

2. Захаров, Ю.Е. Полезные вибрации в машиностроении / Ю.Е. Захаров, В.Т. Гарбузюк – Тула: Приокское кн. из-во, 1970. – 112 с.
3. Ахметшин, Н.И. Вибрационное резание металлов / Н.И. Ахметшин, Э.М.Гоц, Н.Ф. Родиков; под ред. К.М. Рагульскаса. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 80 с.
4. Богословский, Н.В. Кинематическое дробление стружки при точении труднообрабатываемых сталей / Н.В. Богословский, Т.И. Иващенко // Пути повышения эффективности обработки материалов резанием в машиностроении: материалы краткосроч. науч.-техн. семинара 13–14 мая / Общество «Знание»: под ред. Ю.М. Зубарева. – Л., 1991. – С. 47–48.
5. Данильчик, С.С. Кинематика точения с наложением асимметричных колебаний инструмента / С.С. Данильчик, В.К. Шелег // Наука и техника. 2013. – №4. – С. 16–21.
6. Шелег, В.К. Точность и шероховатость обработанных поверхностей при точении стали 45 с асимметричными колебаниями инструмента / В.К. Шелег, С.С. Данильчик // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / Белорус.нац. техн. ун-т; под ред. В.К. Шелега. Минск, 2017. – Вып. 30. – С. 188–194.

УДК 621.762.4.01

**КАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ КАТАЛИЗАТОРОВ  
ИЗ МЕХАНОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ  
ПОРОШКОВ AL-CU И AL-CU-FE**

**Евтухова, Т.Е., ст. преподаватель**  
*Белорусский национальный технический университет*  
*Минск, Республика Беларусь*

Аннотация:

Приведены результаты испытаний каталитической активности катализаторов, синтезированных в процессе гидратационного твердения из механохимически активированных порошков Al-Cu и Al-Cu-Fe.

Испытания каталитической активности катализаторов в виде гранул (таблеток), синтезированных в процессе гидратационного твердения из механохимически активированных порошков Al(13 мас.%) - Cu и Al-Cu-Fe (24-56-20мас.%), проводили в Институте катализа им. Борескова Г.К. СО РАН в реакции паровой конверсии монооксида углерода. Целью реакции паровой конверсии монооксида углерода является увеличение общего выхода водорода при его получении из продукта переработки природного газа – синтез-газа.

Полученный гранулированный катализатор сравнивали с промышленным катализатором ИК-4-25 на основе смешанных оксидов меди, цинка и алюминия [1]. Для исключения влияния геометрического и масштабного факторов таблетки изготовили в виде цилиндров диаметром 5 и высотой 5 мм, что соответствует размерам промышленного катализатора ИК-4-25.

Испытания проводили в лабораторных реакторах (см. рисунок 1) в смеси с кварцем (массовое соотношение 1:1) и в присутствии меди в виде шариков в однорядном реакторе Temkin [2]. Активацию проводили смесью 5%  $H_2$  в гелии с подъемом температуры со скоростью  $2^\circ C/мин$  до  $270^\circ C$ . Выдержка составляла 2 часа. Состав исходной смеси  $CO: H_2O: H_2 = 8 : 42 : 50$ . Термическая стабильность катализаторов оценивалась после 20 часов работы при  $240^\circ C$ . Так как существуют отличия в плотности промышленных и исследуемых катализаторов время контакта для исследуемых образцов увеличилось в 2,5 раза и составило 0,05с. Каталитическую активность оценивали в диапазоне  $160-240^\circ C$  по конверсии  $CO$ , а также по константам скорости для реактора идеального вытеснения с учетом обратимости реакции.

Из-за более высокой удельной поверхности (до  $100 м^2/г$  и более) оксидного катализатора ИК-4-25 активность катализатора, синтезированного в процессе гидратационного твердения из механохимически активированных порошков на единицу массы, оказалась ниже. Но при оценке на единицу поверхности активность экспериментального образца оказалась выше в 1,5...2,5 раза, что характеризует более высокую концентрацию активных центров на поверхности механохимически активированного порошка. Корреляция концентрации меди на поверхности экспериментального образца с изменением его активности не выявлена. Это дает основание предполагать, что активность композиционных материалов из механохимически

активированных порошков связана не только с концентрацией активных центров, но и с их природой. Композиционные материалы из механохимически активированного порошка Al-Cu-Fe показали меньшую активность по сравнению с Cu-Al системами. Прослеживается однозначная связь между активностью единицы поверхности катализатора с концентрацией интерметаллида  $Al_4Cu_9$ .

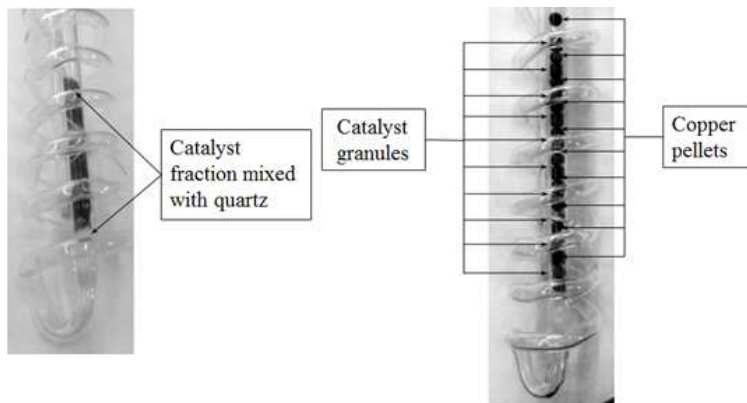


Рис. 1. Вид лабораторного реактора (слева) и реактора Temkin с гранулами катализатора, чередующимися с медными шариками (справа)

Важной характеристикой катализаторов является активность единицы их объема. При сопоставлении активности единицы объема одного из наиболее активных Cu-Al катализаторов, было обнаружено, что для мелкой фракции активность оксидного катализатора выше ( $k=5,1 \text{ с}^{-1}$ ), чем у композиционного ( $k=4,4 \text{ с}^{-1}$ ) [3]. Это обусловлено более высокой удельной поверхностью оксидного катализатора. Однако при испытании гранулированной формы катализатора, выявлено, что активность композиционного катализатора оказалась выше примерно на 15 процентов, чем у оксидного. Это обусловлено развитой макропористой структурой, увеличивающей диффузионную проницаемость. Дополнительное мягкое выщелачивание, увеличивающее концентрацию активных центров на основе меди, позволило поднять активность гранулированного катализатора из CuAl композиционного материала более чем в два раза (см. рисунок 2).

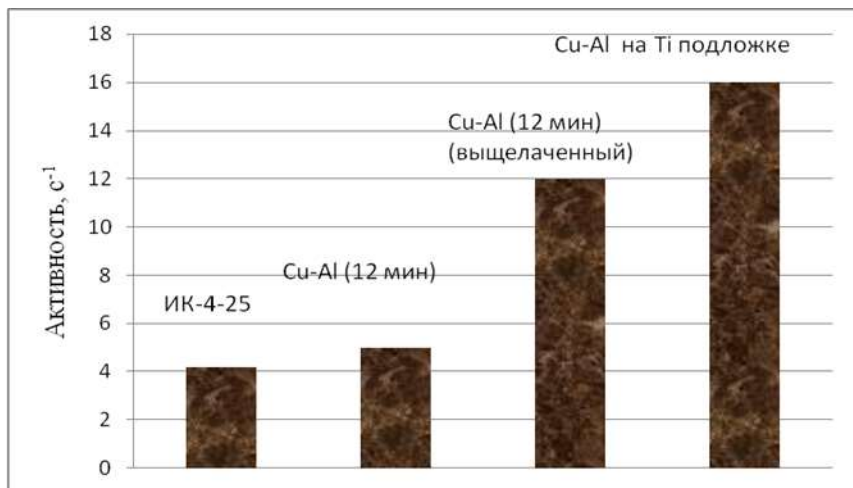


Рис. 2. Активность гранул Cu-Al-12 керамометалла в реакции паровой конверсии СО в сравнении с активностью гранул катализатора ИК-4-25

К сожалению, активность единицы объема катализатора при его конструктивном исполнении в виде гранул не имеет определяющего значения для производительности реальных процессов гетерогенного катализа. Это обусловлено низкой проницаемостью материала (как правило, не более  $20 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ ). Поэтому задействованным в реакции оказывается лишь поверхностный слой гранулы (как правило, не более 100 мкм), а далее диффузионная проницаемость гранул резко снижается

При этом известно, что увеличение активности катализатора в 5-8 раз может быть обеспечено переходом к бидисперсным структурам [4]. Промышленные катализаторы, в частности ИК-4-25, имеют бипористую структуру, при этом преобладающие по количеству размеры пор смещены в наноразмерную область, и объем транспортных макропор невелик. Тем самым затруднен доступ реагентов к поверхности катализатора в процессе гетерогенной реакции. Одним из способов повышения эффективности работы катализатора при сокращении объема непосредственно каталитического материала может быть изготовление его в виде слоя, интегрированного с пористой подложкой. Исследования каталитических свойств материалов на основе Cu-Al, нанесенных на пористую титановую подложку показали возможность увеличить активность катализато-

ра. При исследовании гранул из титана (пористость – 40-42%, коэффициент проницаемости –  $(15-17) \times 10^{-12} \text{ м}^2$ ), покрытых слоем толщиной 100-150 мкм композиционного материала, синтезированного из механоактивированного порошка Cu-Al (пористость 42%, средний размер транспортных пор – 4 мкм, средний размер нанопор 4-10 нм, коэффициент проницаемости  $18 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ ) установлено, что активность такого катализатора увеличивается на 25% по сравнению с выщелаченными гранулами, целиком изготовленными из того же композиционного материала (рисунок 2.). Это можно объяснить более интенсивной циркуляцией газов в контакте с каталитическим слоем, когда сопротивление титановой подложки практически отсутствует, а в реакции принимает участие весь слой керамометалла.

Надо отметить, что прочностные показатели гранул керамического и CuAl композиционных катализаторов близки (прочность на сжатие составляет ~6-8 МПа). В то же время прочность титанового пористого тела с названными характеристиками составляет 70–80 МПа. Поскольку слой катализатора оказывается заключенным в поверхностном слое пористого титана, то оказывается возможным существенно повысить прочность материала катализатора в целом, и, следовательно, появляется возможность ужесточить режимы гетерогенного катализа (в частности, реакций парциального окисления метана, паровой конверсии СО и сжигания топлив) благодаря повышению устойчивости катализаторов к истиранию в 1,8-1,9 раза.

### Список использованных источников

1. Tikhov, S.F. Design of micro-shell Cu–Al porous ceramometals as catalysts for the water–gas shift reaction / S.F Tikhov [et al.]. // RSC Adv. – 2017. – Vol. 7, № 67. – P. 42443–42454.
2. Kungurova, O.A.  $\delta$ -Alumina supported cobalt catalysts promoted by ruthenium for Fischer-Tropsch synthesis / O.A. Kungurova [et al.]. // Appl. Catal. A Gen. – 2017. – Vol. 539. – P. 48–58.
3. Валеев, К.Р. Синтез, физико-химические и каталитические свойства в реакции паровой конверсии СО керамометаллов на основе CuAl и AlCuFe сплавов: дисс. ... канд. хим. наук: 02.00.15 / К.Р. Валеев; Сиб. отд. Рос. Акад. Наук. – Новосибирск, 2019. – 138 с.

4. Боресков, Г.К. Пористая структура катализаторов и процессы переноса в гетерогенном катализе / Г.К. Боресков // – Новосибирск: Наука, 1970. –с. 5–15.

УДК 621.762.4.01

## **ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С КОМПАКТНЫМИ ПОДЛОЖКАМИ**

**Евтухова, Т.Е., ст. преподаватель**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация:

Разработана технологическая схема формирования пористых композиционных материалов из алюмосодержащих механохимически активированных порошков. Для нанесения пористого композиционного материала использован метод гидратационного твердения алюмосодержащих механохимически активированных порошков, который позволяет создать переходный слой, обеспечивающий адгезию композиционного материала к подложке.

Совмещение в одном изделии принципиально различных по структурному строению и по химическому составу материалов способно обеспечить его уникальные свойства. Использование пористых композиционных материалов, интегрированных с компактными и пористыми подложками, может обеспечить повышение эффективности работы катализаторов и испарителей тепловых труб.

Для получения пористых композитов на основе механоактивированных порошков, интегрированных с пористыми и компактными конструктивными элементами, по итогам проведенных исследований [1-4] разработана технологическая схема, включающая следующие основные операции:

- 1 Подготовка исходных порошков;
- 2 Механохимическая активация исходной шихты;
- 3 Подготовка суспензии на основе механоактивированного порошка;