

УДК 621.793.71

**Ю.И. ЕВДОКИМЕНКО, В.М. КИСЕЛЬ, Г.А. ФРОЛОВ, С.В. БУЧАКОВ**

*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича  
Национальной Академии наук Украины*

## **ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДВУХКАСКАДНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДУШНО-ТОПЛИВНОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ**

*Приведено описание конструкции экспериментальной жидкотопливной воздухоохлаждаемой горелки для высокоскоростного воздушно-топливного напыления, реализующей концепцию расходного управления параметрами двухфазного потока. Горелка создана на базе промышленной горелки ГВО-2М и способна работать на керосине или уайт-спирите в качестве горючего при давлении в камере сгорания до 2,0 МПа. Приведены результаты расчета температуры и скорости частиц никеля (25 мкм) в выходном сечении горелки, свидетельствующие об увеличении в сравнении с базовой моделью температуры нагрева частиц на 600° без потери скорости. Показаны примеры микроструктур полученных покрытий.*

**Ключевые слова:** высокоскоростное воздушно-топливное напыление, сверхзвуковая жидкотопливная горелка, параметры горелки для высокоскоростного воздушно-топливного напыления, энергетические параметры частиц, газотермические покрытия.

### **Введение**

За тридцать лет своего развития высокоскоростное газопламенное напыление (ВГПН, англ. – High Velocity Flame Spraying, HVFS) в двух своих разновидностях, высокоскоростном кислородно-топливном и воздушно-топливном напылении (ВКТН и ВВТН, High Velocity Oxy/Air Fuel – HVOF и HVOF, соответственно), прочно утвердилось в качестве одного из основных методов газотермического напыления (ГТН), и в настоящее время широко применяется практически во всех отраслях промышленности для нанесения различных функциональных покрытий. Суть ВГПН заключается в нагреве и разгоне частиц напыляемого материала высокоскоростным высокотемпературным потоком продуктов сгорания углеводородного топлива, непрерывно сгорающего в кислороде или воздухе при давлении, обеспечивающим его сверхзвуковое истечение из горелки. ВГПН позволяет наносить покрытия практически из всех применяемых в ГТН материалов (за исключением наиболее тугоплавких соединений). При этом их качество соизмеримо с качеством лучших детонационных и плазменных покрытий или даже превосходит их – типичными являются пористость на уровне 1% и менее, адгезионная прочность 100 МПа и более, а также низкое содержание оксидов. По производительности – до 30 кг/ч наносимого порошка – метод уступает

только электродуговой металлизации. В то же время, по своим размерам и весу горелки для высокоскоростного газопламенного напыления мало отличаются от горелок для газопламенного напыления, что позволяет использовать их в качестве ручного инструмента. Основным недостатком ВГПН является большой удельный (на единицу массы покрытия) расход горючего и окислителя, определяющий относительно высокую стоимость процесса, что в наибольшей мере относится к ВКТН в силу относительно высокой стоимости кислорода. Поэтому одним из основных направлений совершенствования техники и технологии ВГПН является повышение их энергетической эффективности, под которой понимается часть тепла, выделяющегося при сгорании топлива, идущая на повышение энергетических параметров дисперсной фазы – ее энтальпии и кинетической энергии. Современное состояние ВКТН подробно изложено в работе [1], а ВВТН – в обзорах [2, 3].

### **Обоснование работы**

Работы в области техники и технологии высокоскоростного газопламенного напыления (ВГПН) в ИПМ НАН Украины проводятся с конца 80-х годов прошлого века, когда авторами была сформулирована концепция функционального разделения участков нагрева и ускорения частиц напыляемого материала в ВГПН-горелках, осуществляемого путем расходного управления параметрами двухфаз-

ного потока [4, 5]. Эта концепция получила теоретическое обоснование в работах [6, 7], на ее основе были созданы горелки «Град-К» (для ВКТН) и «Град-В» (для ВВТН), с использованием которых были получены покрытия из металлов, сплавов, интерметаллидов, керамик и металлокерамических композиций различного состава с качеством наивысшего в их классах уровня [8, 9], что практически подтвердило правильность теоретического положения о существенно более высокой энергетической эффективности горелок этой схемы по сравнению с традиционными.

Горелки «Град-К» и «Град-В» предназначены для работы на горючих газах — водороде, метане, пропан-бутане, применение которых накладывает на технологию ряд ограничений: стоимость водорода резко ограничивает ее экономическую эффективность, промышленное применение водорода и метана требует соответствующего лицензирования производства и существенных вложений в инфраструктуру их хранения и транспортировки, а применение пропан-бутана не позволяет поднять в камере сгорания (КС) давление более 0,7 МПа.

В настоящее время применение жидкого горючего (керосина) является основной тенденцией в развитии технологии ВКТН, т.к. наряду с повышением безопасности процесса оно позволяет поднять давление в КС горелок до уровня 1,0 МПа и выше, что рассматривается как основной способ улучшения качества покрытий за счет достигаемой при этом более высокой скорости частиц напыляемого материала при меньшей температуре их нагрева. Более того, для снижения температуры продуктов сгорания углеводородных топлив в кислороде в ВКТН-горелках применяется впрыск балластного газа (азота) или даже воды. Эта технология получила название «теплого ВКТН» (Warm HVOF) [1]. Таким образом, сложилась парадоксальная ситуация, когда в горелке производится сжигание горючего в кислороде (основным преимуществом чего по сравнению со сжиганием в воздухе является получение продуктов сгорания со значительно более высокой температурой — 3300 К и 2200 К, соответственно), после чего полученные продукты сгорания вводом азота доводятся до состава и состояния продуктов сгорания в воздухе, или, по крайней мере, в обогащенном кислородом воздухе. Учитывая соотношение стоимости сжатого воздуха со стоимостью кислорода и азота, экономическая целесообразность такого подхода представляется сомнительной.

Целью данной работы было создание жидко-топливной ВВТН-горелки с расходным

управлением параметрами двухфазного потока, способной в силу высокой тепловой эффективности своей схемы наносить покрытия с качеством, достигаемым технологией ВКТН, и, таким образом, сочетать ее преимущества с экономичностью ВВТН.

#### **Конструкция горелки ГВО-2РВ и ее технические параметры**

Разработка проводилась на основе схемы газодинамического тракта ВГПН-горелки, предложенной в патенте [10], и жидкотопливной ВВТН-горелки ГВО-2М промышленной установки для термообразивной очистки и ВВТН «Струмиль» [11], в которой воздухоохлаждаемый центральный пилон с трубкой подачи порошка и сопло были заменены каналом нагрева с двумя (передним и задним) узлами подвода. Модифицированная экспериментальная ВВТН-горелка получила обозначение ГВО-2РВ (расходное воздействие). Ее внешний вид и конструктивная схема приведены на рис. 1. Для обеспечения возможности измерения расхода воздуха, поступающего в камеру сгорания горелки, воздушная линия была разделена на две независимых — по одной воздух идет на горение, охлаждая жаровую трубу КС, по другой — подается для охлаждения обоих узлов подвода, канала нагрева и разгонного канала, после чего сбрасывается в атмосферу. Горючее через струйные форсунки подается в камеру смешения, из которой в виде горячей аэрозоли через завихритель поступает в КС.

Поджиг горючей смеси, так же, как и в горелке ГВО-2М, осуществляется съемным запальным устройством форкамерного типа (на схеме не показано), подсоединяемым через специальный клапан на ее корпусе (виден в верхней части рис. 1, а). Запальное устройство отсоединяется от горелки только в случае использования ее в качестве ручного инструмента.

Соотношение площадей отверстий в первом и втором узлах подвода, соединяющих передний и задний концы канала нагрева с полостью КС, определяет скорость течения потока в канале нагрева, и вместе с его длиной — время пребывания частиц напыляемого материала в высокотемпературном потоке, а, значит, степень их нагрева. На рис. 2 показаны рассчитанные по методике [6] графики распределений по длине газодинамического тракта горелки скоростей газовой ( $V_f$ ) и дисперсной ( $V_p$ ) фаз потока (рис. 2, а) и их температур ( $T_f$ ) и ( $T_p$ ), соответственно (рис. 2, б). Расчет произведен для давления в КС 1,0 МПа при коэффициенте соотношения компонентов  $\alpha = 1,2$ . Как видно из графиков, в канале нагрева (участок между

координатами  $X = 0$  и  $X = 140$  мм) параметры газового потока близки к параметрам в камере сгорания ( $V_f \approx 120$  м/с,  $T_f \approx 2000$  К), что создает наиболее благоприятные условия

для нагрева частиц дисперсной фазы. Именно на этом участке происходит их основной нагрев, тогда как их ускорение происходит за его пределами.

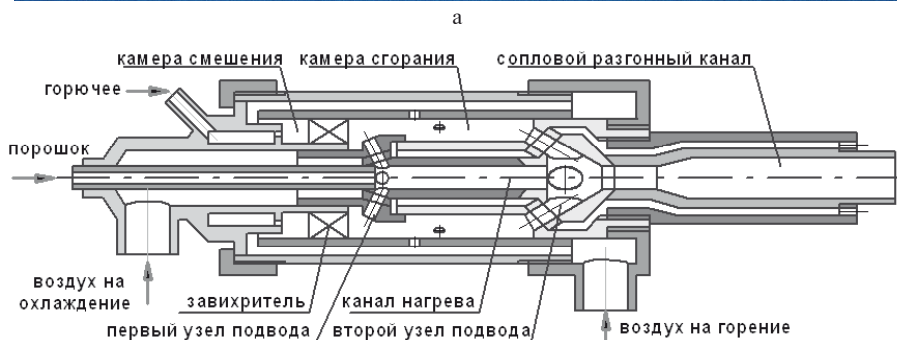


Рис. 1. Внешний вид (а) и конструктивная схем (б) жидкотопливной ВВТН-горелки с расходным управлением параметрами двухфазного потока ГВО-2РВ

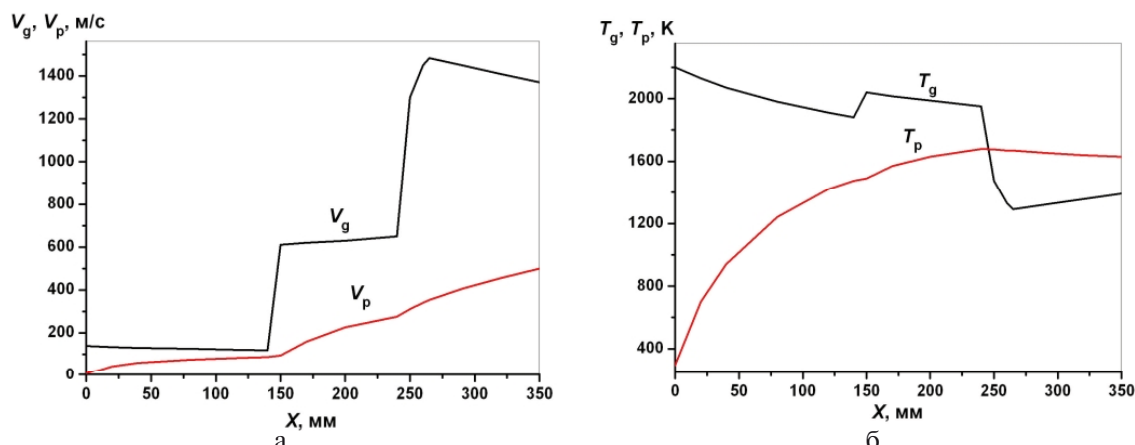


Рис. 2. Графики распределений по длине газодинамического тракта горелки параметров газовой и дисперсной фаз потока (частицы никеля, 25 мкм): а – скорости ( $V_f$  – газ,  $V_p$  – частицы); б – температуры ( $T_f$  – газ,  $T_p$  – частицы)

Таблица 1

Энергетические параметры частиц дисперсной фазы в выходном сечении горелки ГВО-2РВ при различных конфигурациях газодинамического тракта и промышленной горелки ГВО-2М

Тип газодинамического тракта	Длины участков тракта, мм			Параметры частиц порошка		
	канал нагрева	дозвуковой канал	сверхзвуковой канал	Температура $T_p$ , К	Скорость $V_p$ , м/с	Критерий энергетического состояния $K_e$
ГВО-2РВ № 1	135	10	175	1490	560	0,05
ГВО-2РВ № 2	135	160	25	1710	410	0,32
ГВО-2РВ № 3	135	95	90	1640	500	0,26
ГВО-2М	0	10	175	890	560	-1,1

Горелка оснащается сопловыми разгонными каналами трех конфигураций – сверхзвуковым, показанным на схеме (рис. 1, б), дозвуковым (цилиндрической формы) и комбинированным с приблизительно равными длинами до- и сверхзвуковых участков.

В таблице 1 показаны значения параметров частиц никеля размером 25 мкм в выходном сечении горелки при давлении в КС 1,0 МПа, рассчитанные для трех конфигураций газодинамического тракта горелки ГВО-2РВ и тракта базовой горелки ГВО-2М (критерий энергетического состояния  $K_e$  – разница полной удельной энтальпии частицы и ее удельной энтальпии при температуре плавления, отнесенная к удельной теплоте плавления). Как следует из сравнения параметров частиц на выходе каналов ГВО-2РВ № 1 и ГВО-2М введение в газодинамический тракт горелки канала нагрева позволяет повысить температуру нагрева частиц на 600° без ущерба для их разгона.

В табл. 2 приведена техническая характеристика горелки ГВО-2РВ.

Таблица 2  
Техническая характеристика горелки ГВО-2РВ

Горючее	Керосин, уайт-спирит
Тепловая мощность (макс.)	210 кВт
Давление в камере сгорания: в режиме ВВТН (макс.)	1,0 МПа
в режиме «теплого» ВВТН (макс.)	2,0 МПа
Расход горючего (макс.)	5 г/с
Диаметр критического сечения	10 мм
Диаметр выходного сечения	15 мм
Расход воздуха (макс.)	150 г/с
Температура потока	1100-2050 К
Скорость потока (макс.)	до 1600 м/с
Производительность (по порошку)	До 12 г/с
Масса	3,8 кг

#### Отработка режимов работы горелки ГВО-2РВ и технологических параметров

Отработка горелки ГВО-2РВ проводилась на универсальном термоструйном стенде УТС ИПМ НАНУ. Был отработан пусковой режим, который оказался близким к пусковому режиму базовой горелки – давление в КС 0,3 МПа,  $\alpha \approx 1$ .

В процессе отработки рабочих режимов было установлено, что горелка устойчиво работает при давлениях в КС выше 0,45 МПа. Ниже этого давления при установленном на ней сверхзвуковом разгонном канале истечение из него оказывается дозвуковым. Также установлено, что до давления в КС 0,8 МПа горелка может безопасно и устойчиво рабо-

тать в диапазоне значений коэффициента избытка окислителя  $\alpha \approx 0,90...2,5$ , при больших давлениях, с целью недопущения перегрева соплового блока, работа должна проводиться на обедненных воздушнотопливных смесях: до  $p_{КС} < 1,2$  МПа на режимах с  $\alpha > 1,2$ , а при  $p_{КС} > 1,2$  МПа на режимах с  $\alpha > 1,5$ . Во всех случаях при давлении в КС более 0,6 МПа длина сверхзвукового участка струи составляет более 210 мм (рис. 3, а).

Горелкой ГВО-2РВ были нанесены покрытия из порошков никеля, нихрома, самофлюсующихся никель-хромовых сплавов, квазикристаллического материала системы Al-Cu-Fe и металлокерамических композиций различных составов, которые были исследованы традиционными методами материаловедения. На рис. 3, б показано нанесение металл-керамического покрытия на базе ультравысокотемпературной керамики с двадцатью процентами (масс.) металлической связки.

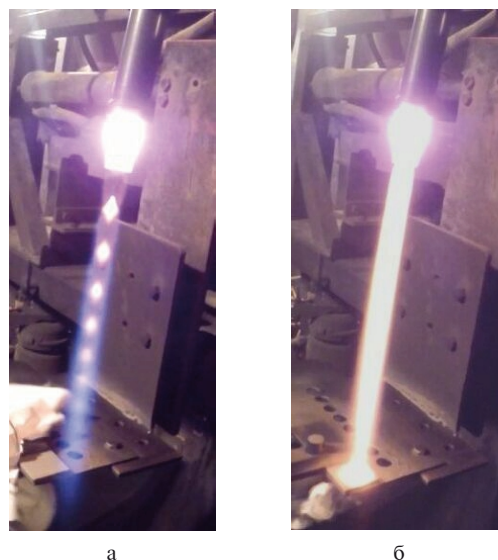
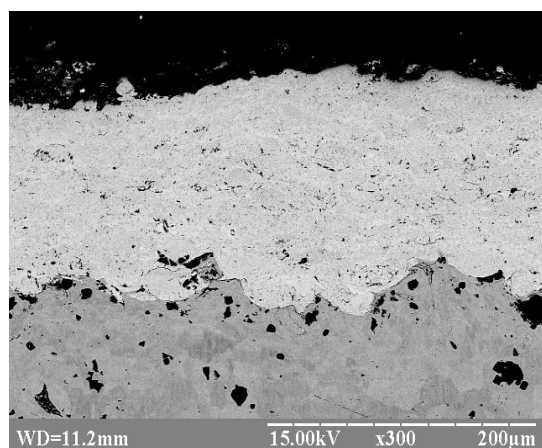


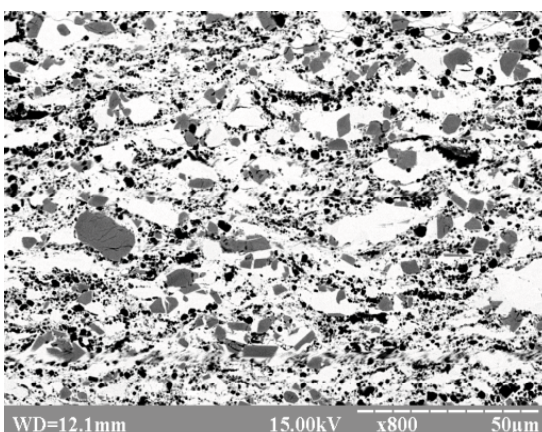
Рис. 3. Напыление металлокерамического покрытия:  
а – струя до подачи порошка;  
б – процесс напыление образца

Результаты исследований подтвердили высокое качество покрытий, не уступающее качеству лучших ВВТН-покрытий. При этом эксплуатационные затраты на нанесение покрытий методом ВВТН в 2,5 раза ниже. На рис. 4 показаны примеры микроструктур покрытий с пористостью не более 1,5%, полученных из порошков дисперсностью  $-63/+40$  мкм при давлении в КС горелки 1,0 МПа, коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 1,1$  и расходе порошка – 4,5 г/с. На рис. 4, а – покрытие из порошка ПР-НХ16СР3 самофлюсующегося сплава системы Ni-Cr-Si-B-C, на рис. 4, б – металлокерамиче-

ское покрытие из порошка НХТБ-40 состава ПР-НХ16СР3 – 40 % (масс.)  $TiB_2$ .



а



б

**Рис. 4.** Микроструктуры ВВТН-покрытий, нанесенных горелкой ГВО-2РВ:  
а – покрытие из порошка сплава ПР-НХ16СР3;  
б – покрытие из порошка НХТБ-40

### Литература

1. Fauchais P. L. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part [Текст] / P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein, M. I. Boulos. – Springer Science+Business Media New York. – 2014. – P. 1594.
2. Кисель В. М. Современное состояние и развитие технологии высокоскоростного воздушно-топливного напыления [Текст] / В. М. Кисель, Ю. И. Евдокименко // Вісник українського матеріалознавчого товариства. – Київ. – 2010, Вип. 3. – С. 65 – 79.
3. Барановский В. НВАФ-оборудование сверхзвукового газозвукового напыления [Текст] / В. Барановский // Термическое напыление: современное состояние. Материалы международного научно-практического семи-

нара 28–29 сент. 2010 г. – ФГАОУ ВПО УрФУ, Екатеринбург, 2010. – С. 73 – 97.

4. А. с. № 1610913 СССР. МПК5 С 23 С 4/00. Способ нанесения тугоплавких покрытий [Текст] / В. М. Кисель, А. В. Чоба, Г. Г. Карюк и др. – № 4465842/31–02; заявл. 26.07.88. ДСП. – с. 2.

5. А. с. № 1554986 СССР. МПК5 В 05 В 7/20. Сверхзвуковая горелка для газопламенного напыления покрытий [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель и др. – № 4310674/31–05; заявл. 28.09.1987; опубл. 07.04.1990. – Бюл. № 13.

6. Евдокименко Ю. И. Исследование газодинамических трактов генераторов двухфазных потоков с расходным управлением их параметрами [Текст] / Ю. И. Евдокименко Ю. И., В. М. Кисель, В. И. Тимошенко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2003. – Вип. 6 (41). С. 69 – 73.

7. Пат. 57147 Украина. МПК7 В 05 В 7/20. Спосіб газотермічного напылення порошковых матеріалів [Текст] / Ю. І. Євдокименко, В. М. Кисіль, В. Х. Кади́ров та інші; заявитель и патентообладатель Інститут проблем матеріалознавства НАН України. – № 2000127585; заявл.: 27.12.2000; опубл.: 16.06.2003. – Бюл. № 6. – 4 с.

8. Евдокименко Ю. И. Высокоскоростное газопламенное напыление двухкамерными горелочными устройствами [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, В. Х. Кадыров // Порошковая металлургия. – № 11/12. – 2003. С. 45 – 54.

9. Евдокименко Ю. И. Свойства покрытий из интерметаллидных соединений Ni-Al, нанесенных методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, С. В. Бучаков // Порошковая металлургия. – 2010. – №11/12. – С. 54 – 62.

10. Пат. 55558 Украина. МПК7 В 05 В 7/20. Пристрій для газотермічного напылення порошковых матеріалів [Текст] / Євдокименко Ю. І., Кисіль В. М., Кади́ров В. Х.; заявитель и патентообладатель Інститут проблем матеріалознавства НАН України. – № 2001031651; заявл.12.03.2001; опубл. 15.04.2003. – Бюл. № 4. – 6 с.: ил.

11. Евдокименко Ю.И. Термоструйная установка для термоабразивной очистки поверхностей и нанесения антикоррозийных покрытий [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель // Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования». – Иваново. – 2010. – С. 323 – 329.

Поступила в редакцию 15.06.2015

**Ю.І. Євдокименко, В.М. Кисіль, Г.О. Фролов, С.В. Бучаков. Пальниковий пристрій двокаскадної конфігурації для високошвидкісного повітряно-паливного напылення на рідкому паливі**

*Приведено опис конструкції експериментального рідкопаливного повітряно-охолоджуваного пальника для високошвидкісного повітряно-паливного напылення, який реалізує концепцію витратного керування параметрами двофазного потоку. Пальник створено на базі промислового пальника ГВО-2М, який працює на гасі або уайт-спіриті у якості пального при тиску в камері згоряння до 2,0 МПа. Приведено результати розрахунку температури та швидкості частинок нікелю (25 мкм) у вихідному перерізі пальника, які свідчать про зростання (в порівнянні з такими при використанні базового пальника) температури нагрівання частинок на 600° без втрати швидкості. Наведені зразки мікроструктур отриманих покриттів.*

**Ключові слова:** високошвидкісне повітряно-паливне напылення, надзвуковий рідкопаливний пальник, параметри ВППН-пальників, енергетичні параметри частинок, газотермічні покриття.

**Yu. Yevdokymenko, V. Kysil, G. Frolov., S. Buchakov. Two-stage configuration burner device for high velocity air liquid-fuel spraying**

*The description of the experimental air-cooled burner of two-stage configuration for High Velocity Air Liquid-Fuel Spraying, that realizes the concept of a gas feed control of a two-phase flow parameters has been given. The burner is designed on the basis of GVO-2M industrial torch and can operate on kerosene or white spirit as a fuel at a pressure in the combustion chamber up to 2.0 MPa. The results of temperature and velocity of the nickel (25 microns) particles in the outlet section of the burner calculation have been provided, that testifies an increase in particles heating temperature on 600 °C without losing speed, compared to the base model. The examples of the obtained coating microstructures have been shown.*

**Key words:** High Velocity Flame Spraying, Liquid fuel HVAF thermal spray torch, HVAF-torch parameters, In-Flight Particle Parameters, Thermal Spray Coatings.