциации 3 в табл. 2 $\Delta_r H^o_{298} = 4,67$ МДж/кг CH_4); £ и ¤ – соответственно удельные «полные» энергозатраты ES на 1 кг конвертируемого CH_4 в ЭДП и аналогичные энергозатраты на «химизм» ES_{ch} (полуэмпирический параметр, он равен отношению доли, затраченной на совокупные химические превращения системы (по аналогии с [10]), в ТД-расчетном значении ($\sim$ квазиравновесном) разности полных энтальпий реакционной смеси при T_0 (≈ 300 К) и при характеристической температуре T_{max} ($\approx 3,0$ кК, 4,5 кК) к произведению степеней конверсии CH_4 в ЭДП α_{ig}^* (по «исправленному» составу СГ) на массовую долю CH_4 во входной смеси μ_{CH_4}).

Таблица 2 – Тепловой эффект (энтальпия) основных брутто-реакций, возможных в термической плазме в условиях ЭДП и плазмоструйных реакторов при разных вариантах взаимодействия топливных алкановых углеводородов (на примере CH_4) в химически реагирующих высокотемпературных смесях (по данным [23–28])

№	Газ для реакции с CH_4	Брутто-реакция и ее тепловой эффект при стандартных условиях $\Delta_r H^\circ_{298}$	Тип процесса
1	CO_2	$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2$, $\Delta_r H^\circ_{298} = 247,3$ кДж/моль = 15,41 МДж/(кг CH_4) = 4,118 МДж/(кг (эквимолярной смеси $CH_4 + CO_2$)); адиабатическая температура (*) $T_{ad} = 422$ К (295 К)	«Сухая» конверсия
2	H_2O	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$, $\Delta_r H^\circ_{298} = 206,1$ кДж/моль = 12,85 МДж/(кг CH_4)	Паровая конверсия
3	–	$CH_4 \rightarrow C(s) + 2H_2$, $\Delta_r H^\circ_{298} = 74,87$ кДж/моль = 4,67 МДж/(кг CH_4); (*) $T_{ad} = 291$ К (291 К)	Пиролиз
4	–	$CH_4 \rightarrow C(g) + 2H_2$, $\Delta_r H^\circ_{298} = 791,55$ кДж/моль = 49,34 МДж/(кг CH_4)	Пиролиз (II)
5	H_2	$CH_4 + H_2 \rightarrow C(s) + 3H_2$, $\Delta_r H^\circ_{298} = 74,87$ кДж/моль = 4,67 МДж/(кг CH_4)	Пиролиз в водороде
6	O_2	$CH_4 + 1/2O_2 \rightarrow CO + 2H_2$, $\Delta_r H^\circ_{298} = -35,6$ кДж/моль = -2,22 МДж/(кг CH_4); (*) $T_{ad} = 1038$ К (1027 К)	Частичное окисление (ЧО)
7	O_2	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(g)$, $\Delta_r H^\circ_{298} = -802,0$ кДж/моль = -49,99 МДж/(кг CH_4) [57]; (*) $T_{ad} = 3054$ К (3054 К)	Полное окисление
8	Смеси CO_2 и O_2	$CH_4 + aCO_2 + (0,5 - 0,5a)O_2 \rightarrow (1+a)CO + 2H_2$, ($0 < a < 1$), $\Delta_r H^\circ_{298} = (285 \cdot a - 41)$ кДж/моль = $(17,77 \cdot a - 2,56)$ [59]	Комбинация конверсии и ЧО

* – адиабатическая температура T_{ad} для термодинамически равновесной смеси (и для квазиравновесной смеси – в скобках), задаваемой уравнением заданной реакции (она при заданном составе смеси может определяться по закону сохранения энергии в изолированной системе [21]: $I_{np}(T_{ad}) = \sum_i (M_i \square_f H_i^0) + \sum_i (M_i \int_{T_0}^{T_{ad}} C_{pi}(T) dT)$, где $\square_f H_i^0$ – энтальпия образования i -го компонента в исходной реакционной смеси с учетом его мольной доли M_i ; $I_{np}(T_{ad})$ – сумма энтальпий образования продуктов реакции и энтальпий их нагрева от $T_0 = 298$ К до T_{ad} ; C_{pi} – удельная теплоемкость i -го компонента в исходной смеси.); для дополнительных реакций (возможных в смеси при $T > 1500$ К благодаря термодинамическому фактору (проявляющемуся в повышении константы равновесия реакции)) – обратная шифт-реакции (reverse water gas shift reaction) $H_2 + CO_2 \rightarrow CO + H_2O$ значение $\Delta_r H^\circ_{298} = 41,2$ кДж/моль = 0,936 МДж/кг CO_2 [29], а для реакции $CH_4 \rightarrow 0,5C_2H_2 + 1,5H_2$ (механизм Касселя [22]) значение $\Delta_r H^\circ_{298} = 188,23$ кДж/моль = 11,733 МДж/кг CH_4 (с использованием данных [23]). Стандартная энтальпия образования CO_2 и CH_4 $\Delta_r H^\circ_{298}$: -8,941 МДж/кг CO_2 и -4,667 МДж/кг CH_4 [23]

Таблица 3 – Сравнение обобщенных теплотехнических параметров, в т. ч. фактора AHF_s (при характеристических температурах (при $P = 0,1$ МПа)) для ряда типовых теплоносителей, используемых при APS

Элементарная формула теплоносителя, условия получения данных	T , К	$R_{H/C}$	Фактор AHF_s , Вт/(К·м·(Па·с) ^{1/2})	$\Delta H_{gT}/\Delta H_w$, Дж/Дж
I – Промышленная газовая смесь $Ar + H_2$ (75 + 25 об. %) для APS (MR, TD-E) (данные [30])	1500	–	12,42	1,73
	3000	–	31,09	5,04
	4500	–	71,36	13,10
II – Технический азот по ГОСТ 9293-74 (с содержанием N_2 99,6 об. %) (MR, TD – E)	1500	–	10,01	1,79
	3000	–	13,28	4,37
	4500	–	16,11	7,23
III – продукты сгорания смеси «воздух (96 об. %) + C_3H_8 (4 %))» ($\tilde{r}\tilde{r}$) для APS (MR, TD – E)	1500	–0,474	11,13	1,64
	3000	–0,474	30,254	5,41
	4500	–0,474	65,095	13,25
Обозначения: MR – модельный режим; TD-E – условия с термодинамическим равновесием; $\tilde{r}\tilde{r}$ – в установках плазменного напыления «Киев-7» (http://weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding/812-ustanovka-plazmennogo-napyleniya); значения $R_{H/C}$ соответствуют условиям без закалки газа; нормированная степень окисленности $OxD(n)_f$ для теплоносителя с составом по № III равна 1,0				

С учетом полученных расчетных данных по новым теплотехническим параметрам вышеуказанных ЭДП и их полуэмпирическим характеристикам нами проведена разработка аналогичной конструкции плазмотрона для работы в процессах с ПТА на разных плазмообразователях, в т. ч. с вводом алканов, и ориентированного на новые технологии напыления и сфероидизации [6; 13–14] – применительно к порошкам металлических и иных материалов (см. рис. 1).

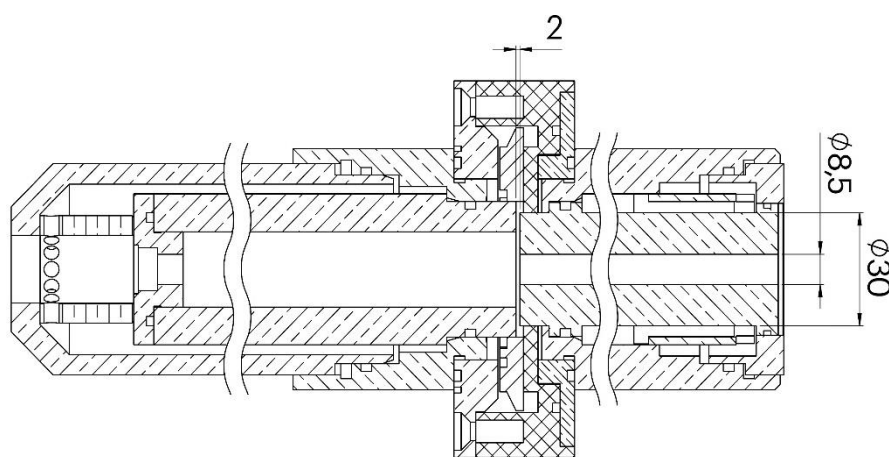


Рис. 1. Упрощенный вид ЭДП постоянного тока с мощностью до 60 кВт (в разрезе: катод – слева, анод – справа) для реакторов получения сфероидизированных/оплавленных порошков из металлов и сплавов (в т. ч. сплава ВЭС-типа)

Нами проведена также расчетная ТД-оценка условий получения ВЭС при плазменном нагреве в среде СГ, получаемого из CH_4 , применительно к получению порошка сплава $Fe-Ni-Co-Cu-Mo$ -типа (с энтропией смешения на уровне $\Delta S_{mix} \approx 1,6 R$) в условиях имитационной плазмохимической системы – $Fe-Ni-Co-Cu-Mo-C-O-H$. Формула модельной смеси (стехиометрические индексы в ней показывают число молей компонента на 1 кг всей реакционной смеси): $Fe_{1,478} Ni_{1,478} Co_{1,478} Cu_{1,478} Mo_{1,478} C_{13,142} O_{17,734} H_{65,866}$. Для данного состава пятикомпонентного сплава величина энтропии смешения составляет $\Delta S_{mix} \approx 1,609 R = 13,37$ Дж/(моль·К) (где R – универсальная газовая постоянная), что находится на уровне, превышающем $11,0 \div 12,0$ Дж/(моль·К), который считается достаточным для высоко вероятной реализации твердых растворов замещения с простой кристаллической решеткой (обычно, кубического типа), что типично именно для высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) со склонностью к повышенному уровню физико-механических свойств [31]. На рис. 2 как пример показан расчетный состав для системы, соответствующей сырьевой смеси в условном реакторе для плазменного получения порошка эквиатомного ВЭС-сплава (с использованием теплоносителя из CH_4) и с сырьем в виде смеси дешевых гидроксидов металлов. Расчеты показывают возможность получения из данного сырья при температуре $T \geq 1400$ К смеси полностью неокисленных фаз пяти металлов. Аналогичные результаты по полностью металлическим продуктам дают и расчеты ТД-равновесных составов для системы-имитатора смеси в режиме получения пятикомпонентного ВЭС-сплава в реакторе с теплоносителем – синтез-газом (с массовым входным соотношением $CO / H_2 = 8,4$), получаемым в ЭДП, работающем на воздушно-углеводородной смеси).

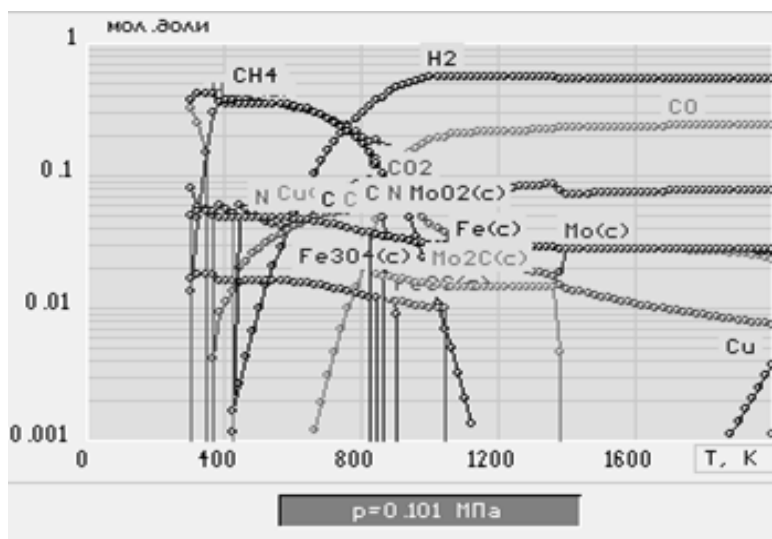


Рис. 2. Расчетный ТД-равновесный состав (при $T = 300\text{--}2000$ К) в молях для системы, соответствующей сырьевой смеси в условном реакторе для плазмотермического получения порошка пятикомпонентного эквиатомного ВЭС-сплава (с использованием восстановительного CH_4 -теплоносителя):
 $(Fe(OH)_3 - 106,87) + (Co(OH)_2 - 92,95) + (Cu(OH)_2 - 97,56) + (Ni(OH)_2 - 92,71) +$
 $+ (\text{оксид } MoO_3 - 143,96) + (CH_4 - 142,67)$ (в массовых долях на входе)

Выводы. 1. С использованием расчетной методологии нами проанализированы некоторые особенности разновидности дуговых плазмотронов для напыления покрытий и сфероидизации металлических и иных порошков, использующей химически реагирующие плазмообразующие газы, содержащие алканы (C_xH_y). Выбранная при этом группа специальных тепло-технических параметров, полезных для инженерной оценки режимов таких плазменно-топливных систем (в т. ч. потенциально применимых даже в технологиях получения порошков из высокоэнтропийных сплавов), позволяет на упрощенном уровне анализировать параметры высокоэнтальпийной среды в плазмотроне на смеси реагирующих газов с активным или пассивным (в т. ч. CO_2) окислителем.

2. Данные сделанного анализа показали возможность более интенсивной теплоотдачи к порошковым материалам в теплоносителях, получаемых в смесях с C_xH_y , у которых значения $АНF_s$ (и производных от него параметров) заметно выше (в $\sim 2,5$ – 3 раза (при $T = 3000$ K)), чем для азота или воздуха. По имеющимся данным, в условиях ряда ЭДП и, возможно, комбинированных аппаратов с плазмообразователями с метаном, вероятно, имеет место сильный вклад пиролизного механизма разложения молекул алкана, причем, как для систем на эндотермически реагирующих смесях ($CO_2 + CH_4$), так и для случая аппаратов на экзотермичных плазмообразующих смесях (алканы + O_2 /воздух).

Выполнение данного исследования частично было поддержано Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (РБ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Viswanathan, V. Role of thermal spray in combating climate change / V. Viswanathan, N. Katiyar, G. Goel, A. Matthews, S. Goel // Emergent Materials. – 2021. – Vol. 4. – P. 1515–1529.
2. Pershin, L. Plasma spraying of metal coatings using CO_2 -based gas mixtures / L. Pershin, L. Chen, J. Mostaghimi // Journal of Thermal Spray Technology. – 2008. – Vol. 17, no. 5–6. – P. 608–611.
3. Salimijazi, H. Plasma sprayed coating using mullite and mixed alumina/silica powders / H. Salimijazi, M. Hosseini, J. Mostaghimi, L. Pershin, T. W. Coyle, H. Samadi, A. Shafyei // Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21, no. 5. – P. 825–830.
4. Devoino, O. G. Investigation of upgraded technology for plasma spraying of bronze powder using the combined process with hydrocarbon additions / O. G. Devoino, A. V. Gorbunov, C. C. Wang, A. S. Volod'ko, A. N. Polyakov // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 103–112.
5. Fridlyand, M. G. Effect of reactive plasma-forming gases on plasma spray operating conditions: A technical note / M. G. Fridlyand // Journal of Thermal Spray Technology. – 1995. – Vol. 4, no. 2. – P. 137–142.
6. Pershin, L. Treatment of refractory powders by a novel, high enthalpy dc plasma / L. Pershin, A. Mitrasinovic, J. Mostaghimi // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – Vol. 46, no. 22: 224019.
7. Hacala, A. Innovative industrial plasma torch for converting biomass into high purity syngas / A. Hacala, U. Michon // Proceedings of 19th Int. Symposium on Plasma Chemistry, Bochum, Germany. – 2009. – P2.14.04. – 3 p.

8. Rutberg, P. G. AC plasma torch with a $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2/\text{CH}_4$ mix as the working gas for methane reforming / P. G. Rutberg, G. V. Nakonechny, A. V. Pavlov, S. D. Popov, E. O. Serba, A. V. Surov // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2015. – Vol. 48, no. 24: 245204.
9. Safa, S. Experimental and thermodynamic comparison between a novel CO_2/CH_4 and an oxygen submerged DC thermal plasma for treatment of sebacic acid in basic aqueous solution / S. Safa, A. Hekmat-Ardakan, G. Soucy // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2014. – Vol. 2, no. 4. – P. 2136–2147.
10. Essiptchouk, A. M. Hydrocarbon Reforming in CO_2 Thermal Plasma / *Proceedings of 8th International Conference on Plasma Assisted Technologies*. – 2013. Rio de Janeiro, Brazil. – P. 71.
11. Галиновский А. А., Горбунов А. В., Моссэ А. Л. Термоэлектrofизические параметры электродуговых плазматронов постоянного тока мощностью до 200 кВт для реакторов пиролиза и окислительного пиролиза углеводородов / *Препринт №3 ИТМО НАНБ, Мн, 2007*.
12. Samokhin, A. V. Tungsten carbide and vanadium carbide nanopowders synthesis in DC plasma reactor / A. Samokhin, N. Alekseev, S. Kornev, M. Sinaiskii, Y. Blagoveschenskiy, A. Kolesnikov // *Plasma Chemistry & Plasma Processing*. – 2013. – Vol. 33, no. 3. – P. 605–616.
13. Amarnath, P. Study on CO_2 based thermal plasma torch and its effective utilization for material processing in atmospheric pressure / P. Amarnath, N. Nandy, B. Indumathy, S. Yugeswaran // *Journal of CO_2 Utilization*. – 2022. – V. 66, no.1:102290.
14. Pashchenko, V. Research into the energy conversion processes in hybrid plasma devices for applying the coatings / V. Pashchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* – 2017. – № 2 (86). – P. 47–54.
15. Golozar, M. Pseudo-Capacitors: SPPS Deposition and Electrochemical Analysis of $\alpha\text{-MoO}_3$ and Mo_2N Coatings / M. Golozar, K. Chien, K. Lian, T. W. Coyle, T. W. // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – Vol. 22, no.5. – P. 710–722.
16. Zhou, Y. Conversion mechanism of thermal plasma-enhanced $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ reforming system to syngas under the non-catalytic conditions / Y. Zhou, R. Chu, L. Fan, J. Zhao, W. Li, X. Jiang, X. Meng, Y. Li, S. Yu, Y. Wan // *Science of the Total Environment*. – 2023. – Vol. 866: 161453.
17. El Khalloufi, M. Reduction of an ilmenite concentrate by using a novel CO_2/CH_4 thermal plasma torch / M. El Khalloufi, G. Soucy, J. Lapointe // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14, no. 5: 502.
18. El Khalloufi, M. Oxide Reduction Treatment with a Thermal Plasma Torch: A Case Study / M. El Khalloufi, G. Soucy // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14, no.5: 443.
19. Carpio, P. Numerical investigation of influence of precursors on transport properties of the jets used in solution precursor plasma spraying / P. Carpio, L. Pawłowski, B. Pateyron // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 371. – P. 131–113.
20. Tului, M. Some properties of atmospheric air and inert gas high-pressure plasma sprayed ZrB_2 coatings / M. Tului; F. Ruffini; F. Arezzo; S. Lasisz; Z. Znamirowski; L. Pawłowski // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – V. 151–152. – P. 483–489.
21. Gorokhovski, M. Plasma technologies for solid fuels: experiment and theory / M. Gorokhovski, E. I. Karpenko, F. C. Lockwood, V. E. Messerle, B. G. Trusov, A. B. Ustimenko // *Journal of the Energy Institute*. – 2005. – Vol. 78, no. 4. – P. 157–171.
22. Сурис, А. Л. Плазмохимические процессы и аппараты. / А. Л. Сурис. – М.: Химия, 1989. – 304 с.
23. NIST Chemistry WebBook. Webbook.nist.gov. – URL: [https:// webbook.nist.gov/chemistry/form-ser/](https://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser/).
24. Xu, J. Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics / J. Xu, G. F. Froment // *AIChE Journal*. – 1989. – Vol.35, no. 1. – P. 88–96.
25. Muhammed, N. S. Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: Recent advances towards sustainable energy / N. S. Muhammed, A. O. Gbadamosi, E. I. Epelle, A. A. Abdurashheed, B. Haq, S. Patil // *Journal of Energy Storage*. – 2023. – Vol. 73 (Part D): 109207.

26. Vita, A. Methanol synthesis from biogas: A thermodynamic analysis / A. Vita, C. Italiano, D. Previtali, C. Fabiano, A. Palella, F. Freni // *Renewable Energy*. – 2017. – Vol. 118. – P. 673–684.
27. Sengodan, S. Advances in reforming and partial oxidation of hydrocarbons for hydrogen production and fuel cell applications / S. Sengodan, R. Lan, J. Humphreys, D. Du, W. Xu, H. Wang, S. Tao // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. – Vol. 82. – P. 761–780.
28. Wei, Y. Hydrogen production at low temperature by dry reforming and oxidative dry reforming of methane on various Ni-based catalysts // PhD Thesis in chemical engineering. – Ecole Centrale de Lille, France. – 2017. – 198 p.
29. Guil-López, R. Methanol Synthesis from CO₂: A Review of the Latest Developments in Heterogeneous Catalysis / R. Guil-López, N. Mota, J. Llorente, E. Millán, B. Pawelec, J. L. G. Fierro, R. M. Navarro // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, no. 23: 3902.
30. Pawlowski, L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. – Hoboken, John Wiley & Sons Publ. – 2008. – 647 p.
31. Gelchinski, B. R. High-entropy alloys: properties and prospects of application as protective coatings / B. R. Gelchinski, I. A. Balyakin, A. A. Yuryev, A. A. Rempel // *Russian Chemical Reviews*. – 2022. – Vol. 91, no. 6: RCR5023.

Поступила 31.03.2025

УДК 621.9.04

Жигалов А. Н.¹, Горавский И. А.²

**УСТАНОВКА И ТЕХНОЛОГИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО
ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ КОНЦЕВОГО
ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ
СТАЛИ Р6М5**

- 1. Институт технологии металлов НАН Беларуси,
Могилев, Беларусь*
- 2. Барановичский государственный университет,
Барановичи, Беларусь*

Показано, что перспективным в научном и эффективным в прикладном плане является метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), позволяющий при сохранении исходной твердости обеспечивать повышение ударной вязкости сплавов и за счет этого повышать ресурс металлорежущего инструмента, работающего при прерывистых процессах резания. Приведены параметры разработанной установки и технологии АДУ концевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5.

Потребление фрезерного концевого инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 достигает 80 % от всего объема изготавливаемых концевых фрез. Недостатком такого инструмента из стали Р6М5 является низкая удар-