

## HLEDÁNÍ „ZELENÉHO“ HYDROGENOLÝZNÍHO KATALYZÁTORU

JAROSLAV AUBRECHT a DAVID KUBIČKA

Ústav technologie ropy a alternativních paliv, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5,  
166 28 Praha 6, Česká republika  
aubrechj@vscht.cz

Došlo 21.9.22, přijato 29.1.23.

Tento článek je přehledem vědeckých výsledků dosažených v průběhu vývoje udržitelného hydrogenolýzního katalyzátoru. V práci jsou popsány vlivy různých metod přípravy katalyzátoru včetně jejich jednotlivých kroků a efektů různých promotorů a nosičů na strukturu, aktivitu a selektivitu katalyzátoru pro hydrogenolýzu dimethyl-adipátu. Z pohledu zelené chemie byla v laboratorním měřítku nalezena vhodná alternativa k Adkinsovu katalyzátoru.

Klíčová slova: hydrogenolýza, katalýza, zelená chemie, měď

### Obsah

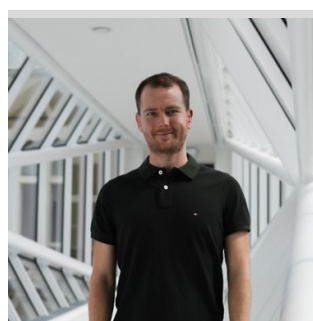
1. Současný stav a hlavní problémy
2. Souhrn naší práce
  - 2.1. Studium vlivu promotorů ve srážených katalyzátorech
  - 2.2. Studium vlivu nosičů a porovnání nosičových a srážených katalyzátorů
  - 2.3. Studium chemismu hydrogenolýzy dimethyl-adipátu
3. Dopady práce a výhled do budoucna

### 1. Současný stav a hlavní problémy

Každý rok se na světě vyrobí okolo 4 milionů tun mastných alkoholů ( $C_6$ – $C_{22}$ ), které se využívají ve farmaceutickém, kosmetickém nebo čistě chemickém průmyslu při výrobě konečných produktů, jako jsou detergenty, maziva nebo polymery<sup>1,2</sup>. Dle aktuálních odhadů bude jejich produkce každoročně narůstat zhruba o 4,5 % (cit.<sup>1</sup>). Jedním z hlavních výrobních postupů těchto alkoholů je hydrogenolýza esterů. Tento průmyslový proces využívá katalyzátor navržený ve třicátých letech minulého století skupinou profesora Homera Adkinse<sup>3,4</sup>. Tento tzv. Adkinsův katalyzátor je na bázi oxidu měďnatého a oxidu chromitého ve formě  $CuO \cdot CuCr_2O_4$ . Měď získaná redukcí obsaženého  $CuO$  je aktivním hydrogenolýzním místem, kde dochází k disociaci vodíku, který slouží k hydrogenolýze esterové skupiny a následně hydrogenaci, zatímco  $Cr_2O_3$  je strukturálním promotorem zlepšujícím fyzikálně-chemické vlastnosti katalyzátoru<sup>5</sup>. S postupem doby byl tento katalyzátor dále vylepšen přidávkou dalších promotorů, např. oxidu barnatého nebo ceričitého<sup>6</sup>. Adkinsův katalyzátor je velmi účinný za teplot 250–350 °C a tlaků 25–35 MPa,

kdy je dosažováno úplné konverze esterů se selektivitou na žádané alkoholy > 99 %. Nicméně náročné reakční podmínky a použití toxických chemikálií při jeho syntéze jsou příčinou toho, že je tento katalyzátor neekologický a nesplňuje současné normy<sup>5,7</sup>.

Zatímco tento katalyzátor byl mnoho let průmyslově používán, v roce 1998 byl představen Paulem Anastasem a Johnem Warnerem pojem „zelená chemie“ a bylo definováno dvanáct principů zelené chemie, které by chemici měli využívat k vývoji udržitelných a k životnímu prostředí šetrných procesů<sup>8</sup>. Aplikujeme-li principy zelené chemie na použití Adkinsova katalyzátoru při hydrogenolýze esterů, je zřejmé, že původní proces nesplňuje současné požadavky na moderní chemické procesy. Zde jsou hlavní slabiny takto prováděné hydrogenolýzy esterů:



Ing. Jaroslav Aubrecht, Ph.D. je akademickým pracovníkem na VŠCHT Praha. V letech 2012–2017 vystudoval obor Syntéza a výroba léčiv a v roce 2022 obhájil disertační práci. Jeho práce se zabývala vývojem nového katalyzátoru pro hydrogenolýzu esterů. Motivaci a výsledky této práce je možné si přečíst v tomto článku. Během doktorského studia strávil 3 měsíce na vědeckém pracovišti ITQ ve Valencii, kde detailně studoval strukturu katalyzátorů. V roce 2022 obdržel hlavní cenu v soutěži organizované Francouzským velvyslanectvím v České republice v kategorii Make our planet great again. Dosažené výsledky vedly také ke třetímu místu v evropské soutěži Dr. Zoltán Pál award.

- Vysoké reakční teploty a tlaky vyžadující vysoké investiční a provozní náklady včetně bezpečnostních nároků.
- Přítomnost  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  v katalyzátoru přináší vysoké riziko vzniku toxického  $\text{Cr}^{\text{VI}}$ .
- Nákladná likvidace odpadních vod obsahujících soli chromu vznikající v průběhu výroby katalyzátoru.
- Vysoké náklady na zajištění bezpečnosti práce a na skladování katalyzátoru či odpadů.
- Náročná likvidace deaktivovaného katalyzátoru obsahujícího chrom.
- Vysoké riziko možnosti vymytí kovu do produktů.

Toto je šest hlavních důvodů, které nás vedly ke studiu ekologičtější náhrady Adkinsova katalyzátoru pro hydrogenolýzu esterů. Během studia byl využit racionální design, kdy jsme nejprve studovali strukturu, aktivitu a selektivitu katalyzátorů a hledáním vzájemných vztahů jsme katalyzátor postupně optimalizovali. Do hry tak vstupovaly na jedné straně různé druhy syntézy katalyzátorů, vliv syntézních a post-syntézních parametrů, volba různých kovových promotorů nebo nosičů a na straně druhé volba reakčních podmínek nebo reaktorového uspořádání. S ohledem na výše uvedené je možné předmět našeho bádání rozdělit na následující tři základní směry:

- Studium vlivu promotorů ve srážených katalyzátorech.
- Studium vlivu nosičů a porovnání nosičových a srážených katalyzátorů.
- Studium chemismu hydrogenolýzy dimethyl-adipátu.

## 2. Souhrn naší práce

Na počátku jsme studovali, zda a do jaké míry je samotná měď (získaná přímou redukcí sráženého  $\text{CuO}$ ) aktivní ve zvolené modelové hydrogenolýze dimethyl-adipátu (DMA) na hexan-1,6-diol (HDOL). Pro porovnání byl testován také komerční Adkinsův katalyzátor, který bylo cílem nahradit. Tyto srovnávací testy, stejně jako další testy na srážených katalyzátorech, probíhaly standardně v průtočném reaktoru s redukcí za teploty  $220\text{ }^\circ\text{C}$  a poté za podmínek  $T_{\text{exp}} = 160\text{--}205\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{H}_2} = 16\text{ MPa}$ ,  $\text{WHSV} = 2\text{--}4\text{ h}^{-1}$  (WHSV – weight hourly space velocity). Ačkoliv byly oba katalyzátory aktivní, tak nejvyšší dosažená konverze byla okolo 20 % (cit.<sup>9</sup>). V případě samotné  $\text{Cu}$  (tedy bez promotorů) byla pozorována znatelná sintrace a následná deaktivace, kdy velikost částic  $\text{CuO}/\text{Cu}$  narostla v průběhu experimentu čtyřnásobně z 11 na 46 nm (k nárůstu došlo jak během počáteční redukce  $\text{CuO}$  na aktivní  $\text{Cu}$ , tak během vlastního hydrogenolýzního experimentu)<sup>9</sup>. Částice  $\text{Cu}$  v Adkinsově katalyzátoru byly stabilnější, přesto dosažená nízká konverze (21 %) otevírala prostor pro zlepšení. Oba tyto katalyzátory posloužily dále jako referenční pro hodnocení široké palety následně připravených a testovaných katalyzátorů.

### 2.1. Studium vlivu promotorů ve srážených katalyzátorech

Za účelem zvýšení stability částic  $\text{Cu}$  byly na základě literární rešerše a našich zkušeností studovány promotory  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  a jejich směsi v různých poměrech<sup>9–11</sup>. Promotované měděné katalyzátory byly připravené společným srážením vhodných prekurzorů kovů a jejich oxidů. Vedle identifikace vhodného promotoru jsme také studovali vliv množství promotoru a jednotlivých parametrů přípravy, jako je hodnota pH při srážení, doba zrání, srážecí nebo kalcinační teplota či kalcinační atmosféra, na strukturu a aktivitu katalyzátoru<sup>10–13</sup>. Na základě těchto studií vyplynulo, že optimální molární poměr aktivní složky a promotoru je 1:1, a tudíž ani větší množství aktivní měděné fáze nezajistí lepší výsledky. Hodnota pH hraje velkou roli zejména v účinnosti srážení. Katalyzátory typu  $\text{CuZnO}$  vyžadují pH 7, zatímco katalyzátory typu  $\text{CuMgO}$  či  $\text{CuZnOMgO}$  pH 9. V případě směsného  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$  katalyzátoru je situace značně složitější, protože volbou pH lze ovlivnit složení vznikajících hydroxyuhlícitánových fází – směsný  $\text{CuZnAl}$ -hydrotalcit nebo směs  $\text{CuZn}$ -fází (aurichalcit, zinkian malachit) a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (efekt těchto fází bude vysvětlen později). Částice  $\text{CuO}$  ve vysrážených prekurzorech katalyzátoru vykazují vysokou míru nestability při vysokých teplotách. V samostatné studii byly stanoveny nevhodnější podmínky kalcinace a redukce srážených hydrogenolýzních  $\text{Cu}$  katalyzátorů. Optimální teplota kalcinace byla  $350\text{ }^\circ\text{C}$  ve statické atmosféře vzduchu a teplota redukce  $220\text{ }^\circ\text{C}$ . Tyto parametry byly používány při dalším studiu. Optimalizací všech parametrů jsme dosáhli dodatečného snížení velikosti nanočástic  $\text{Cu}$  na hranici 3 nm, což vedlo ke zvýšení specifického povrchu mědi až na  $15\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ , tedy na sedminásobek oproti původnímu  $\text{CuO}$ .

Připravené katalyzátory byly testovány v hydrogenolýze DMA za stejných podmínek jako referenční katalyzátory. Po vzájemném porovnání bylo patrné, že přidáním oxidického promotoru došlo ke značnému zvýšení konverze výchozího DMA. Maximální dosažená konverze byla vyšší než 95 % (zejména u katalyzátoru typu  $\text{CuZnO}$ ), tj. došlo ke zvýšení konverze až na čtyřnásobek oproti jak  $\text{Cu}$  katalyzátoru bez promotoru, tak i Adkinsovu katalyzátoru. Příčinou bylo výrazné zvýšení specifického povrchu mědi vlivem promotoru a zároveň stabilizace nanočástic  $\text{Cu}$  na úrovni okolo 3–5 nm (cit.<sup>9</sup>). Nejzajímavějším zjištěním bylo, že za daných relativně mírných reakčních podmínek byla významně překonána aktivita (měřeno parametrem TOF – turn-over frequency) komerčního Adkinsova katalyzátoru ( $0,5 \cdot 10^{-3}\text{ s}^{-1}$  vs.  $2,1 \cdot 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ).

Součástí studia bylo také sledování stability a znovupoužitelnosti katalyzátoru<sup>10,14</sup>. Byla připravena série katalyzátorů typu  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$ , které byly opakovaně stabilní v experimentech po dobu 48–72 h (cit.<sup>10</sup>). Dále jsme ukázali, že stabilita katalyzátoru je závislá na výchozím fázovém složení vysráženého materiálu. Je proto důležité věnovat velkou pozornost již prvnímu kroku syntézy. Většina testovaných katalyzátorů vykazovala míru deakti-

vace od 3 do 10 rel.% konverze DMA. Z pohledu znovupoužitelnosti byl katalyzátor CuZnO testován ve třech po sobě jdoucích testech v autoklávu a byla prokázána stabilní konverze DMA. Při studiu promotorů jsme také identifikovali ty, které nejsou vhodné pro použití v hydrogenolýze esterů. Například katalyzátor typu CuZnOMgO podléhal snadné deaktivaci kvůli tvorbě nežádoucích organických hořčnatých solí.

V případě katalyzátorů typu CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jsme detailněji studovali proces transformace katalyzátoru od jeho vysrážení po konečné použití v hydrogenolýze DMA (cit.<sup>10</sup>). Během této transformace jsme sledovali rozklad vysrážených hydroxyuhličitanových prekurzorů na oxidy. Když jsme nastavili parametry syntézy tak (zejména volbou vyššího pH 9), aby prekurzorem byl směsný CuZnAl-hydroxalcit, dosahoval výsledný redukováný katalyzátor nejvyšší aktivitu<sup>10</sup>. Zaměřili jsme se proto na tento typ katalyzátoru detailněji a určili reálné oxidační stavy mědi v redukováných katalyzátorech technikami FTIR-CO a XPS. Je známo, že během aktivace katalyzátoru dochází zejména k redukci CuO na Cu<sup>0</sup>, nicméně na studovaných katalyzátorech jsme identifikovali koexistenci směsi Cu<sup>0</sup> a Cu<sup>I</sup> částic<sup>10</sup>. Porovnáním většího množství katalyzátorů jsme potvrdili, že klíčovou roli v hydrogenolýze hraje zejména Cu<sup>0</sup>, která je hojněji zastoupena u hydroxalcitového typu katalyzátoru<sup>10</sup>. Pokud jde o Cu<sup>I</sup>, prozatím se domníváme, že předpokládaný kladný náboj má pozitivní vliv na adsorpci reaktantů. Nicméně roli Cu<sup>I</sup> stále studujeme.

## 2.2. Studium vlivu nosičů a porovnání nosičových a srážených katalyzátorů

Vzhledem k tomu, že srážené katalyzátory obsahovaly typicky okolo 50 % Cu, zaměřili jsme se na nosičové katalyzátory, abychom tento vysoký obsah aktivní složky snížili. Díky vysokému specifickému povrchu nosiče je totiž možné lépe dispergovat částice Cu a zajistit lepší přístupnost aktivních částic Cu reaktantům. Výsledkem je pak potřeba menšího množství mědi v katalyzátoru. Nosičové katalyzátory mají navíc oproti sráženým katalyzátorům jednu nespornou výhodu – volbou nosiče a jeho další modifikací lze dobře optimalizovat vlastnosti katalyzátoru a řídit tak jeho výslednou aktivitu. Pro první přiblížení jsme testovali sérii deseti vhodných nosičů s rozdílnými vlastnostmi zahrnující nosiče s vysokým specifickým povrchem (SiO<sub>2</sub>, SBA-15, MCM-41) a také nosiče s rozdílnými acidobazickými vlastnostmi (MgO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>15–18</sup>. Díky tomu jsme byli schopni velmi dobře vyhodnotit parametry nosiče ovlivňující velikost CuO/Cu částic, jejich specifický povrch nebo také vliv acidobazických center na selektivitu katalyzátoru<sup>16–18</sup>.

Pro kotvení na nosiče byla pro jednoduchost zvolena metoda vlhké impregnace. Došli jsme k zajímavému zjištění, že při využití nosičů s velmi vysokým specifickým povrchem (> 1000 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> pro SBA-15) nedochází k dostatečné stabilizaci Cu nanočástic a dosažení vysokého specifického povrchu Cu. Důvodem je slabá interakce

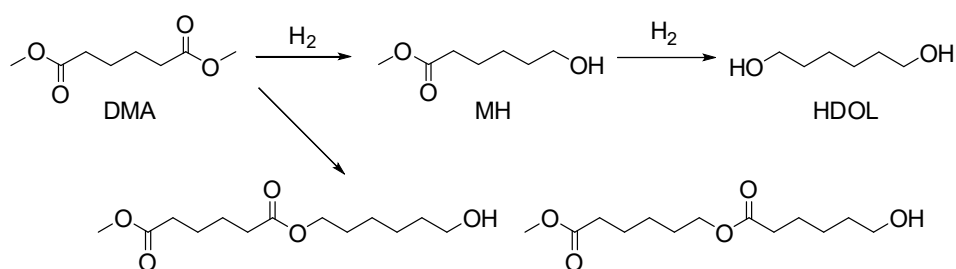
materiálů na bázi SiO<sub>2</sub> s prekurzorem Cu během impregnace<sup>17,18</sup>. U ostatní nosičů byla již interakce dostatečná a lepší disperze byla dosažena se zvyšujícím se povrchem nosiče. Nejlepší strukturální vlastnosti nanočástic Cu byly dosaženy po impregnaci na ZrO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Nicméně při následném testování v hydrogenolýze DMA bylo identifikováno velké množství nežádoucích produktů zejména v případě Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Jako nejperspektivnější nosič se tak jevil ZrO<sub>2</sub>. Je proto zřejmé, že popis pouze Cu jakožto aktivního místa pro hydrogenolýzu není dostatečný pro určení finálního chování hydrogenolýzního katalyzátoru (ve smyslu jeho aktivity, selektivity a stability). Sledovali jsme proto acidobazické vlastnosti studovaných katalyzátorů a našli jsme přímou závislost mezi množstvím těchto center a množstvím vedlejších produktů. Konkrétně s rostoucím množstvím acidobazických center roste množství vznikajících vedlejších produktů (zejména produktů transesterifikace).

Souběžně s vlivem nosiče byly studovány a optimalizovány čtyři metody nanášení mědi (depozice-precipitace, chemisorpce-hydrolyza, vlhká impregnace a suchá impregnace) s cílem dosáhnout co nejvyššího specifického povrchu mědi, a tím i maximální aktivity katalyzátoru<sup>15,18</sup>. V takovéto šíři nebyly dosud nosičové katalyzátory pro hydrogenolýzu esterů testovány. Ačkoliv obě metody impregnace jsou instrumentálně velmi jednoduché, tak lepší strukturální vlastnosti katalyzátoru byly získány použitím postupů depozice-precipitace a chemisorpce-hydrolyza<sup>15</sup>. Při využití těchto metod lze nastavit pH syntézní směsi a tak dosáhnout silnější interakce mezi nanášeným prekurzorem a nosičem. Přes širší uskutečněných pokusů není vůbec jednoduché identifikovat jednu optimální kombinaci impregnace a nosiče vedoucí k nejaktivnějšímu katalyzátoru. V našem výzkumu se nejvíce osvědčily nosiče na bázi ZnO a ZrO<sub>2</sub>, na které byl nanášen prekurzor mědi metodou chemisorpce-hydrolyza. V této metodě se Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> použitý jako prekurzor mědi převede v prostředí amoniaku na komplex Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub><sup>2+</sup>. Tento komplex je následně adsorbován na nosič a při ochlazení na 0 °C je přidáním vody hydrolyzován. Následnou kalcinací je pak prekurzor převeden na CuO.

## 2.3. Studium chemismu hydrogenolýzy dimethyl-adipátu

Hydrogenolýza DMA se na první pohled jeví jako jednoduchá reakce, při níž dochází k přeměně DMA nejprve na methyl-6-hydroxyhexanoát (MH) a následně na HDOL. Proto nás zjištěná komplexita reakce překvapila<sup>19</sup>. Hydrogenolýzní reakce je totiž hojně doprovázena transesterifikačními reakcemi (obr. 1).

Jedná se zejména o vzájemné reakce DMA, HDOL a MH, jejichž esterové a hydroxylové skupiny na obou koncích molekuly umožňují řetězení nejen do prvního, ale i do dalších stupňů. Selektivita na tyto transesterifikační produkty může být až 80 % (cit.<sup>16,17</sup>). Míra selektivity na transesterifikační produkty je vysoce závislá na stupni dosažené konverze. Jakmile konverze DMA dosahuje



Obr. 1. Hydrogenolýza dimethyl-adipátu na hexan-1,6-diol a vedlejší produkty transesterifikace

alespoň 80 %, tak selektivita na transesterifikační produkty klesá a při úplné konverzi DMA je prakticky nulová. Proto lze označit transesterifikační produkty spíše jako reakční meziproducty, které se při vysokých konverzích DMA také hydrogenolýzují za vzniku žádaného HDOL. V průběhu studie jsme identifikovali klíčové vlastnosti katalyzátoru, které snižují množství těchto meziproductů<sup>14,17,20</sup>. Transesterifikační reakce probíhají především na acidobazických centrech katalyzátoru, a proto kontrola nad těmito centry např. volbou nosiče vede ke zvýšení selektivity na HDOL, tedy na žádaný produkt. Omezení vedlejších reakcí je důležité zejména z pohledu životnosti katalyzátoru, aby nedocházelo k jeho zakoksování.

### 3. Dopady práce a výhled do budoucna

Vedle pochopení chemismu reakce a vyhodnocení vztahu mezi strukturou, aktivitou a selektivitou katalyzátorů byly hodnoceny také environmentální nebo ekonomické parametry, protože hlavním cílem bylo identifikovat potenciálně ekologičtější alternativy za katalyzátor  $CuCr_2O_3$ . Z pohledu průmyslového využití bylo dosaženo potřebné konverze (> 99 %) již za podmínek  $T = 190\text{--}205\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $p_{H_2} = 10\text{--}16\text{ MPa}$ , přičemž průmyslová hydrogenolýza na Adkinsových katalyzátorech probíhá za významně vyšších provozních teplot a tlaků ( $T = 250\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 25\text{--}35\text{ MPa}$ ). Námi vyvinuté katalyzátory dosáhly až šestkrát vyšší hydrogenolýzní aktivity (sledováno parametrem TOF) než komerční  $CuCr_2O_3$ . Ačkoliv se prozatím jedná pouze o výsledky získané z pokusů ve větším laboratorním měřítku, je možné na základě prvotních kalkulací odhadnout, že by bylo možné snížit výrobní náklady katalyzátoru až o 40 %. Kromě těchto vyčíslitelných ekonomických benefitů je zapotřebí také vzít v potaz zvýšení bezpečnosti, protože pracovníci nemusí pracovat s toxickým katalyzátorem a deaktivovaný katalyzátor se tak jednodušeji regeneruje či likviduje a riziko potenciální ekologické katastrofy je díky tomu významně sníženo. Z těchto faktů vyplývá, že bylo splněno několik principů zelené chemie, a to a) redukce odpadů, b) snížení energetické náročnosti a c) bezpečnější výroba.

Ačkoliv jsme doposud připravili a testovali skoro dvě stovky katalyzátorů, naše cesta ještě nekončí. Přidáním

dalšího kovu nebo oxidu jako promotoru je pravděpodobné dosažení ještě vyšší katalytické aktivity nebo selektivity. Proto v současné době hledáme nejvhodnější promotor pro náš hydrogenolýzní katalyzátor. Stejně tak bychom rádi dokončili přesnější popis role  $Cu^I$ . Naším snem je připravit průmyslový všestranně vyhovující hydrogenolýzní katalyzátor.

*Tato práce by nevznikla bez široké podpory jednak našich kolegů a spoluautorů – zejména pak Violetty Pospelové a Olega Kikhtyanina – jakož i celé řady expertů a techniků, kteří se podíleli na specializovaných činnostech – především v oblasti charakterizace katalyzátorů. Tato práce by rovněž nebyla možná bez finanční podpory GAČR (GA17-05704S a GA20-28093S).*

### LITERATURA

- Grand View Research: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/fatty-alcohol-market>, staženo 22. 3. 2021.
- Noweck K., Grafahrend W., v knize: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Hoboken 2006.
- Adkins H., Folkers K.: *J. Am. Chem. Soc.* 53, 1095 (1931).
- Adkins H., Burgoyne E. E., Schneider H. J.: *J. Am. Chem. Soc.* 72, 2626 (1950).
- Turek T., Trimm D. L., Cant N. W.: *Catal. Rev.* 36, 645 (1994).
- Connor R., Folkers K., Adkins H.: *J. Am. Chem. Soc.* 54, 1138 (1932).
- Rieke R. D., Thakur D. S., Roberts B. D., White G. T.: *J. Am. Oil Chem. Soc.* 74, 333 (1997).
- Anastas P. T., Warner J. C.: *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press, New York 1998.
- Aubrecht J., Pospelova V., Kikhtyanin O., Dubnová L., Kubička D.: *Appl. Catal., A* 608, 117889 (2020).
- Aubrecht J., Pospelova V., Martínez A., Concepción P., Kikhtyanin O., Straka P., Kubička D.: *Appl. Catal., A* 644, (2022).
- Pospelova V., Aubrecht J., Kikhtyanin O., Pacultová K., Kubička D.: *ChemCatChem* 11, 2169 (2019).

12. Kikhtyanin O., Pospelova V., Aubrecht J., Lhotka M., Kubička D.: *Catalysts* 8, 446 (2018).
13. Pospelova V., Aubrecht J., Pacultová K., Lhotka M., Kikhtyanin O., Kubička D.: *Catal. Sci. Technol.* 10, 3303 (2020).
14. Kikhtyanin O., Aubrecht J., Pospelova V., Kubička D.: *Catalysts* 11, 1417 (2021).
15. Pospelova V., Aubrecht J., Kikhtyanin O., Kubička D.: *Appl. Catal., A* 624, 118320 (2021).
16. Aubrecht J., Pospelova V., Kikhtyanin O., Lhotka M., Kubička D.: *Catal. Today* 397-399, 173 (2022).
17. Aubrecht J., Pospelova V., Kikhtyanin O., Veselý M., Kubička D.: *Catal. Today* 387, 61 (2022).
18. Aubrecht J., Kikhtyanin O., Pospelova V., Paterová I., Kubička D., Zaccheria F., Scotti N., Ravasio N.: *Catal. Today* (2022), v tisku.
19. Kubička D., Aubrecht J., Pospelova V., Tomášek J., Šimáček P., Kikhtyanin O.: *Catal. Commun.* 111, 16 (2018).
20. Kikhtyanin O., Aubrecht J., Pospelova V., Kubička D.: *Appl. Catal., A* 606, 117825 (2020).

**J. Aubrecht and D. Kubička** (*Department of Petroleum Technology and Alternative Fuels, University of Chemistry and Technology Prague, Czech Republic*):  
**Searching for a “Green” Hydrogenolysis Catalyst**

This paper is an overview of the scientific results that have been achieved during the development of a sustainable hydrogenolysis catalyst. The paper describes the effects of various synthesis methods and their parameters, as well as the effect of diverse promoters and supports on the catalyst structure, activity and selectivity in the hydrogenolysis of dimethyl adipate. From the green chemistry point of view, a suitable alternative to the Adkins catalyst was found on the laboratory scale.

**Keywords:** hydrogenolysis, catalysts, green chemistry, copper

*Acknowledgements*

*This work was supported by the Czech Science Foundation (GACR) (Grant numbers GA17-05704S and GA20-28093S).*