

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

В. Д. ШЕЛЯГИН, А. В. БЕРНАЦКИЙ, В. Ю. ХАСКИН, И. В. ШУБА, А. В. СИОРА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью исследования физических особенностей и технологических возможностей непрерывного оптического разряда, был создан ряд лабораторных стендов и плазмотронов, на которых определялись диапазоны вариации энергетических, газодинамических, химических и конструктивных параметров, обеспечивающих стабильность процесса обработки. Было установлено, что при изменении мощности излучения CO_2 -лазера в диапазоне 1,5...6,0 кВт мощность непрерывного оптического разряда изменяется линейно, а мощность лазерного излучения, прошедшего сквозь разряд, может регулироваться от 8 до 40 % мощности излучения CO_2 -лазера. Показана возможность дополнительного энерговклада в непрерывный оптический разряд от источника постоянного тока, при этом мощность дополнительного вклада может превышать мощность лазерного излучения. Непрерывный оптический разряд, одновременно с прошедшим через него лазерным излучением, целесообразно использовать для получения новых материалов, наноструктурированных углеродных и алмазных пленок, сфероидизации тугоплавких материалов, модификации поверхностей, наплавки и других родственных технологий. Библиогр. 14, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: непрерывный оптический разряд, излучение CO_2 -лазера, наплавка, термообработка, эксперименты, режимы, металлография, структура, остаточные напряжения

В 1970 г. Ю. П. Райзером был впервые экспериментально получен и исследован непрерывный оптический разряд (НОР) в газе [1]. В первых экспериментах плазма оптического разряда свободно располагалась в середине неподвижного газового объема в области фокуса излучения CO_2 -лазера непрерывного действия. В 1978 г. впервые сообщается о создании плазмотрона [2], в котором стабилизация оптического разряда в сфокусированном лазерном излучении создается продольным в направлении излучения потоком газа. Возможность свободной передачи энергии лазерного излучения на значительные расстояния, концентрация ее в малых объемах оптическими средствами, высокие температура и степень ионизации в оптических разрядах открывают перспективы для многих практических применений. Однако до недавнего времени работы по данной проблеме были сконцентрированы на исследованиях собственно плазмы НОР в газах, и лишь отмечалась возможность использования лазерных плазмотронов в тепловых и плазмохимических процессах [3–5].

Перспективность применения НОР определялась его особенностями и уникальными характеристиками.

Во-первых, плазма НОР может быть получена в большинстве газовых смесей при атмосферном и более высоком давлении, а известные «чистые» технологии, основанные на применении плазмы высокой и сверхвысокой частоты (ВЧ, СВЧ) предпочтительно применяются при пониженных (ме-

нее 100 Торр) давлениях газовых смесей, т. е. в вакуумных камерах. Вместе с тем решение многих прикладных задач существенно упрощается или вообще становится возможным только при создании технологий плазмохимического синтеза и осаждения покрытий непосредственно в атмосферных условиях. Использование НОР плазмы, способной существовать при атмосферном давлении, в соединении с манипуляторами открывает возможность нанесения покрытий как локально, так и на изделия практически неограниченных размеров.

Во-вторых, высокое давление газов, т. е. значительная плотность активных молекул, в соединении с рекордной удельной плотностью лазерного энерговыделения в газе и высокой температурой плазмы (15...20 тыс. К) создают условия для высокоскоростного синтеза материалов.

В-третьих, для поддержания стабильной плазмы НОР не нужны какие-либо конструкционные элементы подвода энергии (электроды, волноводы, резонаторы и т. д.). Отсутствуют продукты эрозии, обычно загрязняющие нарастающую пленку в традиционных методах плазмохимического осаждения, что позволяет получать химически чистые материалы.

Широкое распространение в промышленности и в научно-исследовательских организациях лазерных установок мощностью до 2...10 кВт стимулировало проведение исследований и публикаций в этой области [6–14].

Целью данной работы является определение физических параметров НОР и технологических возможностей его применения, а также создание плазмотронов с направленными вниз на изделие струей плазмы и лазерным излучением. При конструировании во внимание принимались опубликованные данные и результаты собственных экспериментов.

В экспериментах на разных моделях плазмотронов определялись оптимальные условия возбуждения и устойчивого существования НОР при различных вариациях мощности лазерного излучения, вида газа и скорости потока, геометрических размеров разряда, места ввода в разряд порошковых и газовых прекурсоров и т. д.

Энергетические параметры разряда обеспечивал CO₂-лазер модели TRIAGON 12000 (фирма ROFIN-SINAR, Германия). Технологический стенд находился на расстоянии 7,5 м от выходного окна лазера. Лазерное излучение с помощью отражающих медных зеркал передавалось по воздуху в технологическую головку, где фокусировалось с помощью соляной KCl линзы с фокусным расстоянием $F = 330$ мм. Конусная часть головки заканчивалась патрубком длиной 27 мм с внутренним диаметром 12 мм. При проведении экспериментов фокальную плоскость линзы располагали на расстоянии 10 мм от края патрубка, с которым состыковывали различные конструкции плазмотронов, вводя патрубок в плазмотрон на глубину до 20 мм. Возбуждение НОР осуществлялось за счет кратковременного ввода в зону фокуса лазерного излучения алюминиевой пластины.

В таблице приведены результаты экспериментов по зажиганию НОР и определению условий его стабильного существования в струе технического аргона, при изменении уровней мощности лазерного излучения на фокусирующей линзе (P , кВт) и скорости газового протока в выходном патрубке диаметром 12 мм (Q , м/с). При мощности, превышающей 1,5 кВт, и скорости потока аргона более 1,0 м/с, НОР возбуждается и горит устойчиво. Для исследований

был выбран диапазон значений скоростей потока газа более пригодный для технологических работ (1...40 м/с).

Известно [10], что при дозвуковых скоростях протекания газа 0,1...6,0 м/с атмосферного давления и мощности излучения CO₂-лазера 1,2...6,0 кВт, НОР ведет себя как твердое тело и натекающий на него поток газа нагревается у периферии разряда и обтекает его. Высокотемпературное ядро НОР локализуется в области фокуса лазерного луча, поднимается по лучу на расстояние до 10 мм и вытягивается вдоль потока газа. Градиент температуры газового разряда уменьшается с ростом скорости потока газа. Наблюдается торможение потока на фронте НОР, там располагается зона повышенного давления и реализуется обтекание газом высокотемпературной области разряда [10].

На рис. 1, а, в показаны фотографии НОР при атмосферных условиях. Стационарное существование НОР предполагает равенство диссипированной в газе энергии CO₂-лазерного излучения и рассеяния ее за счет излучения тепловой радиации, теплопроводности и выноса тепла конвективным потоком газа. Зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения от температуры имеет максимум в районе 17...18 тыс. К при 1 атм. в воздухе, соответственно, пороговая мощность находится в диапазоне 1,8...2,0 кВт. В аргоне при 1 атм. пороговая мощность около 800 Вт, а возможная минимальная температура плазмы возле каустики 12700 К [10].

Минимальная пороговая мощность устойчивого горения НОР уменьшается в случае использования газа с низким потенциалом ионизации, плохой его теплопроводности и повышении давления. На рис. 2 [14] представлены экспериментально измеренные изотермы пространственного распределения температуры плазмы НОР в воздухе при атмосферном давлении, возбужденного CO₂-лазером мощностью 6 кВт [14]. Луч направлен горизонтально справа налево. Некоторая несимметрия изотерм может быть объяснена потоком воздуха, вызванного Архимедовой силой.

Значения параметров процесса, обеспечивающие устойчивое возбуждение и существование НОР

$P \backslash Q$	0,147	0,294	0,442	0,589	0,884	1,179	1,47	2,21	2,047	3,684	4,42
1,0	-		-	-		-	-	-	-	-	-
1,5	-		+ -	+ -	+	+	+	+	+	+	+
2,0	+			+ -	+	+	+	+	+	+	+
2,5				+ -	+	+	+	+	+	+	+
3,0				+ -	+	+	+	+	+	+	+
3,5				+ -	+	+	+	+	+	+	+
4,0				+ -	+	+	+	+	+	+	+
4,5				+ -	+	+	+	+	+	+	+
5,0				+ -	+	+	+	+	+	+	+
5,5				+ -	+	+	+	+	+	+	+
6,0				+ -	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. + — устойчивый НОР; - — неустойчивый.

Если лазерный луч мощностью 1,5..2,0 кВт и поток аргона со скоростью 0,59 м/с направить вертикально вниз, НОР принимает форму шара диаметром около 15 мм и поднимается примерно на 1 см обратно направлению распространения лазерного излучения; при скорости потока 1,0 м/с ядро НОР — яркий светящийся эллипс, размерами 7×17 мм, который опускается на 7..8 мм вниз, а при скорости 4,42 м/с НОР опускается на 15 мм и имеет вид яркого белого эллипса, центральная часть которого имеет размер 8×22 мм (рис. 1, *а*).

Помещение НОР внутрь плазматрона повышает его стабильность, которая зависит, при прочих равных условиях, от внутреннего диаметра канала плазматрона. В плазматроне внутренним диаметром 48 мм при мощности луча 2,0 кВт разряд стабилен при скоростях потока 0,14..3,0 м/с. В плазматроне с внутренним диаметром 22 мм и длиной 115 мм, при мощности лазерного излучения 2,0 кВт, разряд стабилен при скорости потока в диапазоне 0,1..10,0 м/с. При атмосферном давлении и скорости потока аргона в 1,0 м/с, верхний порог по мощности установить не удалось. В оптическом плазматроне температура центральной

части разряда на 1..3 тыс. К выше, чем температура НОР в неподвижном газе.

С целью расширения технологических возможностей НОР, при ограниченной мощности лазерного источника, были проведены эксперименты по повышению мощности НОР за счет пропуска тока через разряд без введения дополнительных электродов. В условиях данного эксперимента НОР не касается стенок плазматрона, а струя, сформированная разрядом плазмы, касается изделия. Диаметр плазмообразующего сопла был 3 мм, промежуток между соплом и изделием 8 мм. Положительный потенциал сварочного источника подключали к корпусу плазматрона, отрицательный к изделию. Ток дополнительного разряда 40 А, напряжение 31 В. В разряде выделилось порядка 1240 Вт. Ток протекает через холодный слой газа за счет большой подвижности электронов плазмы. При смене полярности ток не протекает. На рис. 1, *д* показан НОР, дополнительно подогреваемый постоянным током.

Интересные результаты получены при скрещивании НОР с потоком аргоновой плазмы, генерируемой дуговым плазматроном (рис. 1, *б*). В этом устройстве газообразные и порошковые прекурсо-



Рис. 1. Лабораторные стенды для изучения технологических возможностей НОР: *а* — НОР, горящий в струе аргона, в атмосфере; *б* — гибридное взаимодействие НОР и микроплазмы; *в* — плазматрон, действующий на основе НОР в среде азота; *г* — обработка тел вращения при помощи НОР; *д* — гибридный плазматрон с накачкой НОР дугой постоянного тока; *е* — наплавка при помощи НОР

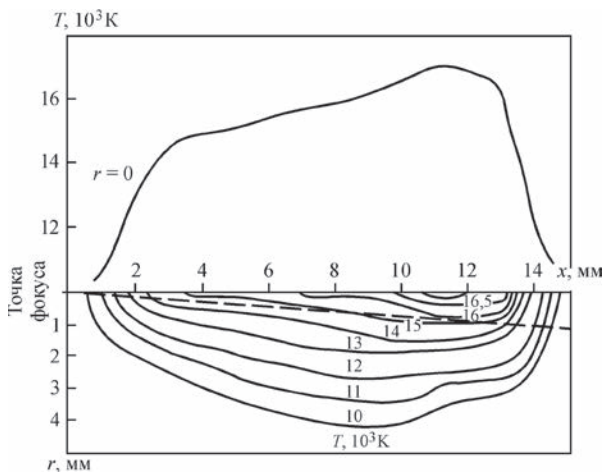


Рис. 2. Изотермы пространственного распределения температуры в НОР (внизу) и распределение температуры на оси луча (вверху)

ры могут подаваться как в область плазмы НОР, так и в плазму дугового плазматрона.

Важной задачей использования НОР является реализация лазерно-плазменной технологии газофазного синтеза алмазных пленок из многокомпонентных газовых смесей и осаждения этих пленок на поверхности деталей машин и механизмов, рабочие поверхности инструментов и пр. [9]. НОР генерирует плотную равновесную плазму с малым градиентом температуры в поперечном сечении ламинарного газового потока — это оптимальные условия для разложения активных компонентов газовых смесей и повышения скорости осаждения алмазных пленок. Большую роль в скорости осаждения пленки и ее качестве играет температура подложки. Стабилизация ее оптимальной температуры (около 800 К) осуществлялась различными конструктивными и энергетическими параметрами устройства: регулировкой положения кросовера в плазматроне; расстоянием плазма-подложка; конструкцией газовых и контактных охладителей; варьированием лазерной мощности и скорости газового потока. Доля лазерного излучения, дошедшая до подложки, может быть уменьшена за счет удлинения высокотемпературной составляющей НОР. Для этого нужно уменьшить диаметр канала плазматрона и увеличить скорость газового потока. Удлинение высокотемпературной струи в НОР увеличит рефракцию лазерного луча и плотность мощности на излучении снизится. Это позволит избежать перегрева центральной части осажденной пленки, если распределение мощности в пучке Гауссова. Качественные оценки синтезированных пленок и отдельных кристаллов, а также их спектры комбинационного рассеяния в данной работе не приводятся.

Уникальные свойства НОР предоставляют широкие технологические возможности в области сварки и родственных технологий. Для определения возможностей изменения размеров частиц по-

рошковых материалов (диспергирования порошков) под действием НОР был создан лабораторный стенд, в состав которого входили плазматрон модели МП-4 и его источник питания МПУ-4М, позволяющий работать на токах до 45 А при напряжении до 40 В. Согласно технологической схеме, приведенной в [12], плазматрон располагали так, чтобы струя микроплазмы проходила через НОР перпендикулярно оси лазерного излучения (рис. 1, б). Использовали порошки с грануляцией 40...60 мкм трех типов способности плавиться: тугоплавкий порошок $Al_2O_3+TiO_2$ (температура плавления около 2200 °С), самофлюсующиеся порошки системы Ni-Cr-B-Si ПГ-12Н-02 и ПГ-АН6 со средними показателями способности плавиться (температура плавления 1000...1200 °С), а также легкоплавкий порошок ПГ-19М-01 (температура плавления 885...1020 °С).

При проведении исследований изготавливали сплеты для определения степени влияния плазменного разряда на частицу порошка. Для этого на предметные пластинки осаждали порошок, пролетевшие через НОР, простреливаемый дуговой микроплазмой перпендикулярно оси лазерного излучения. Пластинки с напылением изучали с помощью оптического микроскопа МБС-9. В результате проведения исследований установлено, что тугоплавкие порошки плохо оплавляются НОР ввиду малого времени пребывания в разряде. Порошки с низкими показателями плавкости слишком хорошо поддаются воздействию НОР и склонны к полному испарению. Лучше всего себя показали самофлюсующиеся порошки на основе никеля со средними показателями плавкости (температура плавления 1000...1200 °С). Была установлена тенденция измельчения частиц порошков, транспортируемых через НОР струей микроплазмы. Приблизительно у 20...25 % от общего количества порошка размер частиц уменьшался до 30 мкм.

Следующим шагом в исследовании возможностей НОР в области сфероидизации, измельчения и рафинирования порошков, было изготовление лазерного плазматрона, действующего на основе НОР (рис. 1, в). Исследования технологических возможностей лазерного плазматрона с диаметром сопла 3 мм показали, что наилучшие условия его работы создаются при использовании мощности излучения CO_2 -лазера 2,0...3,0 кВт и расходе плазмообразующего газа (аргона) 5...10 л/мин. В оптическую плазму вкладывалось порядка 1,5...2,5 кВт, а 20 % лазерной мощности проходило сквозь НОР. Длина оптического разряда находилась в пределах 15...20 мм, т. е. по 7...10 мм вверх и вниз относительно фокуса. Длина плазменной струи, выходящей из лазерного плазматрона, составляла 5...10 мм в зависимости от скорости потока газа.

Для проведения экспериментов по наплавке стальных образцов лазерным излучением с од-

новременным воздействием НОР был создан лабораторный стенд на базе трехкоординатного манипулятора (рис. 1, е). На нем были наплавлены образцы порошками системы Ni-Cr-B-Si сплавов ПГ-12Н-02 (*HRC* 40...45) и ПГ-АН6 (*HRC* 60...65) [13] лазерным и гибридным лазер-НОР способами. При этом во всех случаях мощность лазерного излучения составляла $P = 0,7...0,8$ кВт, мощность НОР — $P_{НОР} = 2,0...2,2$ кВт, скорость наплавки 40 м/ч, ширина наплавляемого валика 4 мм. Полученные образцы были шлифованы для дальнейших металлографических и радиографических исследований.

В результате гибридной лазер-НОР наплавки были получены бездефектные слои с мелкодисперсной литой структурой, состоящей из аустенитной матрицы и δ -феррита, который выделился вдоль границ кристаллитов и ячеек (рис. 3, а). Количество δ -феррита составляло 15...25 % (измерения проводили на приборе «Ferritgehalt-messer 1.053»). Распределение микротвердости измерялось в направлении от поверхности наплавленного слоя в сторону основного металла (нагрузка 100 г, шаг 100 мкм). Эти измерения показали для лазер-НОР наплавки большую равномерность распределения микротвердости, чем для лазерной (рис. 3, б). Размер переходной зоны составлял порядка 10 мкм (рис. 3, в), а глубина ЗТВ — до 0,2 мм (рис. 3, з).

Модификация термического цикла при гибридной лазер-НОР наплавке способствует устранению такого характерного дефекта наплавленных слоев, как микротрещины, а также получению слоев с достаточно высокой твердостью. При этом сравнительно небольшие

размеры ЗТВ (200...300 мкм) и переходной зоны (10...15 мкм) свидетельствуют об удачном вложении энергии.

Анализ результатов наплавки слоев из сплавов ПГ-12Н-02 и ПГ-АН6 системы Ni-Cr-B-Si на сталь типа Ст3пс, выполненных лазерным и лазер-НОР способами, позволил установить, что показатель трещинообразования снизился с 40...60 до 20...30 %, соответственно. Напряжения I рода, измеренные в наплавленных слоях рентгенофазовым способом с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-2, также уменьшились. Для сплавов ПГ-12Н-02 и ПГ-АН6, наплавленных лазерным способом, они составляли -200 и -510 МПа, соответственно, в то время, как в слоях, наплавленных гибридным способом, они составили +120 и -310 МПа, соответственно. Смена знака с «-» на «+» свидетельствует об изменении сжимающих напряжений на растягивающие.

Исследования термической обработки образцов из штамповой стали 20Х13 проводили с минимальным оплавлением поверхности (на глубину 0,1...0,3 мм) при помощи излучения CO₂-лазера. При этом лазерную закалку выполняли на режиме: $P_{лаз} = 1,5$ и 3,0 кВт; $v = 60$ м/ч; $d_{пл} = 4...5$ мм; $Q_{Аг} = 25...30$ л/мин., а также гибридную лазер-НОР закалку на режиме: $P_{лаз} = 1,5$ кВт; $d_{пл} = 4...5$ мм; $P_{пл} = 1,5$ кВт; $d_{пл} = 8$ мм; $v = 60$ м/ч; $Q_{Аг} = 25...30$ л/мин. Из полученных закаленных дорожек вырезали темплеты размером 10×10×5 мм, по которым измеряли внутренние напряжения I рода в этих дорожках методом рентгенофазового анализа. Измерения показали, что напряженное состояние слоев, упрочненных лазерным способом, составляет порядка 470 МПа. Примене-

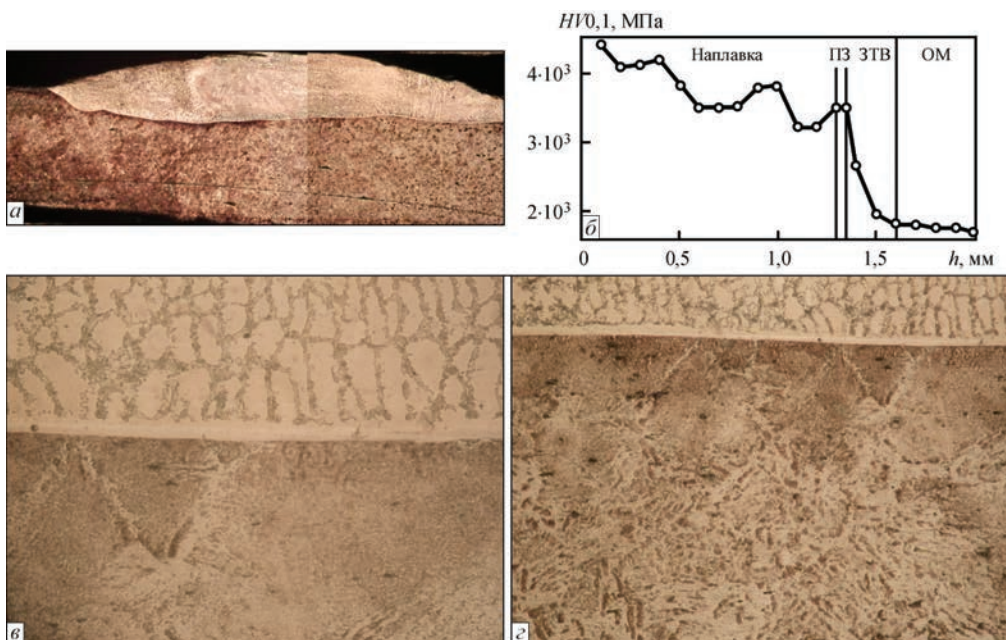


Рис. 3. Общий вид наплавленного валика (а, ×25) с распределением микротвердости HV0,1 по глубине h наплавленного слоя (б), переходная зона (в, ×400) и ЗТВ в основном металле (з, ×200)

ние лазер–НОР упрочнения позволяет уменьшить этот показатель до приблизительно 260 МПа.

Авторы полагают, что дополнительные преимущества использования НОР при синтезе поликристаллических алмазных пленок могут быть получены при изменении формы распределения интенсивности лазерного излучения с Гауссовой на прямоугольную.

Выводы

1. Исследования особенностей существования НОР показали, что в диапазоне мощностей прошедшего через фокусирующую линзу излучения CO₂-лазера 1,5...6 кВт мощность НОР изменяется линейно, а составляющая лазерного излучения, прошедшая сквозь НОР, может составлять 10...30 % в зависимости от конструкции плазматрона и значений параметров технологических режимов. Это позволяет использовать НОР одновременно с прошедшим через него лазерным излучением в области технологий обработки поверхности.

2. Установлена возможность введения дополнительной электрической мощности в НОР.

3. Для проведения процессов наплавки и термической обработки поверхностей целесообразно совмещать НОР с действием расфокусированного (до диаметра 2...4 мм) лазерного излучения. Наилучшие результаты получены при мощности НОР 1,5...2,5 кВт и мощности лазерного излучения, дошедшего до подложки 0,7...1,5 кВт.

4. Влияние НОР на результаты лазерной наплавки и термической обработки поверхностей заключается в снижении остаточных внутренних напряжений на 40...60 % за счет модификации термического цикла.

Список литературы

1. Генералов Н. А., Зимаков В. П., Козлов Г. И. и др. (1971) Экспериментальное исследование непрерывно горящего оптического разряда. *ЖЭТФ*, 61, 1, 1434–1446.
2. Козлов Г. И. (1978) Лазерный плазматрон с протоком газа. *Письма в ЖЭТФ*, 4, 10, 586–589.
3. Райзер Ю. П. (1980) Оптические разряды. *УФН*, 132, 3, 549–581.
4. Зимаков В. П., Кузнецов В. А., Кедров А. Ю. и др. (2009) Газовый лазер для эффективного поддержания плазмы непрерывного оптического разряда в научных и технологических применениях. *Квантовая электроника*, 39, 9, 797–801.
5. Большаков А. П., Конов В. И., Востриков В. Г. и др. (2008) Исследование плазмы оптического разряда в многокомпонентных смесях молекулярных газов. *Там же*, 38, 2, 165–168.
6. Зимаков В. П., Кузнецов В. А., Кедров А. Ю. и др. (2009) Рефракция лазерного излучения в плазме непрерывного оптического разряда в потоке газа при атмосферном давлении. *Оптика атмосферы и океана*, 22, 11, 1023–1028.
7. Franzen D. L. (1973) Continuous laser-sustained plasmas. *J. of Appl. Phys.*, 44, 4, 1727–1732.
8. Козлов Г. И., Кузнецов В. А., Масыков В. А. (1979) Непрерывный оптический разряд в молекулярных газах. *ЖТФ*, 49, 11, 2304–2310.

9. Большаков А. П. (2007) *Синтез поликристаллических алмазных пленок с помощью лазерного плазматрона*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.21. Москва, РГБ.
10. Райзер Ю. П. (1996) Непрерывный оптический разряд — поддержание и генерация плотной низкотемпературной плазмы лазерным излучением. *Соровский образовательный журнал*, 3, 87–94.
11. Колумбаев Э. Б., Лелевкин В. М. (2002) Численный анализ характеристик непрерывного оптического разряда в воздухе. *Вестник КРСУ*, 2, 2, 76–83.
12. Шелягин В. Д., Кривцун И. В., Борисов Ю. С. и др. (2005) Лазерно-дуговые и лазерно-плазменные технологии сварки и нанесения покрытий. *Автоматическая сварка*, 8, 49–54.
13. Борисов Ю. С., Хаскин В. Ю., Войнарович С. Г. и др. (2012) Комбинированная лазерно-микроплазменная наплавка порошками сплавов системы Ni–Cr–B–Si. *Там же*, 11(715), 18–24.
14. (1992). *Физическая энциклопедия*. Москва, Большая Российская энциклопедия.

References

1. Generalov N.A., Zimakov V.P., Kozlov G.I. et al. (1971) Experimental investigation of continuously burning optical discharge. *ZhETF*, 61(1), 1434-1446 [in Russian].
2. Kozlov G.I. (1978) Laser plasmatron with gas flow. *Pisma v ZhETF*, 4(10), 586-589 [in Russian].
3. Raizer, Yu.P. (1980) Optical discharges. *Sov. Phys. Usp.*, 23, 789-806.
4. Zimakov V.P., Kuznetsov V.A., Kedrov A.Yu. et al. (2009) Gas laser for efficient sustaining a continuous optical discharge plasma in scientific and technological applications. *Quantum Electronics*, 39(9), 797-801 [in Russian].
5. Bolshakov A.P., Konov V.I., Vostrikov V.G. et al. (2008) Study of the optical-discharge plasma in multicomponent mixtures of molecular gases. *Ibid.*, 38(2), 165–168 [in Russian].
6. Zimakov V.P., Kuznetsov V.A., Kedrov A.Yu. et al. (2009) Laser beam refraction in a continuous optical discharge plasma in a gas flow under atmospheric pressure. *Optika Atmosfery i Okeana*, 22(11), 1023-1028 [in Russian].
7. Franzen D.L. (1973) Continuous laser-sustained plasmas. *J. Appl. Phys.*, 44, 4, 1727-1732.
8. Kozlov G.I., Kuznetsov V.A., Masyukov V.A. (1979) Continuous optical discharge in molecular gases. *ZhTF*, 49(11), 2304-2310 [in Russian].
9. Bolshakov A.P. (2007) *Synthesis of polycrystalline diamond films using laser plasmatron*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Phys.-Mat. Sci. Moscow, RGB [in Russian].
10. Raizer Yu.P. (1996) Continuous optical discharge – maintenance and generation of dense low-temperature plasma by laser radiation. *Sorovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 3, 87-94 [in Russian].
11. Kolumbaev E.B., Lelevkin V.M. (2002) Numerical analysis of characteristics of optical discharge in air. *Vestnik KRSU*, 2(2), 76-83 [in Russian].
12. Shelyagin V.D., Krivtsov I.V., Borisov Yu.S. et al. (2005) Laser-arc and laser-plasma technologies of welding and coating technologies. *The Paton Welding J.*, 8, 44-49.
13. Borisov Yu.S., Khaskin V.Yu., Vojnarovich S.G. et al. (2012) Combined laser-microplasma cladding with powders of Ni-Cr-B-Si system alloys. *Ibid.*, 11, 16-22.
14. (1992) *Physical encyclopedia*. Moscow, Great Russian Encyclopedia [in Russian].

В. Д. Шелягин, А. В. Бернацкий, В. Ю. Хаскин,
И. В. Шуба, О. В. Сиора

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ
І ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ
НЕПЕРЕРВНОГО ОПТИЧНОГО РОЗРЯДУ

З метою дослідження фізичних особливостей і технологічних можливостей неперервного оптичного розряду, був створений ряд лабораторних стендів і плазмотронів, на яких визначалися діапазони варіації енергетичних, газодинамічних, хімічних і конструктивних параметрів, що забезпечують стабільність процесу обробки. Було встановлено, що при зміні потужності випромінювання CO₂-лазера в діапазоні 1,5...6,0 кВт, потужність неперервного оптичного розряду змінюється лінійно, а потужність лазерного випромінювання, що пройшло крізь розряд, може регулюватися від 8 до 40 % потужності випромінювання CO₂-лазера. Показана можливість додаткового енерговкладу в неперервний оптичний розряд від джерела постійного струму, при цьому потужність додаткового вкладу може перевищувати потужність лазерного випромінювання. Неперервний оптичний розряд, одночасно з лазерним випромінюванням, що проходить через нього, доцільно використовувати для отримання нових матеріалів, наноструктурованих вуглецевих і алмазних плівок, сфероїдизації тугоплавких матеріалів, модифікації поверхонь, наплавлення та інших споріднених технологій. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: неперервний оптичний розряд, випромінювання CO₂-лазера, наплавлення, термообробка, експерименти, режими, металографія, структура, залишкові напруження

V.D. Shelyagin, A.V. Bernatskii, V.Yu. Khaskin,
I.V. Shuba, A.V. Siora

E.O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

INVESTIGATION OF PHYSICAL FEATURES
AND TECHNOLOGICAL CAPABILITIES
OF CONTINUOUS OPTICAL DISCHARGE

In order to study physical features and technological capabilities of continuous optical discharge, a number of laboratory stands and plasmotrons were developed, which were used to determine the ranges of variation of energy, gas-dynamic, chemical and design parameters, providing stability of processing operations. It was found that at the change of power of CO₂-laser radiation in the range of 1.5 – 6.0 kW, power of continuous optical discharge changes linearly, while power of laser radiation, passing through the discharge, can be regulated to be from 8 to 40% of CO₂-laser radiation power. Shown is the possibility of additional energy input into continuous optical discharge from direct current source. Here, power of additional input can exceed that of laser radiation. It is rational to apply continuous optical discharge, together with laser radiation which passed through it, to produce new materials, nanostructured carbide and diamond films, spheroidizing of refractory materials, surface modification, surfacing and other related technologies. 14 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

Keywords: continuous optical discharge, CO₂-laser radiation, surfacing, heat treatment, experiments, modes, metallography, structure, residual stresses

Поступила в редакцію 16.05.2017

Товариство зварників України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

**Науково-практична конференція
«СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА»**

*Присвячується 25-річчю Товариства зварників України
та 175-річчю М.М. Бенардоса —
винахідника дугового зварювання*

22-23 листопада 2017 р.

м. Київ, Міжнародний виставковий центр

- ◆ розвиток прогресивних зварювальних процесів
- ◆ нові зварювальні матеріали та обладнання
- ◆ проблеми і тенденції автоматизації зварювальних та споріднених процесів
- ◆ впровадження прогресивних технологій при виготовленні та ремонті металоконструкцій
- ◆ стандартизація та сертифікація в зварювальному виробництві
- ◆ підготовка кадрів та організація конкурсів професійної майстерності
- ◆ проблеми екології
- ◆ розвиток міжнародного співробітництва

Запрошуємо прийняти участь в роботі конференції

Контакти: maksimov@paton.kiev.ua; pwi_37@ukr.net;
тел./факс: (+38) 044-200-82-77 www.patonpublishinghouse.com