



## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

**В. Н. КОРЖ**, д-р техн. наук, **Ю. С. ПОПИЛЬ**, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Обобщены особенности использования водородно-кислородного пламени, полученного в результате сжигания смеси, производимой электролизно-водными генераторами, при газопламенной обработке материалов. Показана возможность регулирования восстановительного потенциала пламени продуктов сгорания по отношению к железу и полной тепловой мощности за счет насыщения смеси углеводородными добавками.

*Ключевые слова:* газопламенное напыление покрытий, водородно-кислородная смесь, струя газа, ламинарное и турбулентное течение, ядро факела, зона догорания, геометрия пламени, распределение температуры, скорость струи

Несмотря на то, что электрические способы сварки плавлением и давлением преобладают в сварочном производстве, газовая сварка, пайка, газотермическая резка и газопламенное напыление покрытий используются также достаточно широко. В связи со все возрастающим дефицитом карбида кальция и углеводородных горючих газов-заменителей ацетилена, пропана, бутана, природного и других газов, возникает проблема поиска альтернативных горючих газов для газопламенной обработки материалов (ГПОМ).

Одним из газов-заменителей ацетилена является водород — экологически чистый и возобновляемый источник энергии. Однако его использование в качестве заменителя ацетилена не получило до настоящего времени широкого распространения в связи с ограниченными данными о технологических возможностях водородно-кислородного пламени (ВКП). Более низкие теплотворная способность и температура пламени водорода по сравнению с ацетилено-кислородным, а также его взрывоопасность и наличие эксплуатационных и транспортных расходов на содержание баллонного хозяйства сдерживали применение этого газа. Появление мобильных электролизно-водных генераторов (ЭВГ), позволяющих получать горючую смесь непосредственно на рабочем месте без расходов на содержание баллонного хозяйства и при существенном снижении транспортных расходов, инициировало проведение исследований возможности использования водорода при ГПОМ.

В настоящей работе обобщены результаты многолетнего труда коллектива сварочного факультета НТУУ «Киевский политехнический ин-

ститут» в области создания новых ресурсосберегающих технологий, в частности, создания и внедрения технологических процессов газопламенной сварки, резки, пайки, нанесения покрытий с заменой ацетилена водородно-кислородной смесью (ВКС), производимой ЭВГ.

Особенностью ВКС является то, что соотношение между объемом кислорода  $V_{O_2}$  и водорода  $V_{H_2}$  в смеси, полученной электролитическим разложением воды  $2H_2O = 2H_2 + O_2$ , постоянное и равно  $\beta = V_{O_2}/V_{H_2} = 0,5$ . При таком соотношении компонентов смеси пламя имеет окислительный потенциал. Для достижения нормального или науглероживающего характера горения пламени предложены устройства [1, 2] в которых происходит разделение ВКС, производимой ЭВГ, на два потока, один из которых остается чистым, а другой проходит через барботер с жидким углеводородным соединением (например, с бензином, спиртом и др.). Оба потока смеси подаются на ниппеля сварочной горелки, характер горения пламени регулируется изменением соотношения этих потоков с помощью соответствующих вентилях горелки.

Исследования состава продуктов горения ВКС проводили на экспериментальной установке Института газа НАН Украины путем отбора проб зондом Грея в ядре факела пламени, на границе ядра и за ядром с учетом фактической температуры газов. В зависимости от состава и расхода исходной горючей смеси возможен рост восстановительного потенциала продуктов горения по сравнению с расплавленным металлом за счет увеличения в них содержания водорода и оксида углерода [3].

Окислительная способность пламени, которая определяется по диаграммам равновесия водорода и оксида углерода с оксидами железа и железом, для нейтрального по отношению к расплавленному в сварочной ванне железу соответствует соотношениям в продуктах горения пламени по во-



дороду (43 об. %  $H_2$  и 57 об. %  $H_2O$ ) и углероду (83 об. %  $CO$  и 17 об. %  $CO_2$ ) [4].

В составе продуктов горения ВКС, производимой ЭВГ, с постоянным соотношением кислорода к водороду в смеси  $\beta = 0,5$ , суммарное содержание водорода  $H_2 + [H]$  в диссоциированных продуктах горения — менее 40 об. %, что подтверждает окислительный характер горения пламени. Добавление к указанным в ВКС паров углеводородных соединений (от общего объема смеси паров бензина около 4...5 %), этилового спирта (более 14...16 %) или ацетона (14...25 %) обеспечивает в диссоциированных продуктах горения суммарное содержание водорода  $H_2 + [H]$  в системе  $H_2 - 45...50$  об. %  $H_2O$  и оксида углерода в  $CO - 84...90$  об. %  $CO_2$ . При таком содержании водорода и оксида углерода в диссоциированных продуктах горения возможно восстановление оксида железа в сварочной ванне. При этом в диссоциированных продуктах горения производимой ЭВГ смеси, обогащенной парами углеводородных соединений, имеется свободный кислород, который появился в результате подсоса воздуха и термической диссоциации продуктов горения. Суммарное содержание свободного кислорода  $O_2 + [O]$  в диссоциированных продуктах горения нормального сварочного пламени ВКС с парами бензина составляет 7...12 об. %, с парами спирта — 12...16 об. %, с парами ацетона — 5...7 об. %. Наличие в продуктах горения свободного кислорода требует дополнительного легирования присадочной проволоки раскислителями.

С помощью добавления в ВКС паров углеводородных соединений при ее постоянном расходе можно регулировать тепловую мощность ВКП (при сжигании  $1\text{ м}^3$  она составляет 6,75 МДж). Добавление в ВКС 5,5 % паров бензина при сжигании того же объема горючей смеси увеличивает тепловую мощность до 17,15 МДж, что почти в 2,7 раза больше по сравнению с пламенем чистой ВКС. В случае добавления в ВКС 16 об. % паров этилового спирта при сжигании того же объема горючей смеси тепловая мощность составляет 14,7 МДж. Таким образом, путем добавления в ВКС паров углеводородных соединений можно регулировать характер горения пламени, а также повышать его тепловую мощность.

При газопламенной обработке металлов, как правило, используют факельный способ сжигания химически однородных газовых смесей благодаря специальным сварочным горелкам и резакам инжекторного и безынжекторного типов. Для факельного горения характерно наличие стационарного пламени более или менее правильной формы, которая зависит от типа горелки, степени смешения горючего с окислителем и характера течения струи.

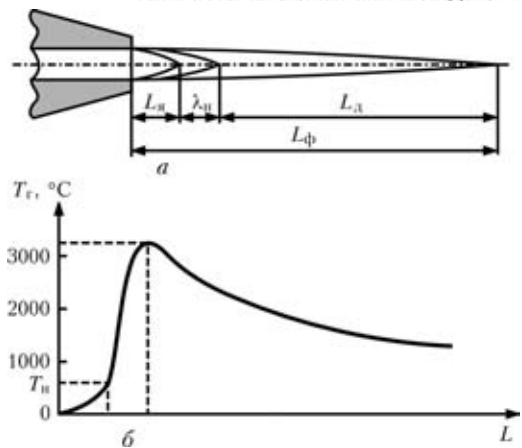


Рис. 1. Схема факела ацетилено-кислородного пламени (а) и распределение температуры по длине факела (б):  $L$  — расстояние по оси факела пламени; остальные обозначения см. в тексте

На рис. 1 приведена схема факела ацетилено-кислородного пламени газосварочной горелки. Область  $L_{я}$ , занимаемая начальной границей пламени, называется зоной воспламенения струи или ядром факела, область  $L_{д}$ , где завершается процесс горения, называется зоной догорания.

Из теории горения известно [5], что в случае ламинарного течения ядро факела очерчено резко и ширина нормального фронта пламени мала. Это область  $\lambda_n$ , расположенная между двумя поверхностями, где начинаются и заканчиваются химические реакции, происходящие в результате наличия кислорода в смеси, и имеет место повышение температуры от ее начального значения  $T_n$  до максимальной адиабатической температуры горения  $T_r$ . Так, при использовании водородно-кислородных смесей  $2H - O_2$  она равна 0,128 мм, метано-кислородных смесей  $CH_4 - 2O_2$  — 0,24 мм, ацетилено-воздушных  $C_2H_2 - \text{воздух}$  — 0,71 мм [6].

В сварочном производстве зону нормального распространения пламени  $\lambda_n$  называют средней зоной пламени. На ее конце температура продуктов горения достигает максимума, а затем начинает уменьшаться.

При турбулентном течении средняя зона пламени  $\lambda_n$  размыта, она отличается значительной толщиной, что усложняет расчет  $L_{я}$ , поскольку ее значения зависят от процесса распространения пламени от периферии к центру, т. е. от скорости распространения фронта турбулентного течения.

Длина зоны догорания  $L_{д}$ , расположенной между средней зоной и концом факела пламени (границей полного сгорания), в основном зависит от кинетических свойств горючей смеси.

Эффективность процесса сгорания в целом определяется общей длиной факела пламени

$$L_{ф} = L_{я} + \lambda_n + L_{д}. \quad (1)$$



В случае ламинарного характера течения  $\lambda_n \approx 0$

$$L_{\phi} = L_{я} + L_{д} \quad (2)$$

При ГПОМ рабочая зона определяется спецификой технологического процесса. При газовой сварке и пайке металлов рабочей зоной пламени является конец средней зоны пламени  $\lambda_n$ , температура горения пламени максимальная. При газокислородной резке рабочей зоной пламени является конец ядра факела пламени и зона догорания. Влияние распределения температуры в зоне догорания особенно ощутимо при резке металлов большой толщины.

При газопламенном напылении порошкового материала рабочей зоной в основном является зона догорания, в которой, как правило, происходит нагрев частиц до температуры их плавления или пластического состояния. При напылении проволоочного стержневого материала и гибкого шнура расплавление происходит в конце ядра факела пламени или в средней зоне пламени.

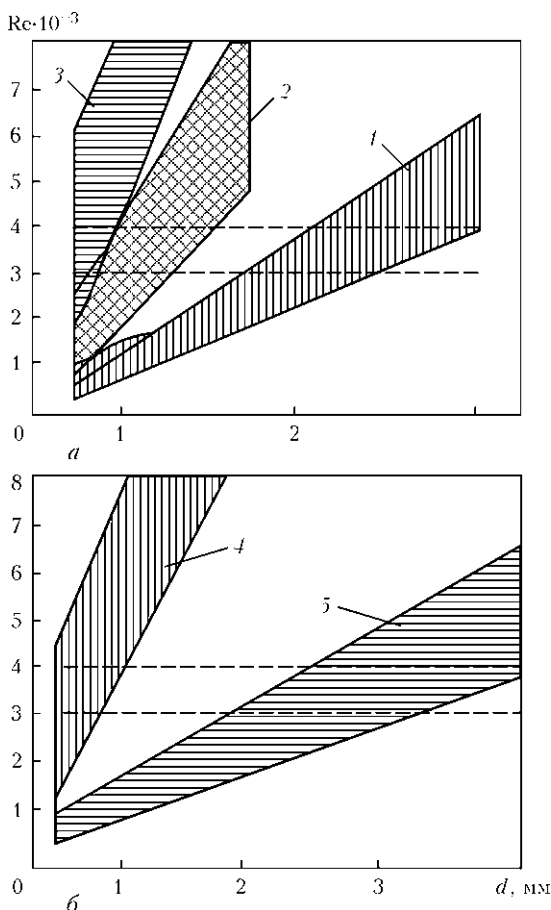


Рис. 2. Газодинамические характеристики струи газа, вытекающей из сопла стандартных наконечников горелок типа Г2-04 и Г-03, при стандартных условиях: а — водород (1), 30 %  $O_2$  + 70 %  $N_2$  (2) и кислород (3); б — водяной пар при давлении 0,1 МПа и температуре соответственно 107 (4) и 577 °С (5); штриховая — область перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения струи ВКС (или водяного пара); d — диаметр наконечника горелки

Для оценки возможности использования ВКП, полученного при сжигании ВКС, как источника нагрева для различных технологических процессов ГПОМ исследовали режим истечения струи газов из сопла горелки в ядре факела и продуктов горения в зоне догорания пламени, а также распределение температуры по длине факела пламени.

Для исследования режима течения струи газов из сопла горелки в зоне ядра пламени использовали набор сменных наконечников с диаметрами выходных отверстий сопел канала 0,6...3,5 мм стандартных сварочных горелок Г2-04 и Г3-03 (№ 0–7), а в зоне догорания пламени — стандартный набор наконечников горелки для газопламенного напыления «ЕВРО-ДЖЕТ XS-7» с диаметрами сопел 1,6...2,2 мм (№ 1–3). Эксперименты проводили с использованием ЭВГ А1803 с производительностью газовой смеси до 1,6 м<sup>3</sup>/ч.

Для струи ВКС (рис. 2, а) и струи продуктов горения (водяного пара) (рис. 2, б) при истечении из стандартных наконечников (№ 0–2) сварочных горелок, регламентирующих расход смеси до 0,6 м<sup>3</sup>/ч, характерно ламинарное течение в ядре факела пламени и непосредственно за ядром, а при использовании наконечников № 3, 4, регламентирующих расход смеси до 1,8 м<sup>3</sup>/ч, — слаботурбулентное. По мере удаления от ядра факела пламени температура потока газов уменьшается, коэффициент вязкости снижается, а газовая струя имеет турбулентное течение.

Ламинарный режим истечения продуктов горения струи ВКС в зоне ядра факела пламени сокращает ширину нормального фронта его течения, а следовательно, и площадь поверхности горения.

Достижение повышенной теплонапряженности пламени и концентрированного тепловыделения в рабочей зоне сварки подтверждают эффективность использования ВКП при сварке и пайке металлов по сравнению с другими газами-заменителями ацетилена [7] и при расчетах дает возможность использовать коэффициент замены ацетилена на водород равный 2 [8].

Температуру пламени в ядре и приядерной зоне определяли экспериментально-расчетным методом энтальпии газа, которая зависит от теплового потока, воспринимаемого зондовым датчиком при отборе газа через внутренний капилляр. Ее значения находят путем расчета по уравнению теплового баланса по методике, разработанной Институтом газа НАН Украины. Средняя расчетная температура в ядре факела и приядерной зоне при использовании чистого ВКП составляла около 3117 °С (3390 К), а при сжигании смеси ВКС + 5 об. % паров бензина — около 3108 °С (3381 К) с предельным отклонением от средней расчетной температуры от -5,4 до +6,5 %, при сжигании



смеси ВКС + 16 об. % паров спирта — 3088 °С (3360 К) (отклонение от -2,3 до +3,3 %).

Использование ВКП целесообразно при сварке стальных деталей толщиной до 3 мм. Сварку деталей толщиной до 2 мм выполняют с отбортовкой кромок без присадки или с присадкой без разделки кромок. Стальные детали толщиной 2...3 мм можно сваривать встык с присадкой. При сварке низкоуглеродистых низколегированных сталей рекомендуется использовать ВКП с добавками паров бензина (нормальное пламя). В качестве присадочного материала используют сварочные проволоки марок Св-08Г2С, Св-08ГС, Св-10ГС.

Газовая сварка с ВКП, полученным при сжигании смеси, производимой ЭВГ, успешно используется при сварке латуни толщиной до 4 мм. При этом применяется окислительное пламя — чистая ВКС без углеводородных добавок. Удельный расход горючей смеси составляет 250...300 дм<sup>3</sup>/(ч·мм). В качестве присадочной проволоки используют латунь марки ЛОК-59-1-0,3 или однотипную с основным металлом. Обязательно применение флюсов, в состав которых входит бура  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , борная кислота  $\text{H}_3\text{BO}_3$  или их смеси. Удобно также использовать жидкий флюс БМ-1.

Как показал опыт, при газопламенной пайке меди и медных сплавов возможно применение ВКП, например, при пайке медных трубопроводов рефрижераторных систем диаметром 25 мм с толщиной стенки 2 мм используют медно-цинковые припои с жидким флюсом БМ-1 или флюсы на основе прокаленной буры и борной кислоты.

Использование ВКП в качестве подогревающего пламени целесообразно также при резке стальных деталей толщиной до 40 мм. При этом рекомендуется ВКС, обогащенная парами бензина. Расход горючей смеси для подогревающего пламени при выполнении работ с использованием машинного резака типа РМ с удаленным инжекторным узлом в зависимости от толщины разрезаемого металла составляет от 1,1 до 1,8 м<sup>3</sup>/ч.

Качество покрытия при газопламенном напылении зависит от температуры и скорости напыляемых частиц материала, которые при напылении порошковых материалов в свою очередь зависят от распределения температуры и скорости струи продуктов горения в зоне догорания пламени.

Если режим течения продуктов горения изменяется от ламинарного к турбулентному, то образуются так называемые переходные потоки, в которых на разных участках факела объединяются ламинарная и турбулентная форма движения.

При относительно низкой скорости течения струи горючей смеси длина зоны догорания факела увеличивается пропорционально числу Рейнольдса (Re), что соответствует ламинарному характеру течения, которое сохраняется до  $\text{Re} \approx$

$\approx 3000...3500$ . При увеличении скорости течения струи горючей смеси при больших значениях Рейнольдса имеет место отклонение указанной зависимости от линейной. На вершине факела появляются пульсации, которые нарастают по мере увеличения скорости течения струи смеси и вызывают разрушение ламинарного фронта и турбулизацию факела. Дальнейшее повышение скорости течения струи горючей смеси приводит к уменьшению длины зоны догорания факела.

Эффективный нагрев частиц металла до температуры плавления при конвективном теплообмене между продуктами горения пламени и напыляемыми частицами возможен, если температура продуктов горения в факеле выше температуры плавления материала на 250...300 °С [9]. С учетом этого длина активного температурного интервала факела пламени для металлов, плавящихся при температуре 1250 °С (латуни, бронзы, порошков самофлюсующихся сплавов, экзотермически реагирующих порошков и композитов), будет определяться изотермой, соответствующей 1500 °С.

Исследования изменения температуры по длине факела пламени [10] показали, что длина его участков с температурой горения выше 1500 °С больше при турбулентном характере течения продуктов горения, а с температурой ниже 1500 °С она больше при ламинарном характере течения. При введении в ВКС паров углеводородных соединений наблюдается тенденция к увеличению длины активных зон пламени.

На распределение скорости газовой струи по длине факела пламени влияет режим ее течения. При турбулентном характере течения струи скорость на начальных участках, расположенных ближе к соплу, максимальная, при ламинарном характере ее уменьшение происходит более монотонно (рис. 3, а).

Добавление в ВКС 5,5 об. % паров бензина увеличивает скорость газовой струи по сравнению с чистой ВКС (рис. 3, б), а добавление 16 об. % паров спирта практически не влияет на скорость струи (рис. 3, в).

Результаты проведенных исследований использованы при разработке и внедрении технологических процессов газовой сварки медных выводных с обмоточными проводами катушек электромагнитов, стальных тонколистовых корпусных деталей, латунных трубопроводов холодильных установок, пайки капиллярных трубопроводов из нержавеющей стали, медных радиаторных труб, напылении осей валов электродрелей, восстановлении штампов и других процессах газотермической обработки материалов на предприятиях Киева и Москвы.

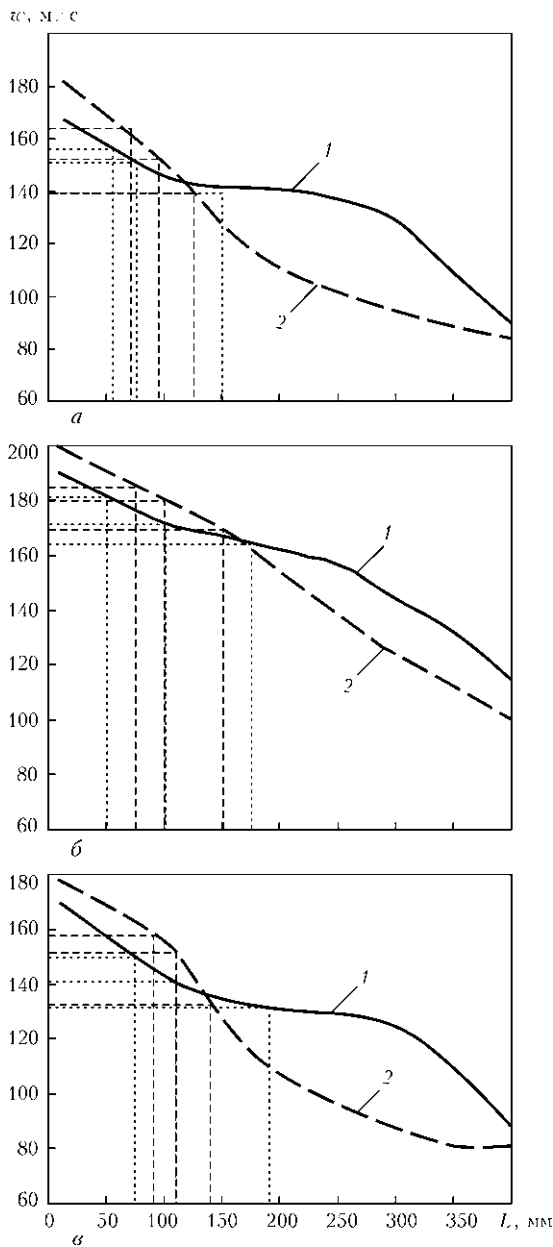


Рис. 3. Распределение скорости течения струи продуктов горения по длине факела пламени при ламинарном (1) и турбулентном (2) режиме: а — ВКС, производимая ЭВГ; б — ВКС + 5,5 об. % паров бензина; в — ВКС + 16 об. % паров спирта

### Выводы

1. Исследования показали, что режим течения струи продуктов горения ВКП при стабильном горении горючей смеси показали, что он имеет

ламинарный и турбулентный характер течения струи. Изменение характера течения продуктов горения влияет на геометрию пламени, распределение температуры и скорость газовой струи по длине факела пламени. При этом возможно управление окислительно-восстановительными процессами в сварочной ванне путем регулирования состава горючей газовой смеси насыщением парами жидких углеводородных соединений с помощью барботирования.

2. Теплонапряженность ВКП выше других используемых углеводородных горючих за счет ламинарного течения продуктов горения в зоне ядра и приядерной зоне, что позволяет сваривать стальные детали толщиной до 3 мм, при этом коэффициент замены ацетилен на водород равен 2. Тепловую мощность ВКП, полученного при сжигании смеси, производимой ЭВГ, можно увеличить в 2–3 раза путем насыщения смеси парами углеводородных соединений.

1. А. с. 967704 СССР, МКП<sup>3</sup> В 23 К 5/00. Устройство для газопламенной обработки металлов / В. Н. Корж, А. И. Стародумов, И. В. Матвеев и др. — Опувл. 23.10.82; Бюл. № 39.
2. А. с. 1164017 СССР, МКП<sup>3</sup> В 23 К 5/00. Устройство для газопламенной обработки материалов / В. Н. Корж, И. В. Матвеев, Ю. М. Тузенко и др. — Опувл. 30.06.85; Бюл. № 24.
3. Корж В. М., Попиль Ю. С. Керування параметрами процесу горіння воднево-кисневого полум'я при газополуменевій обробці матеріалів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2002. — № 4. — С. 59–64.
4. Шапков А. Н. Основы регулирования состава газосварочного пламени // Автоген. дело. — 1946. — № 7. — С. 1–3.
5. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во МГУ, 1957. — 442 с.
6. Крыжановский В. Н. Определение ширины нормального фронта пламени стехиометрических и бедных смесей с различным химическим составом // Промышл. теплотехника. — 1984. — № 3. — С. 39–45.
7. Корж В. Н., Тузенко Ю. М., Матвеев И. В. Сварка деталей из низкоуглеродистой стали водородно-кислородным пламенем // Автомат. сварка. — 1984. — № 1. — С. 70–71.
8. Корж В. Н. Расчет расхода водорода, применяемого взамен ацетилен, при газопламенной обработке металлов // Там же. — 1985. — № 10. — С. 76–77.
9. Применение газов-заменителей ацетилен при газопламенной обработке металлов / Под ред. И. А. Антонова. — М.: Машиностроение, 1964. — 150 с.
10. Корж В. Н., Попиль Ю. С. Влияние углеводородных добавок на структуру водородно-кислородного пламени и распределение температуры по длине факела // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 36–40.

Peculiarities of utilisation of hydrogen-oxygen flame in flame treatment of materials are generalised, the flame being formed by combustion of a mixture produced by electrolysis-water generators. The study shows that it is possible to regulate the reduction potential of the combustion product flame with respect to iron, and control the overall thermal power due to saturation of the mixture with hydrocarbon additions.

Поступила в редакцию 17.07.2008