

УДК 621.373.8

Применение бистатистического лазерного монитора для высокоскоростной визуализации процессов горения

М.В. Тригуб¹, Н.А. Васнев¹, В.Д. Китлер², Г.С. Евтушенко^{1, 3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский научный центр СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/4

³Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы
123317, г. Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13, стр. 1

Поступила в редакцию 5.11.2020 г.

Представлены результаты применения макета лазерного монитора с независимым источником подсветки (бистатистический лазерный монитор) для визуализации процессов, протекающих в условиях мощного фонового излучения. Максимальная скорость съемки составляла 15000 кадр/с, длительность импульса подсветки и усиления – 45 нс. Демонстрируется возможность наблюдения структурных превращений материалов в волне горения при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. Показано, что бистатистический лазерный монитор значительно улучшает качество (контраст, яркость) изображений слабоконтрастных объектов.

Ключевые слова: высокоскоростная визуализация, активная фильтрация, лазерный монитор, Ni–Al, синтез материалов, дуга постоянного тока, горение; high-speed imaging, active filtration, laser monitor, Ni–Al, synthesis of materials, DC arc, burning.

Введение

Достижения фотоники эффективно применяются в различных областях науки и техники. Ярким примером этого являются высокоскоростные методы визуализации, которые позволяют на новом уровне изучать процессы взаимодействия потоков энергии с веществом для получения новой информации о них [1–4]. Одна из трудностей при визуализации процессов, протекающих с выделением энергии, – наличие фонового излучения.

Существуют пассивные способы подавления фонового излучения, основанные на применении узкополосных оптических фильтров [5–7]. При высокой интенсивности фонового излучения полученные изображения должны подвергаться цифровой фильтрации [8]. Однако такой подход не всегда может быть использован на практике ввиду искажений при цифровой фильтрации. Применение источников подсветки в совокупности с оптической фильтрацией является достаточно распространенным методом получения изображений объектов, экранированных фоновым излучением [9]. Другой подход основан на применении активных сред на самообра-

занных переходах атомов металлов [10]. В этом случае среда выступает в качестве преобразователя оптического сигнала: усиливает яркость изображения в узких спектральном и временном диапазонах [11]. Активные оптические системы на основе таких усилителей яркости были названы лазерными проекционными микроскопами [12] и лазерными мониторами [13, 14].

Моностабильный вариант лазерного монитора, в котором функции подсветки и преобразования (усиления) выполняет один активный элемент, получил широкое распространение при изучении процессов, протекающих в области взаимодействия мощных потоков энергии с веществом [15]. В [16, 17] представлена схема лазерного монитора, в котором подсветка объекта и усиление яркости его изображения осуществлялись двумя активными средами. Название устройства – бистатистический лазерный монитор – подчеркивает разделение функций подсветки и преобразования параметров изображения (усиление, фильтрация и т.д.). Для синхронизации режима работы независимого источника подсветки и усилителя яркости использовались модулятор и система синхронизации [18, 19]. За счет независимой подсветки удается устранить недостатки самосопряженной (моностабильной) схемы лазерного монитора. В частности, бистатистический лазерный монитор имеет большие значения предельной дистанции до объекта наблюдения (не менее 15 м), области зрения, уровня входного сигнала усилителя яркости, контрастности получаемых изображений [16, 17].

* Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru); Николай Александрович Васнев (vasnev.nickol@yandex.ru); Владимир Давыдович Китлер (vasnev.nickol@yandex.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (evt@tpu.ru).

Цель настоящей работы — изучение процессов, протекающих в условиях широкополосного фоновго излучения, с помощью системы с усилителем яркости и независимым источником засветки. Объектами исследования являются дуга постоянного тока, а также горение скрутки проволок из никеля и алюминия.

Техника эксперимента

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

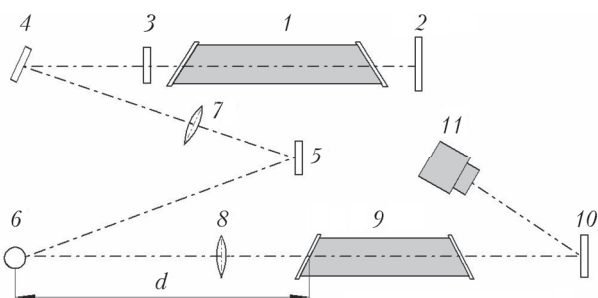


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — источник подсветки (активный элемент № 1); 2, 3 — плоскопараллельный резонатор источника подсветки; 4, 5 — зеркала; 6 — объект наблюдения; 7 — линза ($f = 75$ мм); 8 — объектив ОКП1-350-1 ($f = 350$ мм); 9 — усилитель яркости (активный элемент № 2); 10 — экран; 11 — высокоскоростная камера

Излучение источника подсветки 1, снабженного плоскопараллельным резонатором 2, 3, направлялось зеркалами 4, 5 на объект наблюдения 6. Линза 7 позволяла сфокусировать излучение для изменения размеров освещаемой области и интенсивности подсветки. Объектив 8 формировал оптическое изображение объекта наблюдения, которое усиливалось в активной среде усилителя яркости 9, а затем проецировалось на экран 10 и регистрировалось высокоскоростной камерой 11. Дистанция визуализации d не превышала 0,5 м. Аналогично [16, 17] в качестве источника подсветки и усилителя яркости использовались активные среды на парах бромида меди, формирующие излучение на длинах волн 510,6 и 578,2 нм. Вопрос согласования импульсно-периодических режимов их работы рассмотрен в [19]. Возбуждение активных сред осуществлялось источниками накачки с импульсным зарядом рабочей емкости (1100 пФ), частота следования импульсов варьировалась от 14 до 18 кГц [20]. Параметры активных элементов и параметры накачки приведены в таблице.

Параметры активных элементов и импульсный энерговклад

Активный элемент	Длина активной зоны, см	Диаметр канала, см	Объем активной зоны, см ³	Запасаемая энергия в конденсаторе, мДж
№ 1	90	5	1767	95,8
№ 2	50	3,2	402	85,9

Результаты визуализации и обсуждение

Горение дуги постоянного тока сопровождается мощным фоновым излучением. Для исследования процессов, протекающих на поверхности электродов, необходимо осуществить фильтрацию изображения от этого излучения. В настоящей работе дуга формировалась с помощью источника напряжения со стабилизацией тока от 30 до 80 А, яркостная температура дуги составляла 4500–5000 °С. На рис. 2 (цв. вкладка) представлены кадры процесса горения дуги, полученные с помощью разработанного бистатического лазерного монитора. Регистрация изображений осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры AOS Q-PRI. Скорость съемки составляла 3000 кадр/с, а область зрения — 3,5 мм. Каждый кадр формировался одиночным импульсом усиления за счет разработанной системы синхронизации.

Результаты визуализации на рис. 2 позволяют провести анализ процессов, протекающих на поверхностях электродов.

Дуга загорается между анодом (А) и катодом (К) (рис. 2, а). Через 12 мс после начала горения дуги (рис. 2, б) зафиксирован разлет материала электрода (показан стрелкой). Разрушение анода более выражено и локализовано в области замыкания тока. На рис. 2, в, г стрелкой показана область разрушения на аноде, которая постепенно увеличивается в размерах из-за испарения материала электрода. В процессе горения дуги изменяется яркость изображения катода, что видно на рис. 2, г, д. Область на катоде, показанная стрелкой на рис. 2, г, ярче, чем та же область на кадре рис. 2, в. Согласно [21] изменение яркости изображения в лазерном мониторе свидетельствует об изменении температуры. Этот факт подтверждают результаты проведенных экспериментов, так как после отключения источника напряжения яркость катода становится прежней. Следует отметить, что визуализация в бистатическом лазерном мониторе позволяет зафиксировать движение катодного пятна [21]. На рис. 2, е зафиксирован момент появления пятна на передней грани электрода (показано стрелкой).

Таким образом, бистатический лазерный монитор позволяет получать контрастные изображения электродов дуги постоянного тока. Качество изображений достаточно высокое для выявления структурных изменений в процессе горения дуги. Динамический диапазон яркости изображений, который может изменяться путем варьирования параметров подсветки (активный элемент 1 на рис. 1), позволяет проводить оценку температуры во время горения.

Другим объектом исследования была скрутка проволок из никеля и алюминия. Диаметр никелевой проволоки составлял 350 мкм, алюминиевой — 400 мкм. Этот процесс интересен с точки зрения изучения механизма быстропротекающих реакций горения металлов, который наблюдается в ракетных

двигателях [22], а также при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе функциональных материалов [23]. Важным аспектом изучения горения металла является динамика процессов плавления и жидкофазного переноса компонентов реагирующих систем. Указанные процессы сильно влияют на скорость и полноту превращений за счет эффектов конвекции Марангони, капиллярного растекания и коалесценции расплавов [24, 25]. Для иницирования процесса горения на проволоку подавалось постоянное напряжение. Результаты визуализации процесса горения показаны на рис. 3 (цв. вкладка). Кадры получены с помощью высокоскоростной камеры MotionPro X3.

Интенсивность фонового излучения не позволяет детально изучить особенности протекания процесса в области максимальной температуры (2000 К). Высокий градиент температуры делает невозможной одновременную регистрацию процессов нагрева и расплава. Как отмечалось во введении, в этом случае для визуализации можно использовать системы с внешней подсветкой и дополнительными оптическими фильтрами.

На рис. 4 (цв. вкладка) представлены результаты визуализации процесса горения при подсветке излучением CuVg-лазера и фильтрации изображения с помощью фильтра СЗС-22. Зафиксирован процесс нагрева проводника и испарения материала проволок (рис. 4, а). Спустя 1 мс сделан кадр, на котором виден расплав никеля и алюминия (рис. 4, б). Еще спустя 500 мкс происходит разрыв (рис. 4, в) и дальнейшее плавление материалов проволок. Скорость горения проволок составила 30 см/с.

Следует отметить, что использование внешней подсветки и фильтра не позволяет полностью подавить влияние фонового излучения, возникающего в результате горения. Экспозиция камеры была минимальной — 3 мкс, а длительность импульса подсветки — 45 нс. Такое соотношение приводит к уменьшению соотношения полезный сигнал-шум за счет увеличения длительности регистрации фонового излучения. Снижение времени формирования кадра (временная фильтрация), а также уменьшение спектра пропускания фильтра (спектральная фильтрация) позволяют повысить соотношение полезный сигнал-шум.

Фоновое излучение может быть устранено с помощью усилителя яркости, который обеспечивает спектральную и временную фильтрацию, так как в этом случае кадр формируется за 45 нс (длительность импульса усиления) На рис. 5 (цв. вкладка) показаны фотографии проволок, сделанные в моностатическом и бистатическом мониторах.

Поскольку объект наблюдения занимает относительно малую часть кадра, за ним располагался матовый экран, который обеспечивал равномерное фоновое освещение. Следует отметить, что оптическая схема в ходе эксперимента не изменялась. В моностатическом лазерном мониторе перекрывалось излучение источника подсветки. Полученные изображения (рис. 5, а) малоcontrastные. Яркость про-

волоки из никеля (выделена красным овалом), колеблется в диапазоне 12–20 единиц в градациях серого. При дополнительной подсветке удается устранить этот недостаток и получить контрастное изображение никеля и алюминия (рис. 5, б). Яркость никелевой проволоки в указанной области увеличена до 30–60 единиц в градациях серого. Поэтому именно бистатическая схема лазерного монитора была использована для визуализации процесса горения проволок.

Результаты визуализации в бистатическом лазерном мониторе при регистрации изображений на высокоскоростную камеру AOS Q-PR1 представлены на рис. 6 (цв. вкладка). Съемка осуществлялась со скоростью $15 \cdot 10^3$ кадр/с, экспозиция составляла 4 мкс. Каждый кадр формировался одиночным импульсом подсветки и усиления (45 нс).

Опираясь на полученные результаты, можно провести анализ структурных превращений (нагрев, расплав, горение и т.д.) в процессе взаимодействия компонент (Ni и Al). Следует отметить, что первый кадр (0 мс) сделан примерно через 2 с после подачи напряжения на проводники. На втором кадре (60 мс) видно плавление проводника из никеля, и спустя 1 мс наблюдается расплав и смешение обоих проводников и образование жидкой фазы к 63 мс. Далее, спустя примерно 1,5 мс, происходит разрыв проводника и формируется капля (65 мс). Несмотря на то, что на рис. 6 приведены результаты визуализации в достаточно крупном масштабе времени (единицы миллисекунд), бистатический лазерный монитор позволяет исследовать процессы с характерным временем порядка 70–100 мкс. В отличие от визуализации в режиме лазерной подсветки (рис. 4) на полученных изображениях полностью отсутствует фоновое излучение.

Заключение

Представлены результаты применения макета бистатического лазерного монитора с временным разрешением $15 \cdot 10^3$ кадр/с и формированием изображения одним импульсом подсветки. Макет состоит из источника подсветки и усилителя яркости, выполненных на основе активных сред на парах бромида меди, длительность импульсов — 45 нс. С помощью разработанного монитора были исследованы процессы горения двух объектов. На примере горения дуги постоянного тока показана возможность фильтрации изображения от фонового излучения с яркостной температурой порядка 5000 К. Динамический диапазон яркости изображения позволяет оценивать температуру электрода по его отражательной способности. Зафиксировано движение катодного пятна.

На примере визуализации горения проволок из никеля и алюминия показаны преимущества использования лазерного монитора с дополнительным источником подсветки. При использовании усилителя яркости полностью подавляется фоновое

излучение. Временная и спектральная фильтрация в активной среде усилителя яркости и высокая скорость съемки позволяют изучать структурные превращения в волне горения Ni–Al с температурой порядка 2000 К. Независимый источник подсветки дал возможность повысить контраст в 2 раза. Контраст увеличен за счет повышения яркости изображения при сохранении яркости фона. Визуализация в режиме лазерной подсветки с внешней фильтрацией не позволяет полностью подавить фоновое излучение при горении с температурой порядка 2000 К. Скорость горения образца, измеренная по результатам визуализации, составила 30 см/с.

В дальнейшем предполагается применение бистатистического лазерного монитора в совокупности с другими методами визуализации с целью изучения динамики процессов плавления и жидкофазного переноса компонентов реагирующих систем при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-79-10096. Система возбуждения на основе тиратрона изготовлена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Zelenák M., Říha Z., Jandačka P. Visualization and velocity analysis of a high-speed modulated water jet generated by a hydrodynamic nozzle // Measurement: J. Int. Meas. Confed. 2020. V. 159, N 107753. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107753.
2. Smith S.E., Travis K.N., Djeridi H., Obligado M., Cal R.B. Dynamic effects of inertial particles on the wake recovery of a model wind turbine // J. Renewable Energy. 2021. V. 164. P. 346–361. DOI: 10.1016/j.renene.2020.09.037.
3. Chen W.-L., Min X.-W., Gao D.-L., Guo A.-X., Li H. Experimental investigation of aerodynamic forces and flow structures of bionic cylinders based on harbor seal vibrissa // Exp. Therm. Fluid Sci. 2018. N 99. P. 169–180. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.07.033.
4. Квиши Ю.А., Редькин Е.С., Дмитриев Д.Н. Экспериментальное исследование закрученной газовой струи методом цифровой трассерной визуализации // Вестн. Самарского гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С.П. Королева. 2011. Т. 29, № 5. С. 113–117.
5. Dulin V.M., Lobasov A.S., Chikishev L.M., Markovich D.M., Hanjalic K. On impact of helical structures on stabilization of swirling flames with vortex breakdown // Flow, Turbul. Combust. 2019. V. 103. P. 887–911. DOI: 10.1007/s10494-019-00063-7.
6. Zhenkan Wang, Panagiota Stamatoglou, Bo Zhou, Marcus Aldén, Xue-Song Bai, Mattias Richter. Investigation of OH and CH₂O distributions at ultra-high repetition rates by planar laser induced fluorescence imaging in highly turbulent jet flames // Fuel. 2018. V. 234. P. 1528–1540. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.07.012.
7. Дулин В.М., Маркович Д.М., Чикишев Л.М. Исследование структуры течения обедненных режимов горения в модельной камере сгорания методом PIV // Современная наука. 2012. № 2 (10). С. 324–329.
8. Дулин В.М., Козорезов Ю.С., Маркович Д.М., Токарев М.П. Исследование газодинамической структуры

потока в закрученном турбулентном пламени стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации // Вестн. НГУ. Сер.: Физика. 2009. Т. 4, вып. 3. С. 30–42.

9. Handbook of Laser Technology: Applications / С.Е. Webb, J.D.C. Jones (eds.). California: Institute of Physics, 2004. 2725 p.
10. Абросимов Г.В., Польский М.М., Саенко В.Б. Использование лазерной среды для фотографирования поверхностей, закрытой слоем плазмы // Квант. электрон. 1988. Т. 15, № 4. С. 850–851.
11. Оптические системы с усилителями яркости / В.И. Беспалова, Г.А. Пасманика (ред.). Горький: ИПФ АН СССР. 1988. 173 с.
12. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп // Квант. электрон. 1974. Т. 1, № 1. С. 14–15.
13. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения // Докл. АН СССР. 1988. Т. 303, № 4. С. 85–86.
14. Абрамов Д.В., Галкин А.Ф., Жаренова С.В., Климовский И.И., Прокошев В.Г., Шаманская Е.Л. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекла и пироуглерода // Изв. ТПУ. 2008. Т. 312, № 2. С. 97–101.
15. Trigub M.V., Platonov V.V., Osipov V.V., Evtushenko T.G., Evtushenko G.S. Laser monitors for high speed imaging of materials modification and production // Vacuum. 2017. V 43. P. 486–490.
16. Тригуб М.В., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О., Шиянов Д.В. Бистатистический лазерный монитор // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, вып. 12. С. 51–56.
17. Trigub M.V., Vasnev N.A., Evtushenko G.S. Bistatic laser monitor for imaging objects and processes // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 2020. V. 126, iss. 3. DOI: 10.1007/S00340-020-7387-5.
18. Высоковольтный модулятор: Пат. 185671. Россия, Васнев Н.А., Тригуб М.В., Димаки В.А., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О., Власов В.В.; ИОА СО РАН Патент на полезную модель № 185671. Приоритет 09.10.18. Дата государственной регистрации: 13.12.18. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
19. Тригуб М.В., Васнев Н.А., Евтушенко Г.С., Димаки В.А. Система синхронизации импульсно-периодического режима работы активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 30–35. DOI: 10.1134/S0032816218060307.
20. Trigub M.V., Ogorodnikov D.N., Vasnev N.A. Design of a metal vapor laser power supply // 2016 Intern. Siberian Conf. on Control and Commun. (SIBCON). DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491794.
21. Батенин В.М., Глина В.Ю., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Применение оптических систем с усилителями яркости для исследования поверхностей электродов из графита и пироуглерода во время горения дуги // Техника высоких температур. 1991. Т. 29, вып. 6. С. 1204–1210.
22. Похил П.Ф., Логачев В.С., Мальцев В.М., Селезнев В.А. Горение металлизированных конденсированных систем. М.: ИХФ АН СССР, 1962. 294 с.
23. Розачев А.С., Мукасыян А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетическую. М.: Физматлит. 2012. 400 с.

24. Кирдяшкин А.И., Китлер В.Д., Юсупов Р.А., Саламатов В.Г., Максимов Ю.М. Капиллярные гидродинамические явления в процессе безгазового горения // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 6. С. 1–7.
25. Кирдяшкин А.И., Китлер В.Д., Саламатов В.Г., Юсупов Р.А. Особенности структурной динамики высокотемпературных металлотермических процессов на примере системы FeO–Al–Al₂O₃ // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 1. С. 81–84.

M.V. Trigub, N.A. Vasnev, V.D. Kitler, G.S. Evtushenko. Use of bistatic laser monitor for high-speed imaging of combustion processes.

The paper presents the results of using a laser monitor with an independent illumination source (bistatic laser monitor) to image the processes blocked from an observer by the background light. The maximum shooting speed was 15–10³ fps. The possibility to observe the structural transformations in a combustion wave of self-propagating high-temperature synthesis is shown. It is shown that a bistatic laser monitor allows one to significantly improve the image quality (contrast, brightness) of low-contrast objects.

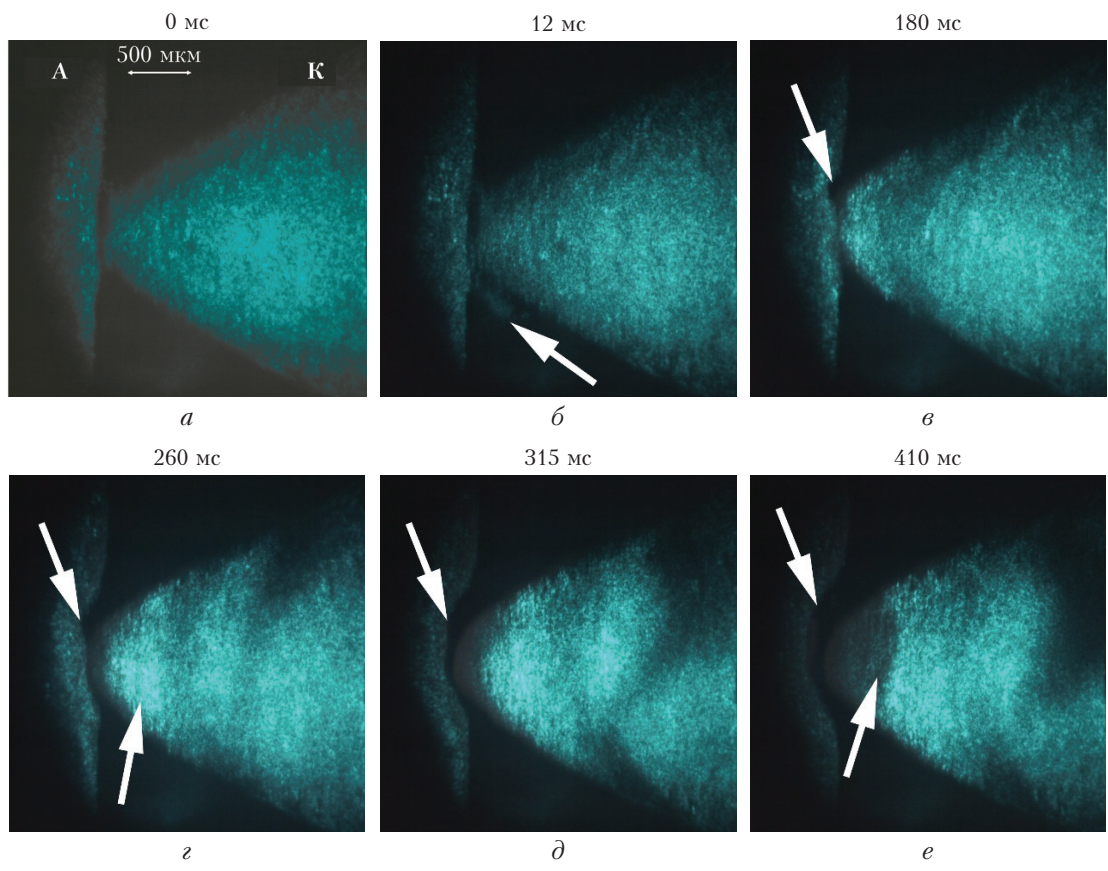


Рис. 2. Визуализация процесса горения дуги постоянного тока в различные моменты времени: *a* – 0; *б* – 12; *в* – 180; *г* – 260; *д* – 315; *е* – 410 мс

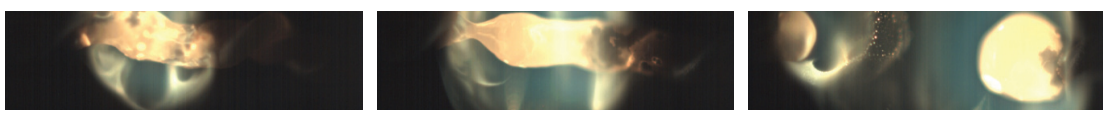


Рис. 3. Процесс горения Ni–Al. Визуализация в собственном свечении

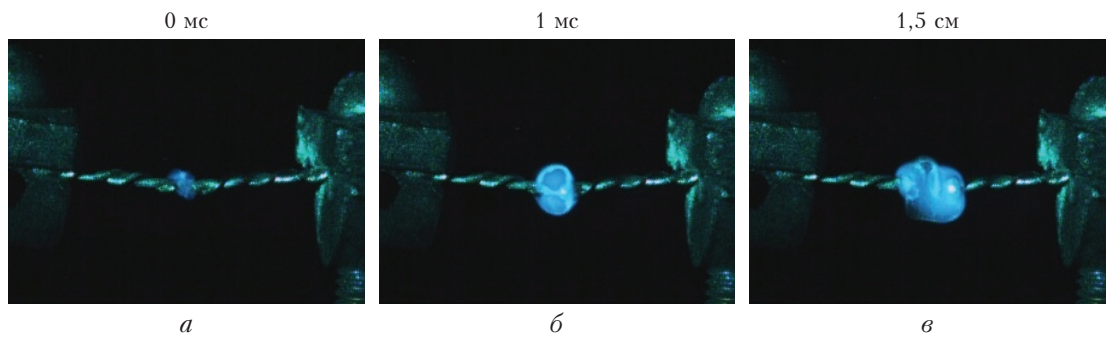


Рис. 4. Визуализация процесса горения проволок в режиме лазерной подсветки в различные моменты времени: *a* – 0; *б* – 1; *в* – 1,5 мс

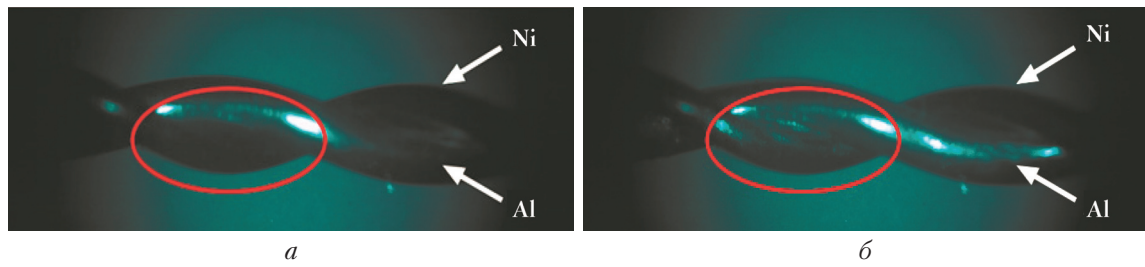


Рис. 5. Фотографии проволоки, сделанные: *a* – в моностатическом; *б* – бистатическом лазерных мониторах

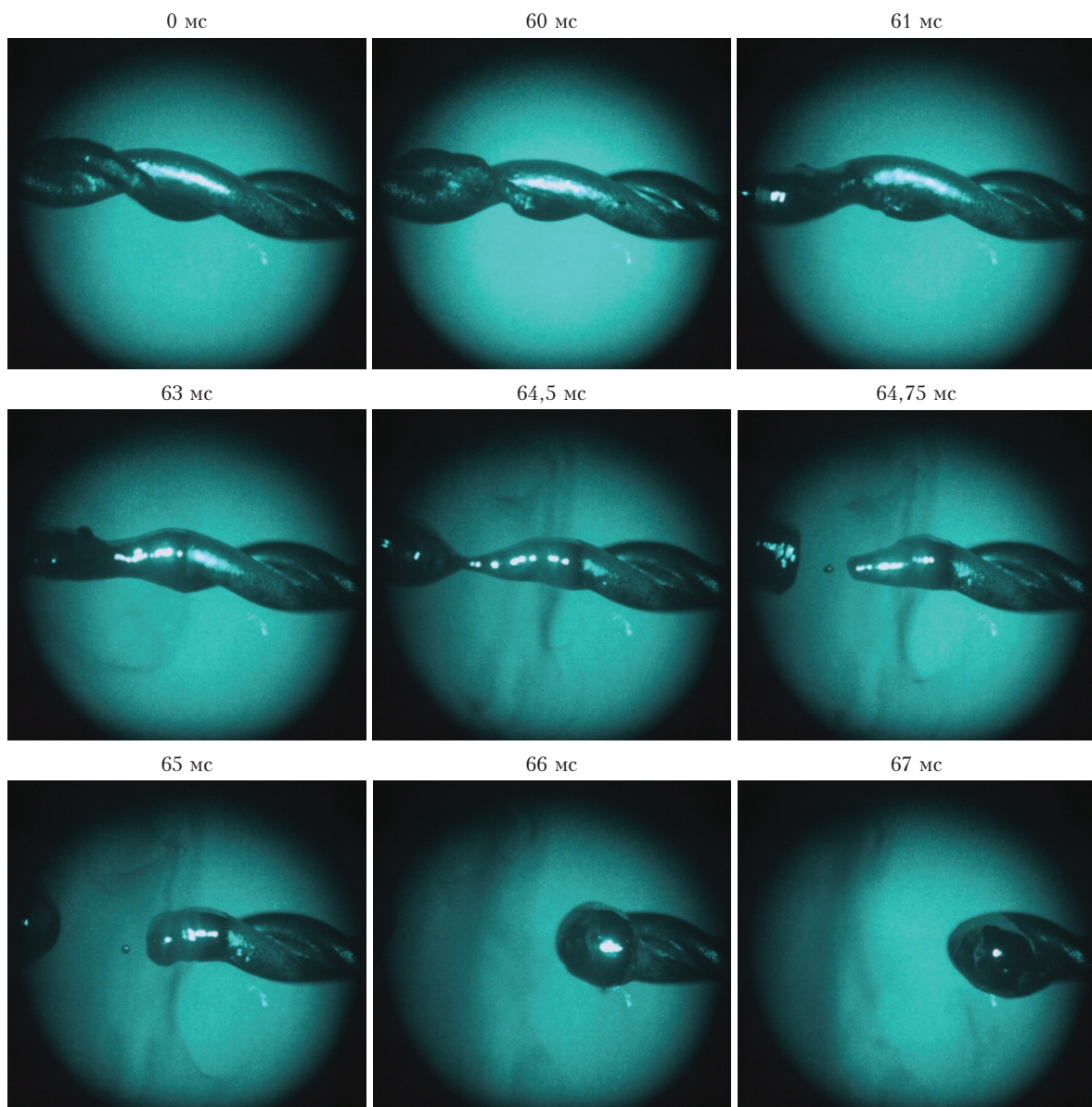


Рис. 6. Визуализация процесса горения Ni–Al