УДК 662.612

К.К. ПАУШКИНА, аспирант гр. А1-13 (НИ ТПУ)
С.В. БЕЛЯЕВ, аспирант гр. А0-13 (НИ ТПУ)
Научный руководитель Д.О. ГЛУШКОВ, к.ф.-м.н., доцент (НИ ТПУ)
г. Томск

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ КАПЛИ КОМПОЗИЦИОННОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СТАЛИ С РАЗНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Введение

В последнее десятилетие интенсивно разрабатываются технологии получения топливных суспензий из низкосортных углей и угольных отходов, в состав которых кроме воды входят химические добавки и отходы нефтепереработки [1,2]. Перспективность использования топливных суспензий обусловлена не только финансово-экономическими аспектами типичных компонентов, но и снижением загрязнения окружающей среды за счет уменьшения площадей полигонов для хранения твердых и жидких горючих отходов.

Известно [3], что при интенсивном нагреве (температуры источника нагрева 800–900 °С) капель суспензионных топлив (органоводоугольных топлив – ОВУТ) протекает процесс диспергирования, характеризующийся увеличением эффективной площади поверхности капли топлива, что ведет к интенсификации воспламенения и увеличению скорости выгорания компонентов топлива.

На практике предполагается распыление ОВУТ в топке котла посредством форсунок. На выходе из форсунки струя суспензии распадается на капли, часть из которых до момента зажигания контактирует с внутренними разогретыми до высоких температур стенками и поверхностями топок [4].

Целью настоящей работы является определение влияния характеристик шероховатости поверхности жаростойкой, жаропрочной стали на закономерности и характеристики процессов зажигания и горения одиночных капель ОВУТ в условиях кондуктивного нагрева, а также на протекание процесса диспергирования и интенсивность его реализации при температуре поверхности нагрева, соответствующей условиям функционирования топок типичных паровых котлов.

Экспериментальная методика

На основе рекомендаций [5] в качестве топлива исследовалась органоводоугольная суспензия следующего состава: 30 % масс. сухой отход (фильтр-кек) обогащения каменного угля марки Д (обогатительная фабрика

«Листвянская», Кемеровская область), 35 % масс. вода, 35 % масс. отработанное моторное масло.

Поверхности стали 20Х23Н18 изготовлены в форме пластин размерами 10×10×2 мм. На поверхностях разных пластин были сформированы три текстуры абразивными материалами со средним размером зерна 15 мкм (No. 1), 100 мкм (No. 2) и 269 мкм (No. 3) и одна текстура (No. 4) – лазерной обработкой иттербиевым наносекундным импульсным волоконным лазером в составе установки МиниМаркер 2 (IPG-Photonics, Россия) с длинной волны 1064 нм (импульс длительностью 200 нс, частотой 20 кГц, энергией 1 мДж, пятно диаметром 60 мкм, пятикратное прохождение).

Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения капель ОВУТ на поверхностях стали, модифицированных абразивными материалами и лазерным излучением, в условиях кондуктивного нагрева выполнены на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рисунке 1.

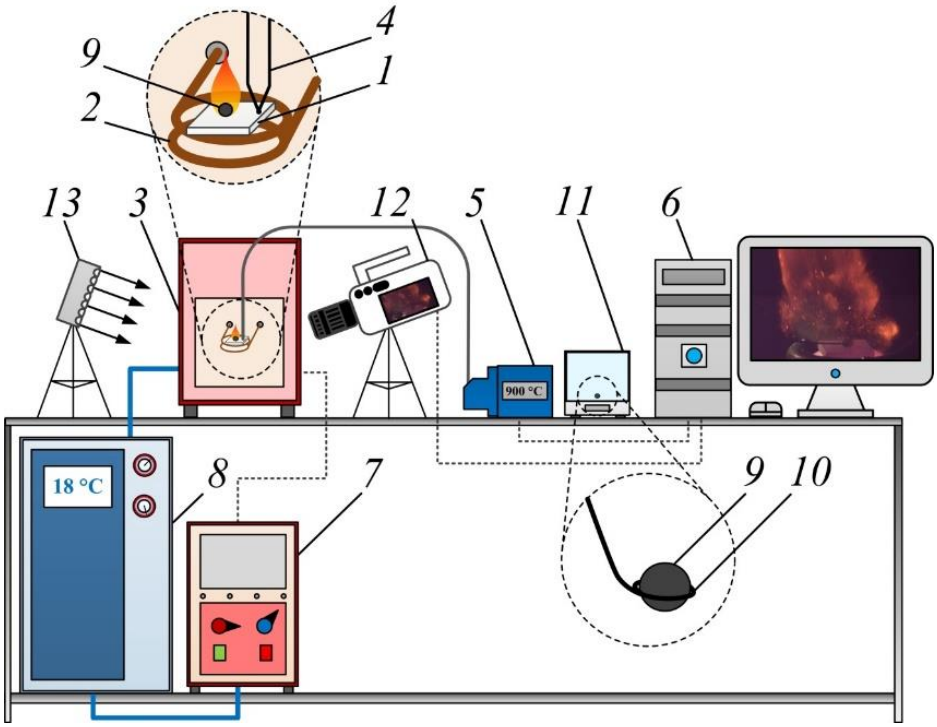


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: *1* – стальная пластина; *2* – медная спираль индуктора; *3* – электромагнитный индуктор; *4* – термопара; *5* – модуль ввода; *6* – ПК; *7* – блок-регулятора индуктора; *8* – чиллер; *9* – капля топлива; *10* – держатель; *11* – весы; *12* – высокоскоростная видеокамера; *13* – светильник

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены трехмерные параметры шероховатости, полученные по результатам анализа поверхностей методом профилометрии.

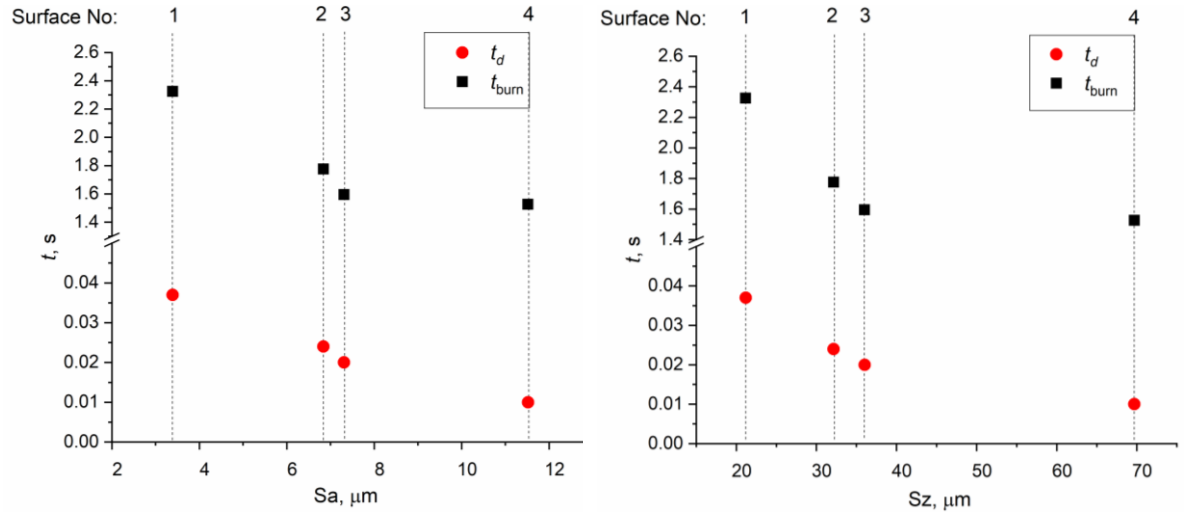
Таблица 1

Трехмерные параметры шероховатости поверхностей, обработанных абразивными материалами и лазерным излучением.

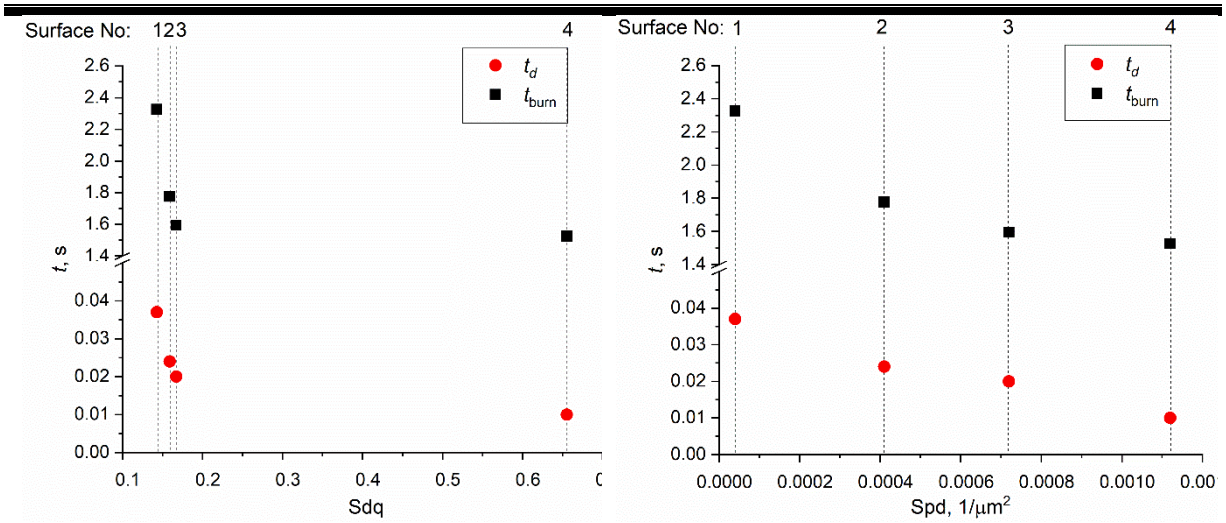
Метод обработки поверхностей стали	Механическая обработка абразивными материалами			Обработка лазерным излучением
Обозначение поверхностей стали (No)	1	2	3	4
Средний размер зерна абразивного материала, мкм	15	100	269	–
Sa, мкм	3,39	6,84	7,31	11,52
Sz, мкм	21,18	32,16	36,02	69,69
Sdq	0,1429	0,1591	0,1672	0,6555
Spd, 1/мкм^2	0,00004	0,00041	0,00072	0,00112

Можно сделать вывод о том, что обработка поверхностей стали лазерным излучением позволяет значительно увеличить их шероховатость по сравнению с обработкой абразивными материалами.

На рисунке 2 приведены экспериментально установленные значения времени задержки зажигания (t_d) и времени выгорания (t_{burn}) одиночных капель ОВУТ (масса 7 мг, радиус 1,2 мм) в условиях их непосредственного контакта с нагретыми до 900 °С модифицированными поверхностями стали от трехмерных параметров шероховатости Sa (рис. 2*а*), Sz (рис. 2*б*), Sdq (рис. 2*в*), Spd (рис. 2*г*).



(*а*) (*б*)



(*в*) (*г*)

Рис. 2. Зависимости времен задержки зажигания и выгорания капли органоводоугольного топлива от трехмерных параметров шероховатости Sa (*а*), Sz (*б*), Sdq (*в*), Spd (*г*) поверхности стали при температуре 900 °С. Порядковый номер поверхностей стали: 1–3 (обработка абразивными материалами), 4 (обработка лазерным излучением)

Значения времен задержки зажигания и времен выгорания топлива при конструировании камер сгорания определяют габаритные размеры и тепловой режим работы энергогенерирующего оборудования. Существенное отличие времен задержки зажигания (35–45%) и выгорания (65–70%) капель ОВУТ на поверхностях стали No. 1, No. 2, No. 3 при идентичных условиях экспериментов объясняется тем, что в условиях контакта капли ОВУТ с поверхностью стали с большей шероховатостью площадь межфазной поверхности будет тоже больше.

Заключение

Установлено, что шероховатость поверхностей стали (нанесенная абразивными материалами со средним размером зерна от 15 до 269 мкм и лазерным излучением) не влияет на закономерности протекания физико-химических процессов в течение индукционного периода при зажигании и горении капель ОВУТ в условиях кондуктивного нагрева.

Интенсивность тепломассопереноса в капле и ее окрестности за счет увеличения межфазной площади “капля ОВУТ – поверхность стали” близка к пределу на поверхностях стали с текстурой, характеризующейся трехмерными параметрами шероховатости Sa≈7,5 мкм, Sz≈36 мкм, Sdq≈0,17. В таких условиях тепломассоперенос в капле и ее окрестности оказывает несущественное влияние на интенсивность физико-химических процессов, протекающих в течение индукционного периода.

В условиях зажигания и горения капель ОВУТ на поверхностях стали управлять временем зажигания и временем выгорания можно за счет шероховатости поверхности. Для уменьшения времени зажигания и выгорания

капель ОВУТ при обработке поверхностей стали необходимо использовать абразивные материалы со средним размером зерна 100 мкм. Применение абразивных материалов со средним размером зерна более 100 мкм незначительно уменьшает время зажигания и время выгорания капель ОВУТ, но значительно увеличивает осаждение продуктов горения на модифицированных поверхностях стали. Лазерная обработка является наиболее перспективным способом модификации поверхностей нагрева с целью управления характеристиками горения капель ОВУТ, так как позволяет контролировать время зажигания и время выгорания в широком диапазоне значений, а также способствует значительному повышению стойкости поверхностей стали к осаждению твердых продуктов горения топлива.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2020-806 (номер контракта 13.1902.21.0014).

Список литературы:

1. Wang, R. The slurrying properties of slurry fuels made of petroleum coke and petrochemical sludge / R. Wang, J. Liu, F. Gao, J. Zhou, K. Cen // Fuel Processing Technology. – 2012. – Vol. 104. – P. 57–66.
2. He, Q. The utilization of sewage sludge by blending with coal water slurry / Q. He, D. Xie, R. Xu, T. Wang, B. Hu // Fuel. – 2015. – Vol. 159. – P. 40–44.
3. Glushkov, D. O. Conditions and characteristics of droplets breakup for industrial waste-derived fuel suspensions ignited in high-temperature air / D. O. Glushkov, D. V. Feoktistov, G. V. Kuznetsov, K. A. Batishcheva, T. Kudelova, K. K. Paushkina // Fuel. – 2020. – Vol. 265. – P. 116915.
4. Valiullin, T. R. Ignition of hovering droplets of organic coal water fuels / T. R. Valiullin, K. Y. Vershinina, V. V. Medvedev, I. P. Ozerova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, № 1. – P. 228–239.
5. Dorokhov, V. V. Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making / V. V. Dorokhov, G. V. Kuznetsov, K. Y. Vershinina, P. A. Strizhak // Energy. – 2021. – Vol. 234. – P. 121257.

Информация об авторах:

Кристина Константиновна Паушкина, аспирант гр. А1-13, НИ ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, kkp1@tpu.ru

Савелий Викторович Беляев, аспирант гр. А0-13, НИ ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, belyaev-saveliy@mail.ru

Дмитрий Олегович Глушков, к.ф.-м.н., доцент, НИ ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, dmitriyog@tpu.ru