

УДК 541.18.052; 672.81.05

doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-24-32

Анализ влияния режимных параметров процесса высокотемпературной химической активации на конструкционный материал оборудования

А.А. Попова, И.Н. Шубин

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Analysis of the Effect of Regime Parameters of High-Temperature Chemical Activation Process on the Structural Material of the Equipment

A.A. Popova, I.N. Shubin

Tambov State Technical University

Проведены экспериментальные исследования по определению факторов воздействия высокотемпературной химической активации на конструкционный материал лабораторного реактора, выполненного из стали 09Г2С. Диагностика воздействий выполнена с помощью металлографической микроскопии, а также рентгенофлуоресцентной спектроскопии по содержанию калия. Установлено наличие очаговой коррозии по всей внешней поверхности реактора на глубину до 0,15 мм, вызванной предположительно водородной и карбонильной коррозиями, а также ее отсутствие на внутренней поверхности. Снаружи и внутри реактора также наблюдалось насыщение поверхностного слоя калием на глубину более 0,34 мм вследствие диффузионных и коррозионных процессов. Предложены технологические и конструктивные решения по снижению неблагоприятных факторов воздействия процесса химической активации на конструкционный материал.

Ключевые слова: технологическое оборудование, реактор активации, газовая коррозия, химическая активация, конструкционный материал

The article describes the experimental studies carried out to determine the impact factors of high-temperature chemical activation on the structural material of a laboratory reactor made of steel 09G2S. The impacts were diagnosed using metallographic microscopy, as well as X-ray fluorescence spectroscopy by potassium content. The presence of local corrosion was found over the entire outer surface of the reactor to a depth of 0.15 mm, presumably caused by hydrogen and carbonyl corrosion, but there was no corrosion on the inner surface. Besides, saturation of the surface layer with potassium to a depth of more than 0.34 mm due to diffusion and corrosion processes was observed outside and inside the reactor. Technological and constructive measures are proposed to reduce the impact factors of the chemical activation process on the structural material.

Keywords: processing equipment, activation reactor, gas corrosion, chemical activation, structural material

Высокопроизводительные технологические процессы, отвечающие современным требованиям, характеризуются большой нагруженно-

стью и интенсивностью. Результативность таких процессов оценивают по качеству целевого продукта, экологической безопасности и эко-

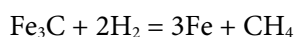
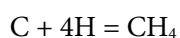
номической целесообразности. Безопасность процесса обеспечивают использованием типовых технологических и прочностных расчетов, подбором конструкционных материалов и т. д.

Вместе с тем при разработке и совершенствовании многих технологических процессов классические подходы к определению режимных и конструктивных параметров оборудования могут быть затруднены. Это связано со сложностью протекающих процессов, температурными режимами и применяемыми веществами [1, 2].

Один из таких процессов — высокотемпературная химическая активация углеродного сырья щелочью в инертной среде для получения высокопористого углеродного материала. Она характеризуется значительной продолжительностью рабочего процесса (6...7 ч), широким высокотемпературным диапазоном (400...900 °С), неоднократным фазовым переходом активируемого материала (дисперсный сыпучий материал — суспензия — тонкодисперсный сыпучий материал), небольшим повышенным давлением и наличием агрессивной газовой среды (водород, углекислый газ, металлический калий и т. д.) [3–7].

При этом на применяемый в оборудовании конструкционный материал будут воздействовать неблагоприятные факторы. Анализ литературных источников с учетом особенностей химической активации углеродного сырья щелочью в инертной среде позволил выявить такой неблагоприятный фактор, как газовая коррозия, а именно водородную коррозию, обезуглероживание стали и карбонильную коррозию. [8, 9].

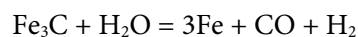
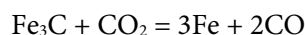
Водородная коррозия возникает преимущественно в технологических средах, содержащих водород, под действием повышенных температуры и давления. Этот вид коррозионного разрушения происходит вследствие химического взаимодействия водородной среды и карбидной составляющей стали. При повышенных значениях температуры и давления водород, попадая на поверхность стального изделия, диссоциирует. Некоторая часть атомов водорода вступает в реакцию с углеродом или восстанавливает цементит:



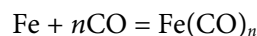
Обезуглероживание стали — процесс обеднения поверхностного слоя металла углеродом,

протекающий при температуре более 650 °С после появления пленки оксидов на поверхности металла. Чаще всего этот процесс происходит в окислительных атмосферах (O₂, H₂O, CO₂). Кислород сначала окисляет углерод, а затем — железо.

Обезуглероживание стали проходит интенсивнее с увеличением в газовой среде содержания углекислого газа, влаги и кислорода. Восстановление цементита Fe₃C является основой процесса обезуглероживания стали:



Карбонильная коррозия часто наблюдается в технологических средах, когда при повышенных давлении и температуре протекают процессы с участием углерода. При нормальных давлении и температуре оксид углерода СО к металлам инертен, но при их увеличении оксид углерода СО активно реагирует с большинством металлов. В результате такого взаимодействия образуются карбонилы. Например, процесс образования карбонила железа описывается реакцией



Анализ работ по изучению взаимодействия промышленных сталей с водородом показал, что при физико-химическом воздействии водорода на металл в нем происходят необратимые изменения микроструктуры [10–12].

Некоторые труды посвящены определению влияния поражающих факторов коррозии при ускоренном высоконагруженном воздействии на контрольные образцы. При этом, как правило, рассматривают диапазоны температуры 280...620 °С и давления 2...20 МПа. Как вариант — анализируют реально отработавшие образцы с общей наработкой несколько тысяч часов [13, 14].

Несмотря на существование большого числа публикаций по изучению влияния газовой коррозии на свойства сталей, специфичность ее протекания в металле при различных условиях его эксплуатации не позволяет дать однозначные ответы на ряд вопросов относительно физической природы и механизмов воздействия отдельных агрессивных компонентов на служебные свойства сталей.

Однако эти исследования не в полной мере отвечают условиям рассматриваемого технологического процесса химической активации [15].

Обычно рассматривают промышленно реализуемый процесс и оборудование, либо опытные образцы. При этом отсутствуют данные об исследовании лабораторного оборудования, которое, как правило, используют в максимально тяжелых и нагруженных режимах.

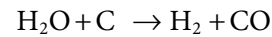
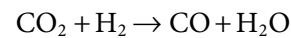
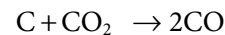
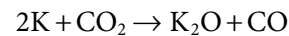
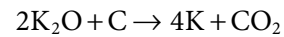
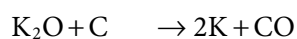
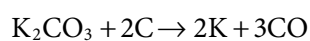
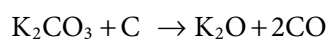
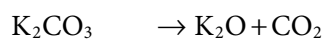
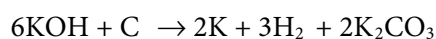
В связи с этим исследование воздействия режимов химической активации на конструкционный материал лабораторного оборудования является актуальным с точки зрения прогнозирования свойств и оценки ресурса безопасной эксплуатации. Причем наибольший практический интерес представляют исследования, результаты которых позволяют экстраполировать их при реальном аппаратурно-технологическом оформлении процесса реализации высокотемпературной химической активации.

Цель работы — изучение и оценка факторов воздействия режимных параметров химической активации углеродного сырья на конструкционный материал (сталь 09Г2С) лабораторного реактора для определения возможности безопасной эксплуатации при реализации процесса получения активированного углеродного материала.

Объекты и методы исследования. Проведено исследование влияния технологических факторов химической активации на конструктивные элементы оборудования, выполненные из стали 09Г2С, наиболее распространенной в химическом машиностроении.

Самым нагруженным элементом оборудования является лабораторный реактор, что связано с наличием в нем крайне агрессивной рабочей среды, создаваемой одним из компонентов реакционной активируемой смеси — щелочи (гидроксидом калия КОН). Эта смесь, взаимодействуя с углеродным сырьем, разлагается с выделением металлического калия, водорода и углекислого газа, причем данный процесс протекает при высокой температуре.

В несколько упрощенном виде этот процесс можно представить следующей совокупностью реакций:



В связи с этим возможно протекание ускоренной коррозии (в первую очередь водородной и карбонильной), приводящей к обезуглероживанию поверхностного слоя, постепенному повреждению внутренних слоев и, как следствие, к потере прочностных характеристик конструкционного материала [10–14].

Высокотемпературная химическая активация углеродного сырья щелочью в инертной среде проведена в лабораторном реакторе 3 экспериментальной установки (рис. 1). Эта установка состоит из муфельной печи 5, размещенной в вытяжном шкафу 6, в которой установлены лабораторный реактор и системы подачи инертного газа.

На рис. 2, а показан внешний вид корпуса лабораторного реактора после проведения 40 активаций (общее время термического воздействия более 210 ч), из которых наработка составила 40 и 100 ч при температуре 400 и 600...900 °С (преимущественно 750 °С) соответственно при подаче инертного газа объемом 0,5...2,0 л/ч во внутренний объем реактора [1].

Корпус реактора разделили на четыре условных участка, в зависимости от протекающих в них процессов (рис. 2, б):

1 — участок обечайки, контактирующий только с газовой составляющей рабочей среды, с небольшим избыточным давлением газовой среды;

2 — участок обечайки, полностью свободный от сыпучей фракции, в основном от жидкой

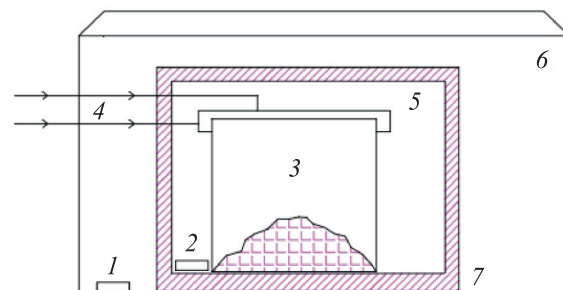


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 2 — места размещения контрольных образцов; 3 — лабораторный реактор; 4 — патрубки подачи инертного газа в реактор и газовый шлюз; 5 — муфельная печь; 6 — вытяжной шкаф; 7 — футеровка печи

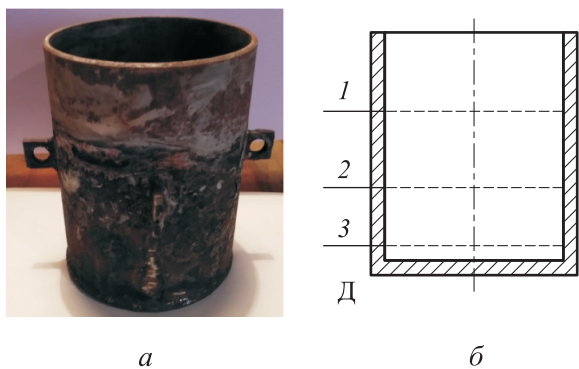


Рис. 2. Внешний вид корпуса лабораторного реактора после проведения 40 активаций (а) и схема его деления на условные участки (б)

(возможно попадание капель) и открытый для взаимодействия с газовой средой (в том числе насыщенной, так как расположен непосредственно над реакционным расплавом);

3 — участок обечайки, частично покрытый сыпучим материалом/суспензией и контактирующий с газовой реакционной средой;

Д — днище реактора — участок корпуса, всегда покрытый дисперсным сыпучим материалом или суспензией (смесь/раствор КОН с углеродным сырьем).

Высота участка Д — 15 мм, остальных участков — 25 мм.

Образцы вырезали из участков реактора, а также из контрольных пластин (для сравнения). Контрольный образец № 1 помещали в печь рядом с реактором на одну активацию, контрольный образец № 2 — рядом с печью в вытяжном шкафу.

Анализ состояния поверхности образцов проводили в два этапа. На первом с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40 MAT (с разрешением до 100 мкм) искали участки, пораженные коррозией, и определяли их параметры.

На втором этапе выполняли диагностику образцов методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL QUANT по содержанию основной примеси — калия, заполняющего пустоты и трещины, образованные коррозионным разрушением металла, т. е. по диффузии калия в поверхностный слой материала реактора.

Несмотря на то, что второй этап лишь косвенно может указывать на объем и масштабы коррозии, в рассматриваемом случае он являлся достаточным и корректным, так как целью

являлась оценка повреждений, а не полный анализ, выходящий за рамки основного исследования.

При этом полноценные исследования влияния технологического процесса химической активации на конструкционный материал требуют более серьезного подхода и диагностического обеспечения, что не всегда является возможным и доступным. Анализ результатов, полученных на каждом из этапов, проводили по нескольким образцам.

При исследовании приняли следующие допущения:

- изменения структуры стали, ее прочностные характеристики и последствия циклического температурного воздействия не учитываются;
- за некоторую нулевую точку по содержанию калия принято его количество в контрольных образцах после однократной активации, так как дальнейшая обработка образцов (шлифование) могла привести к некорректным и вводящим в заблуждение выводам.

Результаты исследования и их обсуждение.

Анализ результатов первого этапа исследования показал отсутствие коррозии на контрольных образцах № 1 и 2, несмотря на следы калия. На внешней поверхности образцов, вырезанных из реактора, имелась очаговая коррозия в виде раковин, на внутренней — видимые повреждения отсутствовали полностью (рис. 3).

Анализ результатов второго этапа исследования показал значительное содержание калия в образцах конструкционного материала, причем его содержание было крайне неравномерным по четырем участкам реактора (рис. 4).

Анализ распределения содержания калия по внутренней поверхности образцов показал, что наибольшая диффузия калия происходила на участках контакта с газовой средой. При этом вследствие особенностей отвода газовых потоков из реакционной зоны реактора (через зазор между его корпусом и крышкой) наблюдался некоторый застой и, соответственно, небольшое избыточное давление, которые способствовали более активной диффузии калия в структуру стали.

Отсутствие видимых следов коррозии на внутренней поверхности можно объяснить бескислородной средой внутри реактора и разбавлением реакционных газов до безопасных концентраций (рис. 5).

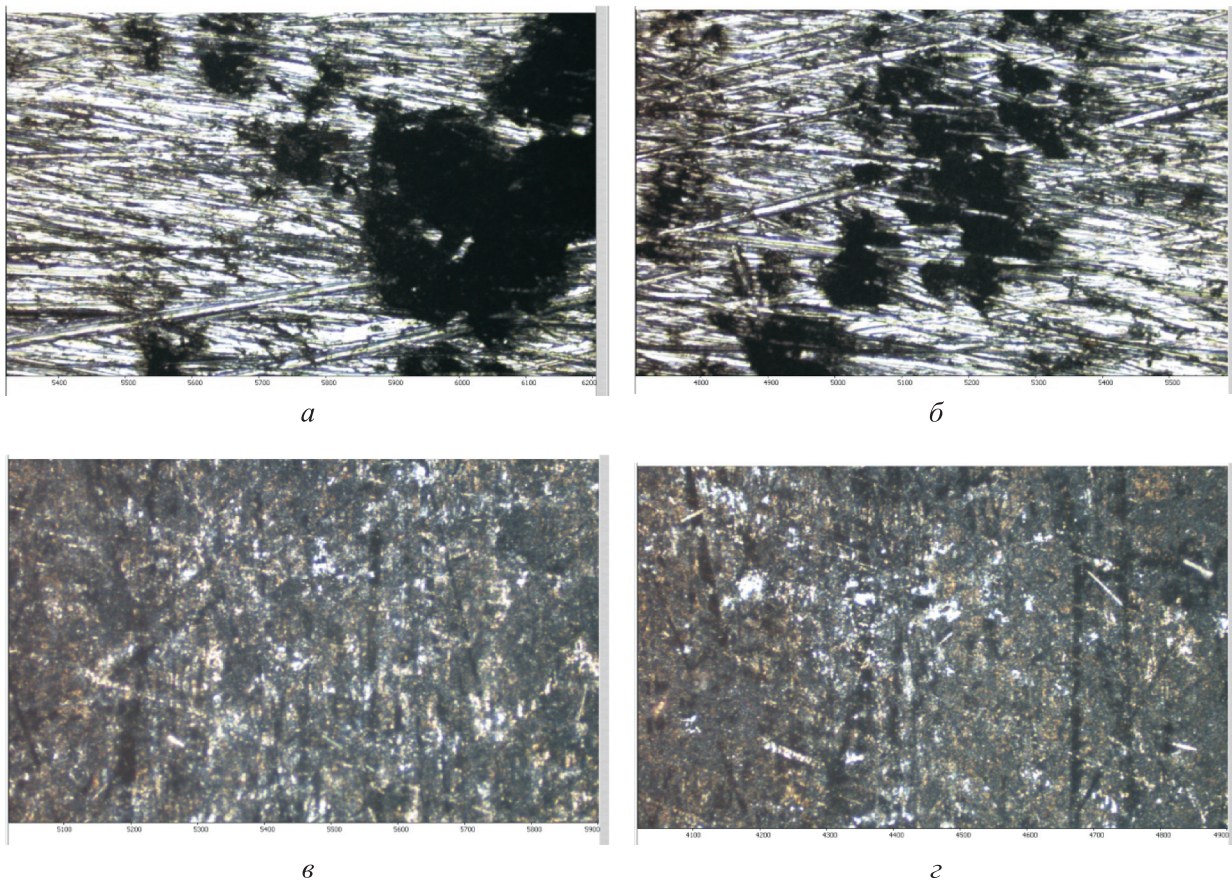


Рис. 3. Пример результатов диагностики с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40 MAT:
a, б — образцы, вырезанные из реактора, имеющие очаговую коррозию на внешней поверхности;
в, г — контрольные образцы без следов коррозии

Следы коррозии на внешней поверхности реактора позволили заключить, что истечение реакционных газов происходило вдоль его стенок, о чем свидетельствует изменение содержания калия в металле по участкам (см. рис. 4). Соответственно, можно предположить, что реакционные газы покидали внутренний

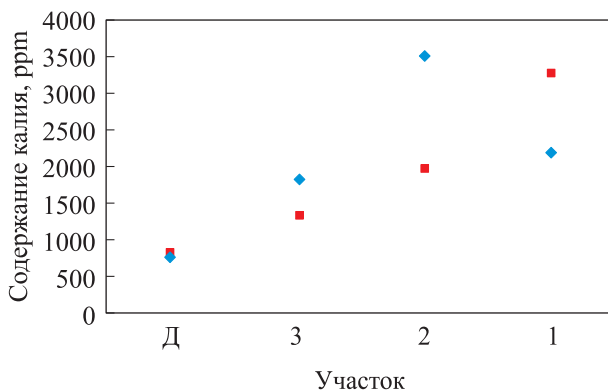


Рис. 4. Распределение содержания калия по внешней (♦) и внутренней (■) поверхностям образцов, вырезанных из участков реактора

объем реактора при некотором повышенном давлении.

Экстремум по содержанию калия на втором участке соответствует выходу газов из-под крышки в камеру муфельной печи, т. е. наблюдается контакт максимально насыщенной газовой фазы с поверхностью корпуса при высокой температуре в атмосфере, богатой кислородом.

Наличие же калия на внешней поверхности днища реактора можно объяснить тем, что футеровка муфельной печи на момент исследований уже была насыщена продуктами активации.

После первого шлифования образцов выявлено снижение содержания калия от 4 (на внутренней поверхности) до 10 раз (на внешней поверхности), после второго шлифования — в 3–4 раза относительно первого. В итоге содержание калия в образцах, вырезанных из реактора, и в контрольных образцах становится измеримым, причем видимых следов коррозии не обнаружено уже после первого шлифования.

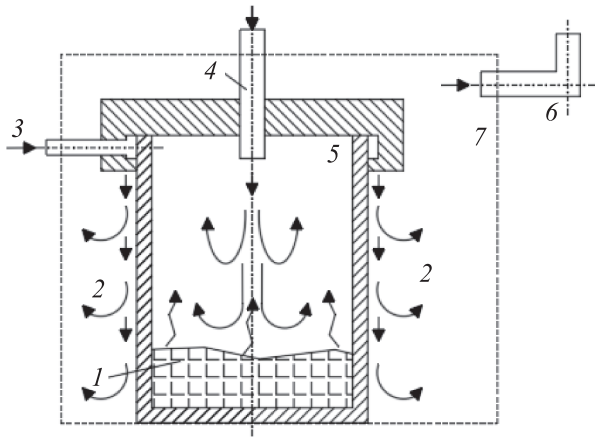


Рис. 5. Распределение газовых потоков в реакторе и камере муфельной печи

1 — реакционная смесь; 2 — истечение реакционных газов из реактора; 3 — подвод инертного газа в газовый шлюз; 4 — подвод инертного газа во внутренний объем реактора; 5 — зона максимального давления в объеме реактора; 6 — отвод реакционных газов; 7 — камера муфельной печи

Экспериментально установленная исходная толщина стенки реактора составляла 2,51...2,87 мм, ее среднее значение — 2,65 мм, толщина стенки после первого шлифования образцов — 2,43...2,58 мм, ее среднее значение — 2,50 мм, толщина стенки после второго шлифования — 2,12...2,39 мм, ее среднее значение — 2,31 мм (рис. 6). Измерения проводили с помощью штангенциркуля ШЦЦ-125-0,01 (с ценой деления 0,01 мм).

Анализ результатов исследования позволил заключить следующее:

- поражение видимой очаговой коррозией поверхности реактора наблюдалось на глубине до 0,15 мм, что соответствует слою, снятому при однократном шлифовании;

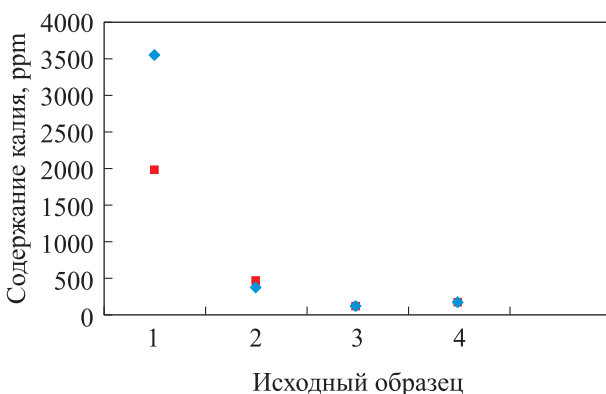


Рис. 6. Распределение содержания калия по внешней (■) и внутренней (◆) поверхностям образцов

- следы коррозии (типовые) присутствуют на всей внешней поверхности реактора и отсутствуют на внутренней;

- наиболее сильно содержание калия проявляется на участках газ — металл в зоне избыточного давления как снаружи, так и внутри реактора;

- помимо газовой коррозии выявлены диффузионные процессы насыщения поверхностного слоя стали калием.

Для снижения воздействия неблагоприятных факторов на конструкционный материал реактора предложены следующие технологические и конструктивные решения:

- отвод реакционных газов из печи для исключения поверхностной коррозии на внешней поверхности реактора;

- обеспечение достаточного объема инертного газа (аргона), разбавляющего наиболее агрессивные составляющие реакционных газов, и оптимизация его подачи (например, с помощью турбулизатора газового потока или перфорированного змеевика, позволяющих избежать образования застойных зон [1]) для предотвращения влияния коррозии на внутреннюю поверхность реактора;

- отвод реакционных газов для снижения давления в верхней части реакционной зоны и для исключения застойных областей; при этом необходимо учесть, что помимо инертного газа в результате проведения химической активации образуется дополнительный объем газов;

- подача водяного пара для формирования необходимой структуры активированного углеродного материала и уменьшения агрессивности газовой фазы.

Выводы

1. Определено влияние режимных параметров высокотемпературной химической активации на конструкционный материал лабораторного оборудования.

2. Установлено наличие газовой коррозии и диффузионного насыщения конструкционного материала одним из компонентов газовой фазы — калием. Определена глубина газовой коррозии. Выявлены наиболее проблемные участки оборудования.

3. Предложены технологические и конструктивные решения по снижению неблагоприятных факторов воздействия химической активации на технологическое оборудование, что по-

высит безопасность реализации процесса получения активированного углеродного материала.

4. Показана возможность применения стали 09Г2С в качестве материала реактора активации с учетом внедрения предложенных конструктивных и технологических решений. Ввиду недо-

статочности исследования диффузионного процесса и циклической температурной нагрузки рекомендовано оценивать скорость коррозии v конструкционного материала со следующей периодичностью: при $v > 0,1$ мм/год — 1,5...2,0 месяца, при $v < 0,1$ мм/год — 12 месяцев.

Литература

- [1] Попова А.А., Шубин И.Н. Исследование влияния технологических параметров на аппаратное оформление процесса производства активированного углеродного материала. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 1, с. 20–30, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2022-1-20-30>
- [2] Jiménez V., Sánchez P., Valverde J.L. et al. Influence of the activating agent and the inert gas (type and flow) used in an activation process for the porosity development of carbon nanofibers. *J. Colloid. Interface Sci.*, 2009, vol. 336, no. 2, pp. 712–722, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.04.017>
- [3] Lozano-Castello D., Calo J.M., Cazorla-Amoros D. et al. Carbon activation with KOH as explored by temperature programmed techniques, and the effects of hydrogen. *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 13, pp. 2529–2536, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.08.021>
- [4] Benaddi H., Badosz T.J., Jagiello J. et al. Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 5, pp. 669–674, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00134-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00134-7)
- [5] Suarez-Garcia F., Vilaplana-Ortego E., Kunowsky M. et al. Activation of polymer blend carbon nanofibres by alkaline hydroxides and their hydrogen storage performances. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2009, vol. 34, no. 22, pp. 9141–9150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.026>
- [6] Zheng Z., Gao Q. Hierarchical porous carbons prepared by an easy one-step carbonization and activation of phenol-formaldehyde resins with high performance for supercapacitors. *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, no. 3, pp. 1615–1619, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.010>
- [7] Teng H., Wang S.C. Preparation of porous carbons from phenol-formaldehyde resins with chemical and physical activation. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 6, pp. 817–824, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00160-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00160-8)
- [8] Арчаков Ю.И. *Водородная коррозия сталей*. Москва, Металлургия, 1985. 192 с.
- [9] Колачев Б.А. *Водородная хрупкость металлов*. Москва, Металлургия, 1985. 217 с.
- [10] Гуляев А.П. *Металловедение*. Москва, Металлургия, 1977. 647 с.
- [11] Кузюков А.Н., Нихаенко Ю.Я., Левченко В.А. и др. Влияние водорода на работоспособность химического и нефтехимического оборудования, изготовленного из углеродистых и низколегированных сталей. Водородная обработка материалов. *Тр. III Межд. конф. ВОМ-2001*. Донецк, 2001, с. 390–392.
- [12] Стасюк С.З., Терентьев В.П. Исследование влияния водорода на свойства низколегированной стали 09Г2С и стойкость карбидных фаз. *Проблемы прочности*, 2007, № 5, с. 31–43.
- [13] Березина Т.Г., Бугай Н.В., Трунин И.И. *Диагностирование и прогнозирование долговечности металла тепловых энергетических установок*. Киев, Техника, 1991. 120 с.
- [14] Горчаков Л.Н., Добротворский А.М., Романова Л.М. и др. Влияние давления водорода на механизм водородной коррозии углеродистой стали. *Химическая техника*, 2016, № 1, с. 16–19.
- [15] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis. *Advanced Materials and Technologies*, 2020, no. 3, pp. 28–32.

References

- [1] Popova A.A., Shubin I.N. Analysis of the factors affecting the instrumentation of the technological process of the activated carbon material production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

- zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 1, pp. 20–30, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2022-1-20-30> (in Russ.).
- [2] Jiménez V., Sánchez P., Valverde J.L. et al. Influence of the activating agent and the inert gas (type and flow) used in an activation process for the porosity development of carbon nanofibers. *J. Colloid. Interface Sci.*, 2009, vol. 336, no. 2, pp. 712–722, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.04.017>
- [3] Lozano-Castello D., Calo J.M., Cazorla-Amoros D. et al. Carbon activation with KOH as explored by temperature programmed techniques, and the effects of hydrogen. *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 13, pp. 2529–2536, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.08.021>
- [4] Benaddi H., Bandosz T.J., Jagiello J. et al. Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 5, pp. 669–674, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00134-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00134-7)
- [5] Suarez-Garcia F., Vilaplana-Ortego E., Kunowsky M. et al. Activation of polymer blend carbon nanofibres by alkaline hydroxides and their hydrogen storage performances. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2009, vol. 34, no. 22, pp. 9141–9150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.026>
- [6] Zheng Z., Gao Q. Hierarchical porous carbons prepared by an easy one-step carbonization and activation of phenol-formaldehyde resins with high performance for supercapacitors. *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, no. 3, pp. 1615–1619, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.010>
- [7] Teng H., Wang S.C. Preparation of porous carbons from phenol-formaldehyde resins with chemical and physical activation. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 6, pp. 817–824, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00160-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00160-8)
- [8] Archakov Yu.I. *Vodorodnaya korroziya staley* [Hydrogen corrosion of steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 192 p. (In Russ.).
- [9] Kolachev B.A. *Vodorodnaya khrupkost' metallov* [Hydrogen brittleness of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 217 p. (In Russ.).
- [10] Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metallurgical science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 647 p. (In Russ.).
- [11] Kuzyukov A.N., Nikhaenko Yu.Ya., Levchenko V.A. et al. [Effect of carbon on workability of chemical and petrochemical equipment made of carbon low-alloyed steels]. *Vodorodnaya obrabotka materialov. Tr. III Mezhd. konf. VOM-2001* [Hydrogen Processing of Metals. Proc. III Int. Conf. VOM-2001]. Donetsk, 2001, pp. 390–392. (In Russ.).
- [12] Stasyuk S.S., Terent'yev V.P. Study on effect of carbon on properties of 09G2S low-alloyed steel and carbide phase stability. *Problemy prochnosti*, 2007, no. 5, pp. 31–43. (In Russ.).
- [13] Berezina T.G., Bugay N.V., Trunin I.I. *Diagnostirovanie i prognozirovanie dolgovechnosti metalla teplovykh energeticheskikh ustanovok* [Diagnostics and forecasting of metal life duration for heat power plants]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991. 120 p. (In Russ.).
- [14] Gorchakov L.N., Dobrotvorskiy A.M., Romanova L.M. et al. Effect of carbon effect on hydrogen corrosion of carbon steel. *Khimicheskaya tekhnika*, 2016, no. 1, pp. 16–19. (In Russ.).
- [15] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis. *Advanced Materials and Technologies*, 2020, no. 3, pp. 28–32.

Статья поступила в редакцию 13.05.2022

Информация об авторах

ПОПОВА Алена Алексеевна — аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов». ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, Тамбов, Российская Федерация, ул. Советская, д. 106, e-mail: alyona.popova.93@list.ru).

ШУБИН Игорь Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов». ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, Тамбов, Российская Федерация, ул. Советская, д. 106, e-mail: i.shubin77@yandex.ru).

Information about the authors

POPOVA Alena Alekseevna — Postgraduate, Department of Equipment and Technology for the Production of Nanoproducs. Tambov State Technical University (392000, Tambov, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 106, e-mail: alyona.popova.93@list.ru).

SHUBIN Igor Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Equipment and Technology for the Production of Nanoproducs. Tambov State Technical University (392000, Tambov, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 106, e-mail: i.shubin77@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Попова А.А., Шубин И.Н. Анализ влияния режимных параметров процесса высокотемпературной химической активации на конструкционный материал оборудования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 8, с. 24–32, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-24-32

Please cite this article in English as:

Popova A.A., Shubin I.N. Analysis of the Effect of Regime Parameters of High-Temperature Chemical Activation Process on the Structural Material of the Equipment. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 8, pp. 24–32, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-24-32



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям монографию

«Оборудование для лазерной обработки»

Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров

В монографии рассмотрены инженерно-физические основы построения и функционирования технологических лазеров, применяемых в машиностроении. Даны классификация и описание принципов работы твердотельных и газовых лазеров, их характеристики, показаны особенности эксплуатации, современное состояние и перспективы развития. Большое внимание уделено оптическим системам технологических лазеров. Представлено оборудование для промышленной реализации основных процессов лазерной обработки, в том числе аддитивных лазерных технологий. Описаны методы и средства измерения параметров лазерного излучения.

Изложены вопросы лазерной безопасности и охраны труда.

Для инженерно-технических работников, занимающихся использованием технологических лазеров, а также для студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>