

Научная статья

УДК 544.452.14, 543.429.23

DOI: 10.15372/KhUR2025652

EDN: RUQRXF

Каталитическое влияние минеральной части бурого угля на горение угольных микрочастиц под действием лазерного излучения

Б. П. АДУЕВ [✉], Д. Р. НУРМУХАМЕТОВ, В. Д. ВОЛКОВ, С. А. СОЗИНОВ

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: abp-icms@rambler.ru[✉], ndr9999@yandex.ru, lesinko-iuxm@yandex.ru, sozinov71@mail.ru

Аннотация

Исследовано влияние минеральных компонентов бурого угля на эффективность горения угольных микрочастиц при импульсно-периодическом воздействии лазерным излучением (1064 нм, 120 мкс, 3 Гц). Экспериментальные образцы представляли собой прессованные таблетки с плотностью 1 г/см³. При облучении микрочастиц одинаковыми дозами излучения величина выгоревшей массы больше у образцов с более высокой зольностью, что свидетельствует о каталитическом влиянии минеральной части угля на скорость выгорания. Методом сканирующей электронной микроскопии исследована морфология поверхности и поперечных сколов образцов после облучения. Установлено, что на поверхности высокзольных образцов наблюдаются оплавленные капли минералов, а на поперечных сколах – каналы выгоревшей органической части и образование фазы оксида кальция.

Ключевые слова: лазерное излучение, бурый уголь, зольность, каталитическое воздействие

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Института углехимии и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (проект № 121031500513-4).

Благодарность: работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ УУХ СО РАН (Кемерово).

Для цитирования: Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Волков В. Д., Созинов С. А. Каталитическое влияние минеральной части бурого угля на горение угольных микрочастиц под действием лазерного излучения // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 3. С. 279–288. DOI: 10.15372/KhUR2025652. EDN: RUQRXF.

Original article

Catalytic effect of the mineral part of brown coal on the combustion of coal microparticles under the influence of laser radiation

B. P. ADUEV , D. R. NURMUKHAMETOV, V. D. VOLKOV, S. A. SOZINOV

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russia

E-mail: abp-icms@rambler.ru[✉], ndr9999@yandex.ru, lesinko-iuxm@yandex.ru, sozinov71@mail.ru

Abstract

The effect of mineral components of brown coal on the efficiency of coal microparticle combustion under pulsed periodic exposure to laser radiation (1064 nm, 120 μ s, 3 Hz) has been studied. The experimental samples were pressed tablets with a density of 1 g/cm³. Under microparticle irradiation with the same doses, the burnt mass is larger in samples with higher ash content, which indicates the catalytic effect of the mineral part of coal on burnout rate. The morphology of the surface and transverse chips of the samples after irradiation was studied by scanning electron microscopy. It has been found that the fused drops of minerals are observed on the surface of high-ash samples, and the channels of burnt organic part are observed on the transverse chips, along with the formation of calcium oxide phase.

Keywords: laser radiation, brown coal, ash content, catalytic action

ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния минеральных включений на характеристики сжигания и пиролиза угольного топлива представляют актуальную задачу в области рационального использования природных ресурсов. С одной стороны, повышенная зольность углей обуславливает негативные факторы, влияющие на загрязнение окружающей среды и эрозию конструкционных элементов угольных топок [1, 2]. С другой стороны, отмечается, что минеральные включения выступают в качестве катализаторов при пиролизе и газификации углей [3–7].

При пиролизе и газификации углей с использованием различных сред (инертная атмосфера, монооксид углерода, вода, ограниченное количество кислорода) однозначно показано каталитическое влияние минеральной части углей

на их реакционную способность [3–5]. Деминерализация угля приводит к снижению его реакционной способности при пиролизе [5, 6]. В работе [7] установлен ряд каталитической активности металлов (Ca > Na > Fe > Mn) в процессе карбонизации и газификации гуминовых кислот, выделенных из бурых углей.

Механизмы влияния минеральной части на выгорание при сжигании пылеугольного топлива изучены слабо [1, 2]. В частности, сообщается [2], что общей тенденцией при сжигании углей является уменьшение реакционных свойств при увеличении зольности. Тем не менее, в этой же работе не исключают каталитического влияния компонентов минеральной части на окисление и воспламенение углей.

Представляет практический интерес исследование процессов зажигания и пиролиза углей

при воздействии лазерного излучения. Так, разработка метода лазерного розжига топлива позволит отказаться от использования для этих целей мазута, который приводит к ускорению коррозии конструкционных материалов и наносит ущерб окружающей среде [8, 9].

В нашей работе [10] исследован пиролиз образцов бурого угля в атмосфере аргона с использованием импульсно-периодического лазерного излучения до деминерализации (исходный) и после извлечения минералов. Установлено, что масса выгоревшего угля и выход горючих компонентов в исходных образцах значительно выше, чем в деминерализованных углях при воздействии на образцы одинаковыми дозами облучения. Таким образом, при лазерном пиролизе наблюдаются качественно те же закономерности, что и при других видах пиролиза. При исследовании зажигания и горения углей с использованием импульсного лазерного излучения в окислительной среде (воздух) определены критические плотности энергии зажигания, а также спектрально-кинетические характеристики свечения на различных стадиях горения угольных частиц [11–15]. Влияние минеральной части на зажигание и горение органической части углей в этих работах не изучалось, хотя эта проблема, как указывалось выше, даже при традиционных методах сжигания топлива однозначно не решена.

Цель настоящей работы – исследование влияния минеральных включений на скорость выгорания органической части угля при импульсно-периодическом воздействии излучения YAG:Nd^{3+} -лазера (120 мкс, 7 Дж/см², 3 Гц) в окислительной атмосфере (среда воздуха). Приведены результаты электронно-микроскопических исследований, демонстрирующие на качественном уровне влияние зольности на скорость выгорания образцов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Исследования проводились с использованием образцов бурого угля (марка 2Б), разрез Кайчакский Канско-Ачинского угольного бассейна. Согласно литературным данным, бурые угли чаще других используют в качестве объектов при исследовании пиролиза и газификации, а также широко применяют как энергетический материал [16, 17].

В работе исследовались образцы бурого угля из банка Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (Кемерово), которые далее будем называть исходными.

Методы исследования

Для решения поставленной задачи использовались следующие подходы: деминерализация исходных образцов бурого угля; технический анализ; исследование минерального состава зол исходного и деминерализованного образцов.

Изучение влияния зольности на скорость выгорания образцов при лазерном воздействии проводили методом взвешивания исходных и деминерализованных образцов до и после облучения с нахождением убыли массы. Деминерализацию образцов выполняли путем последовательной обработки частиц угля растворами соляной и плавиковой кислот.

Для наглядной демонстрации влияния минеральных включений на выгорание органической части угля применяли метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6390 1A (JEOL, Япония) с оптическим детектором рентгеновского излучения JED 2300 (JEOL, Япония). Электронно-микроскопические фотографии поверхности и поперечных сколов таблетированных образцов получены в режиме регистрации обратно рассеянных электронов и характеристического рентгеновского излучения.

Технический анализ исходного (до деминерализации) и деминерализованного бурого угля осуществляли согласно ИСО 17246:2010.

Минеральный состав зол определяли методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6500 Duo LA (Thermo Fisher Scientific, США).

Экспериментальные образцы получали из порошков исходного и деминерализованного углей, измельченных на планетарной мельнице АГО-2 (Новосибирский испытательный центр, Россия), с последующим просеиванием через сито с размером ячеек 63 мкм.

Распределение частиц по размерам исследовали с применением лазерного дифрактометра Analysette 22 Comfort (Fritsch, Германия). Частицы распределены в диапазоне 0,5–63 мкм с максимумом распределения 20–30 мкм.

В экспериментах использовали таблетированные образцы, изготовленные с помощью гид-

равлического пресса. Характеристики таблеток: плотность $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, диаметр 6.2 мм, толщина 2 мм, масса $60.0 \pm 0.3 \text{ мг}$.

Для зажигания образцов, как и в работах [12–16], применяли импульсный YAG: Nd³⁺-лазер LQ929 (SOLAR laser System, Беларусь), работающий в режиме свободной генерации. Длина волны излучения составляла 1064 нм, длительность импульса – 120 мкс. Режим облучения – импульсно-периодический. Диаметр облучаемого пятна на поверхности образца – 5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты технического анализа исходного (до деминерализации) и деминерализованного бурого угля представлены в табл. 1. После деминерализации угля наблюдается незначительное снижение содержания влаги, выхода летучих веществ и значительное снижение зольности.

В первой серии экспериментов определяли величину выгоревшей массы исходных и деминерализованных образцов бурого угля при одинаковой дозе импульсно-периодического лазерного облучения. Эксперименты проводились при следующих условиях: плотность энергии излучения в отдельном импульсе $H = 7 \text{ Дж/см}^2$, частота следования импульсов $f = 3 \text{ Гц}$, время облучения $t = 120 \text{ с}$, число импульсов $N = f \cdot t = 360$. При использованной плотности энергии излучения вероятность зажигания в отдельном импульсе для обоих типов образцов $P = 1$. Исходный и деминерализованные образцы взвешивали на аналитических весах с точностью 0.1 мг до облучения и после него. Величину выгоревшей массы образца (Δm) вычисляли по формуле:

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (1)$$

где m_1 и m_2 – массы образца до и после облучения соответственно.

Эксперимент повторяли трижды и определяли среднее значение Δm и доверительный

интервал по методу Стьюдента при доверительной вероятности $\alpha = 0.95$.

Для исходного образца величина Δm равна $36.3 \pm 0.7 \text{ мг}$, а для деминерализованного – $25.9 \pm 0.7 \text{ мг}$, что составляет 60.5 ± 1.1 и $42.7 \pm 1.1 \%$ соответственно от общей массы образца.

Величина выгоревшей массы за 1 импульс облучения (Δm_i) рассчитывалась по формуле:

$$\Delta m_i = \Delta m / (f \cdot t) \quad (2)$$

Экспериментально получено: для исходного образца $\Delta m_i = 0.1 \text{ мг/имп}$ (0.17 %); для деминерализованного образца $\Delta m_i = 0.071 \text{ мг/имп}$ (0.12 %). Таким образом, величина выгоревшей массы при воздействии единичного лазерного импульса в исходном образце в 1.4 раза выше, чем в деминерализованном.

Бóльшие значения выгоревшей массы исходного образца относительно деминерализованного бурого угля при одинаковой поглощенной дозе лазерного излучения однозначно свидетельствуют о том, что скорость горения выше в образцах с бóльшим содержанием минеральных включений.

Этот результат можно объяснить следующим образом. При поглощении энергии лазерных импульсов микрочастицами угля происходит их нагревание и инициирование термохимических реакций в органической части макромолекулы угля. Это приводит к зажиганию и горению частиц в окислительной среде.

Из результатов данной работы следует, что термохимические реакции инициируются в том числе в окрестности минеральных включений, давая вклад в выгорание угольной массы. Чем выше зольность, тем бóльший вклад в выгорание вносят термохимические реакции, инициированные в окрестности минеральных включений. Таким образом, минеральные включения в целом оказывают каталитическое влияние на выгорание угольной массы при использовании лазерного зажигания.

В следующей серии экспериментов для качественной иллюстрации влияния минеральных включений на выгорание образцов углей с использованием лазерного зажигания были сделаны микрофотографии исходного и деминерализованного образцов с помощью электронного микроскопа.

На рис. 1 приведены СЭМ-микрофотографии поверхности исходного и деминерализованного образцов в режиме регистрации обратно рассеянных электронов до облучения лазерными импульсами и те же микрофотографии, получен-

ТАБЛИЦА 1

Технический анализ бурого угля

Образец	Технический анализ, %		
	W^a	A^d	V^{daf}
Исходный (до деминерализации)	11.8	10.1	53.1
Деминерализованный	8.5	0.5	50.8

Примечание. W^a – массовая доля влаги в аналитической пробе; A^d – зольность сухого состояния пробы; V^{daf} – выход летучих веществ в сухом беззольном состоянии пробы.

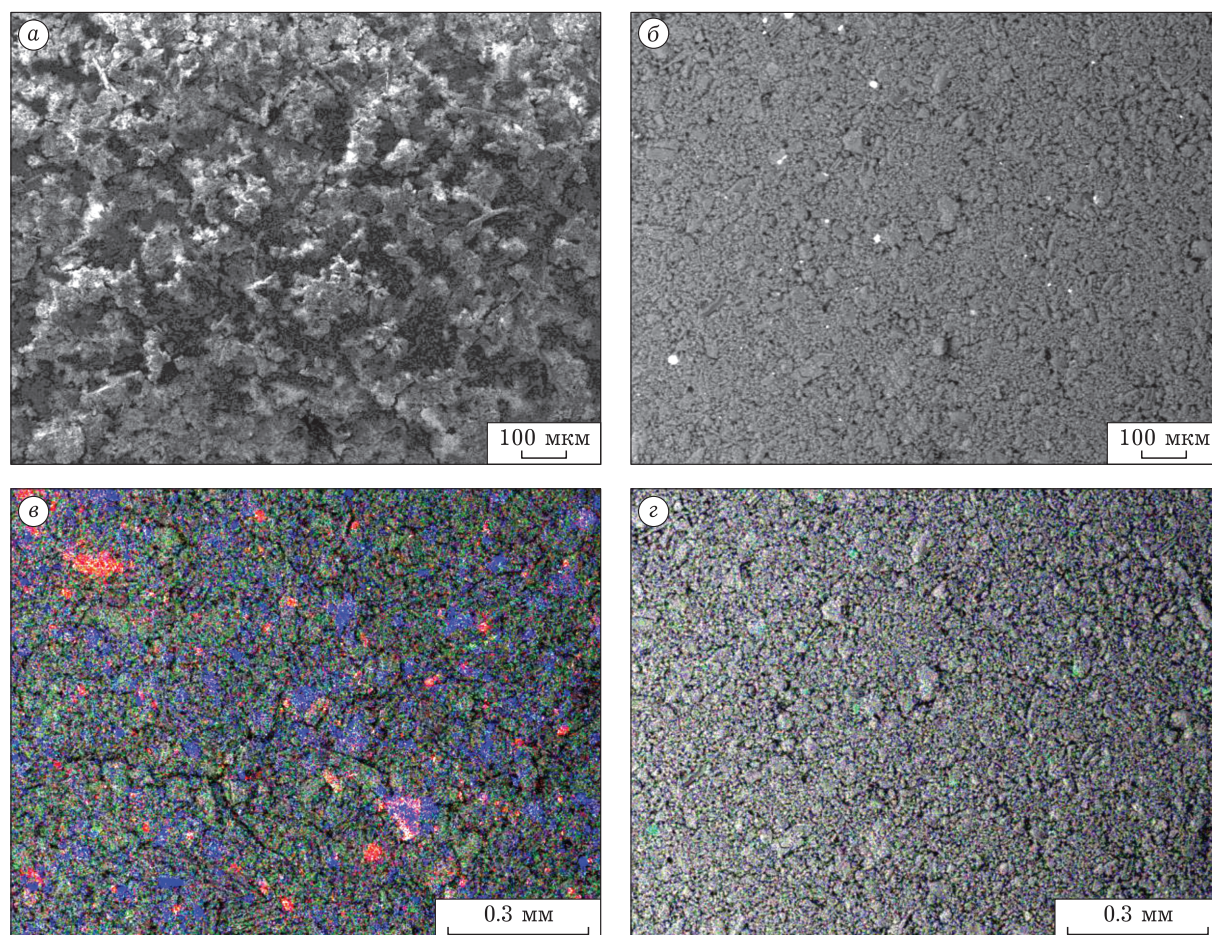


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности исходного (а, в) и деминерализованного (б, г) образцов до облучения лазерными импульсами, полученные: а, б – в режиме регистрации обратно рассеянных электронов; в, г – в характеристическом рентгеновском излучении. Здесь и в рис. 2–5: зеленый цвет – кальций, красный – железо, синий – кремний.

ные в характеристическом рентгеновском излучении. Анализ химического состава минеральных элементов в исходных образцах показывает наибольшее присутствие Si, Ca, Al, Fe. В деминерализованных образцах преобладают включения Ca в небольшой концентрации (табл. 2). Результаты химического анализа качественно коррелируют с данными СЭМ-исследований (см. рис. 1). На микрофотографиях отсутствует фиксация свечения алюминия по техническим причинам. Рентгенофлуоресцентная приставка позволяет фотографировать свечение не более трех элементов одновременно.

На рис. 2 представлены микрофотографии исходных и деминерализованных образцов после облучения. В исходных образцах выделяются темные области, связанные с неравномерным выгоранием органической массы угольных частиц по глубине (см. рис. 2, а). В деминерализованных образцах выгорание поверхности образ-

ца относительно равномерное (см. рис. 2, б). На поверхности исходных образцов наблюдаются частицы соединений Ca, Fe, Si (см. рис. 2, в). На поверхности деминерализованных образцов

ТАБЛИЦА 2

Сравнительное содержание золообразующих компонентов в пересчете на общую массу исходного и деминерализованного бурого угля

Компонент золы	Содержание, мас. %	
	Исходный бурый уголь	Деминерализованный бурый уголь
Si	2.36 ± 0.03	0.052 ± 0.001
Al	0.93 ± 0.02	0.044 ± 0.003
Ca	1.31 ± 0.05	0.14 ± 0.01
Fe	0.32 ± 0.01	0.013 ± 0.002
K	0.067 ± 0.005	0.0017 ± 0.0003
Mg	0.15 ± 0.01	0.0043 ± 0.0003
Mn	0.0037 ± 0.0003	0.00010 ± 0.00004
S	0.16 ± 0.01	0.026 ± 0.003
Ti	0.10 ± 0.02	0.0061 ± 0.0002

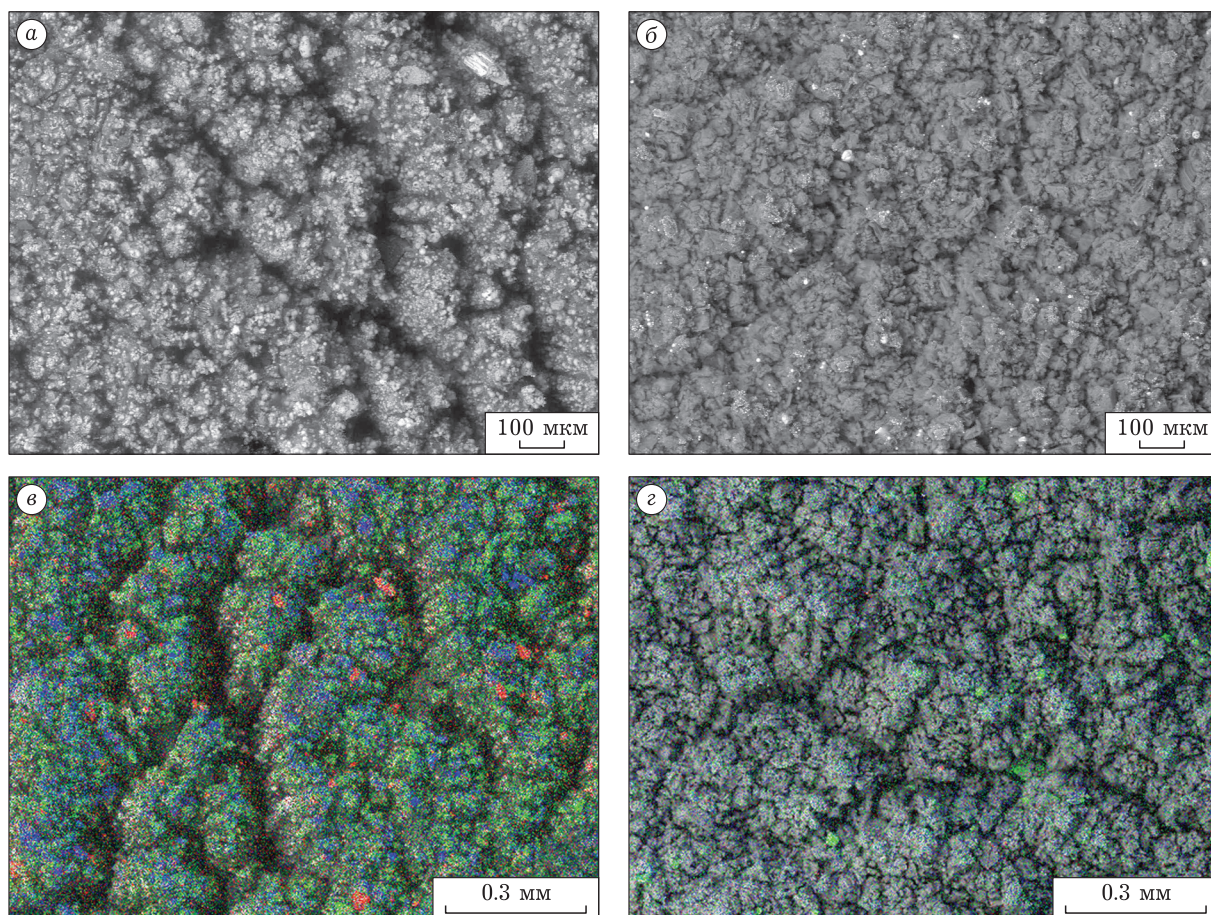


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности исходного (а, в) и деминерализованного (б, г) образцов после облучения лазерными импульсами, полученные: а, б – в режиме регистрации обратно рассеянных электронов; в, г – в характеристическом рентгеновском излучении. Обозн. см. рис. 1.

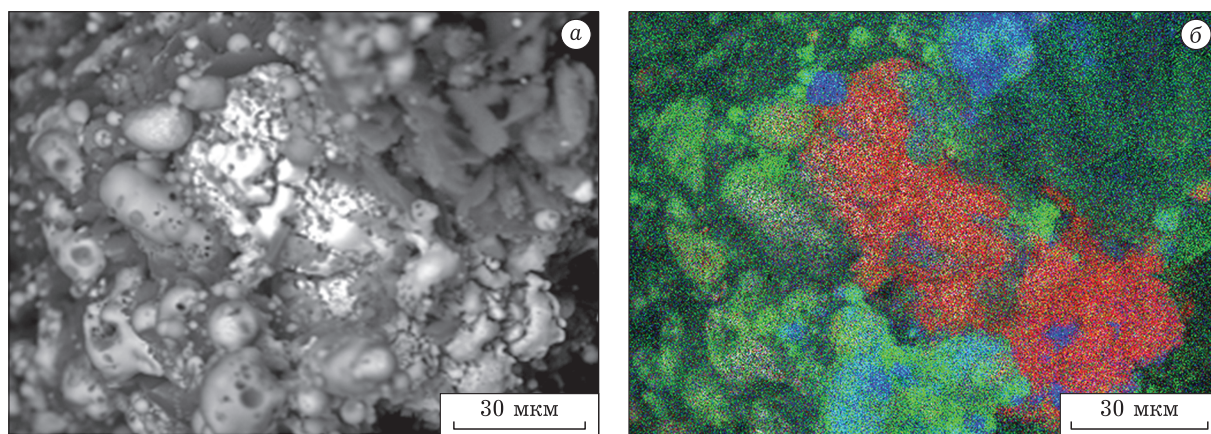


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности исходного образца после облучения (в увеличенном масштабе), полученные в режиме регистрации обратно рассеянных электронов (а) и в характеристическом рентгеновском излучении (б). Обозн. см. рис. 1.

видны отдельные вкрапления соединений Са, как и на образцах до облучения (см. рис. 2, г).

Микрофотографии исходного образца после облучения, полученные в режиме регистрации

обратно рассеянных электронов (рис. 3, а) и характеристического рентгеновского излучения (см. рис. 3, б), приведены в увеличенном масштабе. Форма капель на поверхности свидетель-

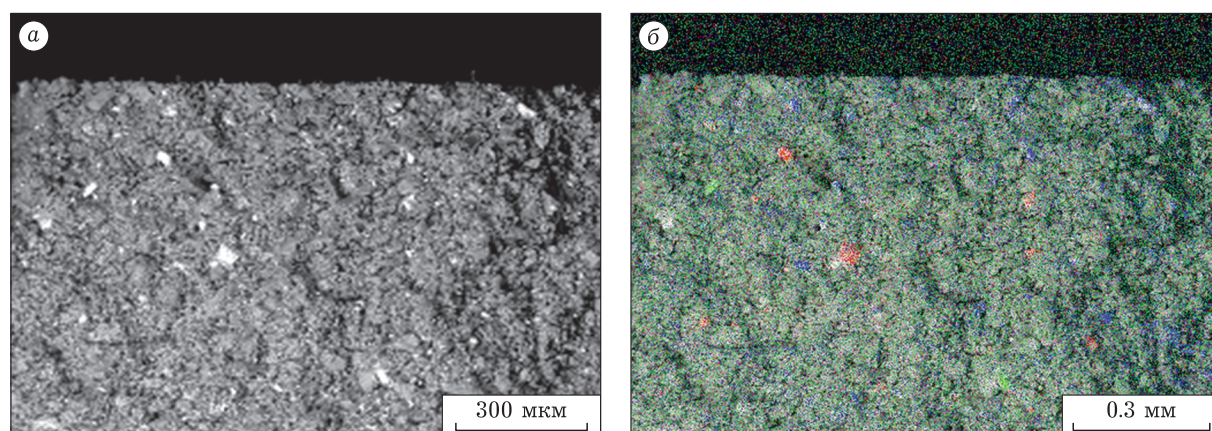


Рис. 4. Микрофотографии поперечного скола исходного образца до облучения, полученные в режиме регистрации обратно рассеянных электронов (а) и в характеристическом рентгеновском излучении (б) образца. Обозн. см. рис. 1.

ствует о том, что во время горения минеральные соединения плавятся, принимая квазисферическую или эллипсоидную форму. В составе минеральных включений в исследуемой марке угля находятся алюмосиликаты, корунд (Al_2O_3), кварц (SiO_2), синдерит [18]. Последний при нагревании разлагается с образованием FeO и CO_2 . Алюмосиликаты плавятся при $T \leq 1750$ К. Самыми высокими температурами плавления характеризуются оксиды минеральных включений. Температуры плавления для SiO_2 , FeO , CaO и Al_2O_3 составляют 2003, 1838, 2873 и 2330 К соответственно [16]. Отсюда следует, что температура на поверхности во время зажигания лазерными импульсами может достигать ~3000 К. Это находится в соответствии с нашими измерениями поверхностной температуры методом оптической пирометрии при зажигании микрочастиц бурого угля лазерными импульсами, где получено значение 3200 К [12].

В следующей серии экспериментов сделаны микрофотографии поперечного скола таблеток исходного и деминерализованного образцов. На рис. 4, а представлена микрофотография поперечного скола исходного образца, сделанная в режиме обратно рассеянных электронов. На изображении, полученном в рентгеновских лучах (см. рис. 4, б), наблюдаются в небольшом количестве вкрапления соединений Fe, Si и Ca микронных размеров и фон органически связанного Ca субмикронных размеров.

На рис. 5 изображены морфологические особенности поперечного скола образцов после облучения лазерными импульсами. На микрофотографиях в обратно рассеянных электронах (см. рис. 5, а) видно, что в исходных образцах присутствуют выгоревшие каналы глубиной от

50 до 200 мкм, вокруг которых сосредоточена минеральная фаза. В деминерализованных образцах каналы практически отсутствуют, и выгорание образца с поверхности происходит равномерно (см. рис. 5, б). На снимках, сделанных с помощью характеристического рентгеновского излучения (см. рис. 5, в), можно видеть, что минеральная фаза вокруг выгоревших каналов связана с Ca, также присутствуют вкрапления Fe и Si. На деминерализованных образцах минеральную фазу можно наблюдать только на поверхности (см. рис. 5, г).

Ранее экспериментально было показано [19], что щелочные и щелочноземельные металлы в низкосортных углях существуют в виде диспергированных органически связанных катионов или в виде дискретных минералов. Дискретные минералы размером ≥ 1 мкм авторы фиксировали с помощью просвечивающего электронного микроскопа, органически связанные катионы металлов выделяли химическим путем. Оказалось, что по элементному составу диспергированная часть сравнима с минеральной частью, а по некоторым элементам в диспергированной части концентрация даже выше [19]. Подобные результаты были получены и в данной работе на изучаемых образцах угля.

В [20] проводился анализ состояния кальция и магния в бурых углях Канско-Ачинского бассейна и сделан вывод, что значительная часть ионов кальция связана с органической массой. В [21] изучался состав бурого угля Кайчакского месторождения методом рентгеноструктурного анализа. В минеральной части обнаружены алюмосиликаты, корунд, кварц и сидерит. Показано, что большая часть кальция присутствует в органической массе угля в виде аморфной фазы.

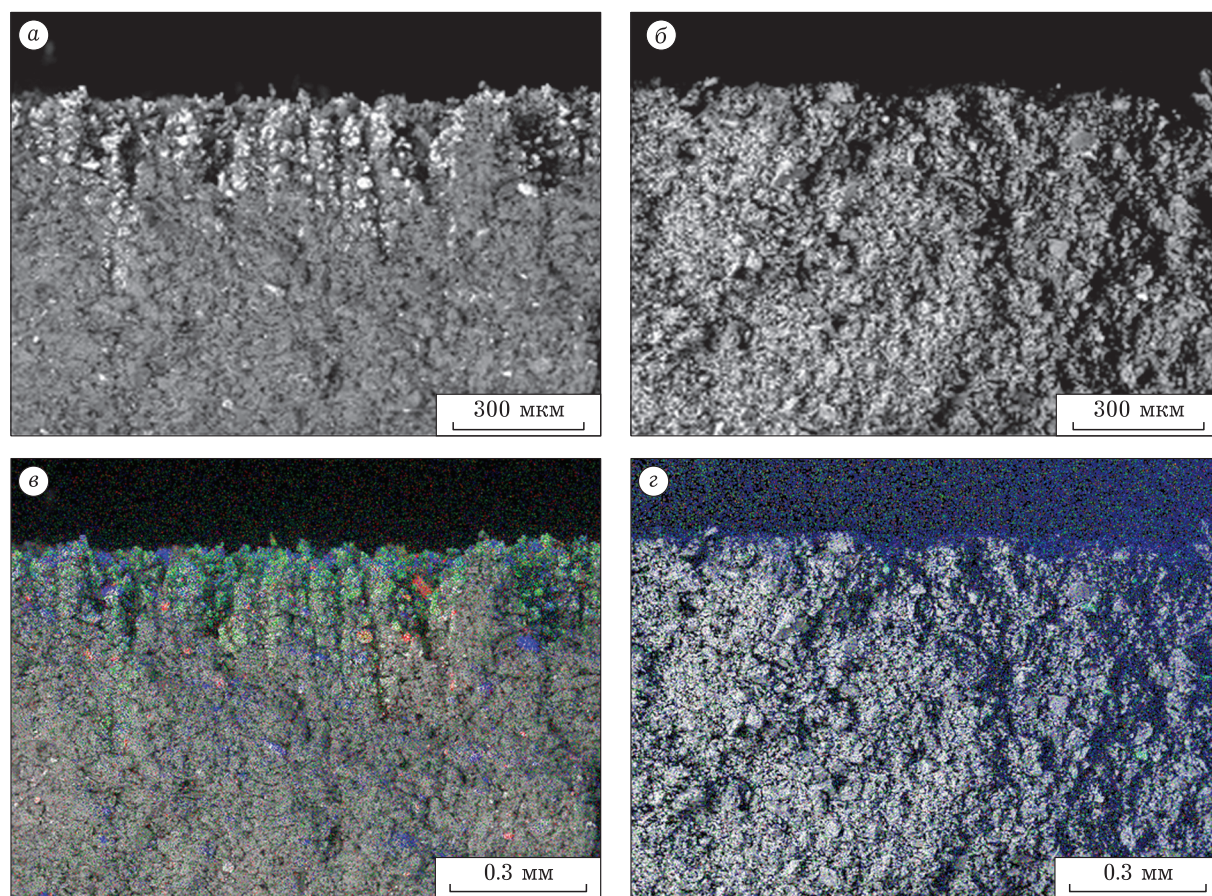


Рис. 5. Микрофотографии поперечного скола исходного (а, в) и деминерализованного (б, г) образцов после облучения лазерными импульсами, полученные: а, б – в режиме регистрации обратно рассеянных электронов; в, г – в характеристическом рентгеновском излучении. Обозн. см. рис. 1.

Железо и алюминий частично находятся в форме органоминеральных соединений в минеральных включениях. Внешний минеральный состав представлен кварцем и глинистыми минералами [21].

В процессах конверсии угля важную роль играют именно органически связанные катионы щелочных и щелочноземельных металлов [19]. При изучении влияния минеральных включений на процесс пиролиза и газификации производится пропитка углей растворами солей металлов именно для введения органически связанных катионов [7, 22, 23].

Картина распределения элементов на поверхности поперечного скола исходного образца (см. рис. 4, б) хорошо согласуется с результатами [20, 21]. Сплошная зеленая окраска означает, что ионы кальция являются органически связанными, а не входят в состав дискретных минеральных частиц, которые можно фиксировать с помощью электронного микроскопа. При нагреве образцов лазерным излучением органи-

чески связанные катионы металлов оказывают каталитическое влияние на инициирование реакций горения в органической части угля. Наибольшее влияние оказывают катионы Са, которые катализируют выгорание не только на поверхности, но и в глубине нагретого образца. При этом образуются выгоревшие каналы, а минеральная часть выделяется в виде отдельной фазы (включения синего и красного цвета – соединения Si и Fe соответственно), которая регистрируется с помощью электронного микроскопа (см. рис. 5, в и г).

С нашей точки зрения, полученные в работе результаты можно применять и при традиционных методах сжигания, учитывая каталитическое влияние металлических включений на скорость выгорания топлива. Кроме того, полученная информация об увеличении скорости горения с ростом зольности углей будет использоваться в дальнейших исследованиях при разработке метода лазерного зажигания угольного топлива без применения мазута.

ВЫВОДЫ

1. При воздействии одинаковой дозой лазерного излучения на образцы бурого угля с разной зольностью величина выгоревшей массы больше у образцов с большим значением зольности. Этот результат следует учитывать в практических приложениях как фактор, увеличивающий скорость горения.

2. Минеральная часть угольных частиц в виде органически связанных катионов оказывает каталитическое влияние на инициирование термохимических реакций, приводящих к зажиганию органической части макромолекул угля.

3. В результате термохимических реакций в окрестности органически связанных катионов происходит выгорание органической части молекул и выделение фазы минеральных включений. Температура горения ~3000 К, что приводит к плавлению минеральной фазы.

4. Наибольшее влияние на инициирование термохимических реакций оказывают соединения кальция, которые катализируют выгорание в глубине нагретого образца, образуя выгоревшие каналы с включениями минеральной фазы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филиппенко Ю. Н., Рудавина Е. В., Чернявский Н. В. Влияние зольности на теплоту сгорания, выход летучих и содержание серы в энергетических углях Украины // *Соврем. наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. 2010. № 1 (3). С. 44–47.
2. Алехнович А. Н. Влияние минеральной части на показатели и характеристики энергетических углей // *Энергетик*. 2008. № 3. С. 8–12.
3. Li C.-Z. Some recent advances in the understanding of the pyrolysis and gasification behaviour of Victorian brown coal // *Fuel*. 2007. Vol. 86, No. 12–13. P. 1664–1683.
4. Samaras P., Diamadopoulos E., Sakellariopoulos G. P. The effect of mineral matter and pyrolysis conditions on the gasification of Greek lignite by carbon dioxide // *Fuel*. 1996. Vol. 75, No. 9. P. 1108–1114.
5. Dolgaev S. I., Lavrishev S. V., Lyalin A. A., Simakin A. V., Voronov V. V., Shafeev G. A. Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids // *Appl. Phys. A*. 2001. Vol. 73, No. 2. P. 177–181.
6. Young J. F., Sipe J. E., van Driel H. M. Laser-induced periodic surface structure. III. Fluence regimes, the role of feedback, and details of the induced topography in germanium // *Phys. Rev. B: Condens. Matter*. 1984. Vol. 30, No. 4. P. 2001–2015.
7. Tomków K., Siemienińska T., Jankowska A., Broniek E., Jasieńko M. Capillary structure and reactivity of chars from brown coal humic acids containing Ca, Fe, Mn and Na // *Fuel*. 1986. Vol. 65, No. 10. P. 1423–1428.

8. Villasenor R., Garcia F. An experimental study of the effects of asphaltene on heavy fuel oil droplet combustion // *Fuel*. 1999. Vol. 78, No. 8. P. 933–944.
9. Navarrete B., Vilches L. F., Cañadas L., Salvador L. Influence of start-ups with fuel-oil on the operation of electrostatic precipitators in pulverised coal boilers // *Environ. Prog.* 2004. Vol. 23, No. 1. P. 29–38.
10. Kraft Ya. V., Nurmukhametov D. R., Aduiev B. P., Sozinov S. A., Ismagilov Z. R. The formation of quasiperiodic microstructures on the surface of a coal sample under the action of laser radiation // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2021. Т. 29, № 2. С. 211–217.
11. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Ковалев Р. Ю., Крафт Я. В., Заостровский А. Н., Гудилин А. В., Исмагилов З. Р. Спектрально-кинетические характеристики лазерного зажигания пылевидного бурого угля // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125, № 2. С. 277–283.
12. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Крафт Я. В., Исмагилов З. Р. Начальные стадии зажигания микрочастиц углей различных марок лазерными импульсами // *Хим. физика*. 2022. Т. 41, № 3. С. 13–21.
13. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Крафт Я. В., Исмагилов З. Р. Зажигание каменных углей различных стадий метаморфизма лазерными импульсами в режиме свободной генерации // *Оптика и спектроскопия*. 2020. Т. 128, № 3. С. 442–448.
14. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Крафт Я. В., Исмагилов З. Р. Энергетические характеристики зажигания и кинетика свечения пламен дисперсных частиц углей различных стадий метаморфизма при воздействии лазерных импульсов // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2020. Т. 28, № 6. С. 535–543.
15. Aduiev B. P., Kraft Y. V., Nurmukhametov D. R., Ismagilov Z. R. A study on the ignition of different metamorphic grade coal particles by microsecond laser pulses in the free-running mode // *Combust. Sci. Technol.* 2024. Vol. 196, No. 2. P. 274–288.
16. Zhu J., Ouyang Z., Lu Q. An experimental study on NO_x emissions in combustion of pulverized coal preheated in a circulating fluidized bed // *Energy Fuels*. 2013. Vol. 27, No. 12. P. 7724–7729.
17. Мессерле В. Е., Устименко А. Б., Карпенко Ю. Е., Чернецкий М. Ю., Дектерев А. А., Филимонов С. А. Моделирование и натурные испытания вихревых плазменно-топливных систем для воспламенения высокзольного энергетического угля // *Теплоэнергетика*. 2015. Т. 62, № 6. С. 58–68.
18. CRC Handbook of Chemistry and Physics / D. R. Lide (Ed.). 84th ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. 2616 p.
19. Matsuoka K., Yamashita T., Kuramoto K., Suzuki Y., Takaya A., Tomita A. Transformation of alkali and alkaline earth metals in low rank coal during gasification // *Fuel*. 2008. Vol. 87, No. 6. P. 885–893.
20. Исхаков Х. А., Колосова М. М. Состояние кальция и магния в канско-ачинских углях // *Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та*. 2006. № 4 (55). С. 109–111.
21. Исмагилов З. Р., Шибабудинов А. К., Пресняков В. В., Идрисов М. Р., Храмов А. А., Уразайкин А. С., Попова А. Н., Созинов С. А., Вотолин К. С. Сравнительное исследование отечественных углей и разработка угольных добавок в технологии комбинированного термогидрокрекинга гудрона. Ч. 4. Изучение фазового состава

- углей методом рентгеновской дифракции // Кокс и химия. 2023. Т. 66, № 10. С. 6–10.
22. Wang W., Lemaire R., Bensakhria A., Luat D. Review on the catalytic effects of alkali and alkaline earth metals (AAEMs) including sodium, potassium, calcium and magnesium on the pyrolysis of lignocellulosic biomass and on the co-pyrolysis of coal with biomass // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2022. Vol. 163. Art. 105479.
23. Kyotani T., Karasawa S., Tomita A. A TPD study of coal chars in relation to the catalysis of mineral matter // Fuel. 1986. Vol. 65, No. 10. P. 1466–1469.

Поступила в редакцию 27.02.2024

Одобрена после рецензирования 22.07.2024

Принята к публикации 30.08.2024