

Stanovení spolehlivosti reaktoru pro parciální oxidaci ropných zbytků

Jan Bartoň,

Chemopetrol, k. ú. o. Výzkumný ústav anorganické chemie, Ústí nad Labem,
Zádeněk Vyskočil,

Chemopetrol k. p. Chemické závody ČSSP, Litvínov

66.094.3
66.023.23

Redakční došlo 14. 9. 1982

V článku je diskutována spolehlivost součástí chemického reaktoru pro parciální oxidaci ropných zbytků směsí kyslíku a vodní páry. Ze záznamů o poruchách reaktoru byly vybrány pouze ty poruchy, které byly způsobeny jednou ze šesti součástí reaktoru. Ocelový plášť a šamotová vyzdívková neměla poruchy. U trysky hořáku, teplotních čidel a těsnění příruby bylo zjištěno, že se jejich spolehlivost řídí přibližně exponenciálním zákonem s konstantní intenzitou poruch. U nosu hořáku doba do poruchy (životnosti) se řídí přibližně normálním rozdělením. Funkce spolehlivosti reaktoru je rovna součinu funkcí spolehlivosti pro jednotlivé součásti reaktoru.

Úvod

Spolehlivost chemických zařízení je podstatnou vlastností, která ovlivňuje dosažitelnou kapacitu výroby¹⁾. Význam spolehlivosti zařízení se zvyšuje úměrně tomu, jak narůstají kapacitní možnosti chemických výroben. Výpadkem velkokapacitních výroben v důsledku nízké spolehlivosti zařízení vznikají značné ekonomické ztráty.

Spolehlivostí rozumíme²⁾ pravděpodobnost, že určitá součástka, resp. zařízení plní svou funkci odpovídajícím způsobem do dané doby za daných podmínek. Takovoto pravděpodobnost se také někdy nazývá pravděpodobností „přžítí“ dané součástky, resp. zařízení. Spolehlivost součástky, resp. zařízení úzce souvisí s dobou životnosti, tj. dobou, během níž může součástka nebo zařízení plnit svou funkci odpovídajícím způsobem. Doba do poruchy součástky je v této interpretaci rovna době životnosti dané součástky v daném prostředí.

Ačkoliv je teorie spolehlivosti již do značné míry propracována³⁻⁵⁾, její aplikace na zařízení chemických výroben se zatím uplatňuje poměrně zřídka. V chemických výrobnách se vyskytují velmi často unikátní zařízení, resp. zařízení vyráběná v malých sériích. Tato zařízení pracují často za zcela odlišných podmínek, což ztěžuje nebo úplně vylučuje přenos dat spolehlivosti. Závažným problémem je i nedostatek dlouhodobých údajů pro zpracování. Ve výrobně je třeba dlouhodobě sledovat a zaznamenávat poruchy zařízení, jejich příčiny a způsob odstranění. Vyhodnocování údajů o spolehlivosti zařízení musí být založeno na objektivním přístupu k příčinám poruch a odstávek zařízení.

Většina chemických zařízení je konstruována tak, že v případě poruchy některé součásti zařízení může být daná součást opravena nebo vyměněna za bezvadnou. Diskuse spolehlivosti opravitelných a neopravitelných systémů je podána v práci⁶⁾. V některých případech, kdy výroba obsahuje několik paralelně řazených zařízení téhož typu, pracujících při srovnatelných podmínkách, můžeme získat rozobrem záznamů o poruchách a odstávkách těchto zařízení relativně značný počet dat, s nimiž se můžeme pokusit statisticky analy-

zovat výskyt poruch jednotlivých součástí zařízení s cílem nalézt zákonitosti, jimiž se řídí spolehlivost zařízení jako celku.

Teoretická část

Pro spolehlivost namáhané neopravitelné součástky systému (např. zapnutí žárovky v osvětlení) platí často exponenciální zákon spolehlivosti

$$R_i(t) = \exp(-\lambda_i t) \quad (1)$$

$R_i(t)$ — spolehlivost i -té součástky v čase t
 λ_i — intenzita poruch namáhané součástky

Pro součástky chemického zařízení lze předpokládat i jiné typy závislosti spolehlivosti na čase než exponenciální zákon (1). Na řadu součástek zařízení v chemickém průmyslu působí agresivní různá média, která způsobují korozi, popřípadě jsou některé součástky vystaveny relativně vysokým teplotám, které mohou způsobit jejich úplné zničení (poruchu zařízení) zvláště v kombinaci s agresivními médii. Působí-li tyto vlivy vícečetně konstantním způsobem, lze očekávat, že pravděpodobnost přežití součástky prudce klesne v době, kdy teplotné a korozivní namáhání součástky dosáhne určité meze odolnosti (životnosti) součástky setrvávat v daném prostředí. Rozložení doby do poruchy součástky může být v tomto případě normální s maximem frekvencí charakteristik střední doby do poruchy. Pro závislost spolehlivosti na čase v tomto případě platí:

$$R_i(t) = 1 - 1/(\sqrt{2\pi\sigma}) \int_0^t \exp[-(x-\mu)^2/2\sigma^2] dx \quad (2)$$

kde μ je střední doba do poruchy a σ je směrodatná odchylka doby do poruchy.

Každé zařízení lze rozdělit na jednotlivé součástky. Předpokládejme, že pro všechny součástky známe závislost spolehlivosti na čase. Zařízení může vykonávat svou funkci pouze tehdy, jestliže všechny jeho součástky jsou provozuschopné. Z hlediska spolehli-

vosti představují proto součástky zařízení sériový model spolehlivosti a pro spolehlivost zařízení jako celku platí

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3)$$

R — spolehlivost zařízení, n — počet součástek zařízení.

V případě, že pro všechny součástky lze nalézt exponenciální zákon spolehlivosti (1), platí pro $R(t)$

$$R(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right) \quad (4)$$

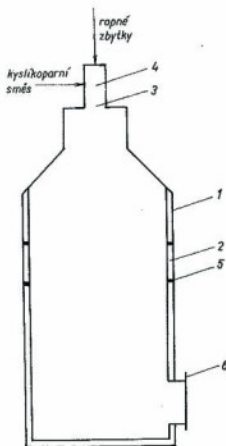
a pro střední dobu T do poruchy zařízení

$$T = 1/\sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (5)$$

Použití vztahů (2) až (5) ukážeme na praktickém příkladě.

Praktická část

Ve výrobně pracuje vedle sebe 6 identických reaktorů, v nichž probíhá parciální oxidace ropných zbytků směsí kyslíku a vodní páry. Každý reaktor (obr. 1) se skládá z ocelového pláště se šamotovou vyzdívkou. Tryskou hořáku umístěnou v horní části reaktoru se přivádí kapalné předehřáté palivo, mezi tryskou a nos hořáku se tangenciálně přivádí směs kyslíku a vodní páry. Teplotní režim spalování kapalného paliva v reaktoru je kontrolován čidly, která jsou umístěna v šamotové vyzdívice a podávají informaci o axiálním i radiálním teplotním profilu reaktoru. Spaliny proudí z reaktoru do kotle na výrobu vysokotlaké páry, s nímž je reaktor spojen přírubou. Jako součástky reaktoru uvažujeme:



Obr. 1. Schematické znázornění reaktoru (číslování součástí shodné s textem)

- 1 — plášť reaktoru;
- 2 — vyzdívkou reaktoru;
- 3 — nos hořáku;
- 4 — trysku hořáku;
- 5 — teplotní čidla;
- 6 — těsnění příruby mezi reaktorem a kotlem na vysokotlakou páru.

Provoz reaktorů

Při běžném provozu je zapojeno 5 reaktorů, v nichž probíhá spalování kapalného paliva směsí kyslíku a vodní páry. Šestý reaktor je v tzv. horké záloze. V případě, že na některém z pěti reaktorů nastane porucha, záložní reaktor je uveden do provozu, reaktor s poruchou je odstaven, opraven a uveden do režimu horké zálohy. Režim horké zálohy spočívá ve vyhřívání reaktoru spalováním plynného paliva. Při každém odstavení reaktoru je z hořáku reaktoru vyjmuta tryška, která je nahrazena hořákem na plynné palivo pro období horké zálohy. Tryska je po vyjmutí z hořáku vyčištěna a posleze je zveřejňována předepsanými zkouškami. Jestliže jsou výsledky těchto zkoušek pozitivní, je tryška použita v libovolném reaktoru pro další start (naježdí) spalování kapalného paliva. Jsou-li výsledky zkoušek negativní, tryška je vyřazena do opravy.

Záznamy o poruchách zařízení

Ve výrobně je několik let veden záznam o poruchách reaktorů. V záznamu o poruchách reaktorů jsou uvedeny všechny poruchy, které způsobily odstavení reaktoru, ať už technologického či netechnologického rázu. Zvláštní pozornost je věnována trysce hořáku. Každá tryška má svou evidenční kartu, do níž jsou zapisovány provozní hodiny, revizní zkontroly a počet startů. V této souvislosti je třeba si uvědomit, že se nemusí krýt počet poruch reaktoru způsobených poruchou trysky s vlastní životností trysek. Může se stát, že je reaktor odstaven z technologických důvodů, revize trysky však odhalí její nevyhovující stav a tryška je z dalšího používání vyřazena. Proto můžeme očekávat, že střední doba životnosti trysky je kratší proti střední době do poruchy reaktoru způsobené poruchou trysky.

Zpracování dat

Byla analyzována data o poruchách a odstávkách pro období 3 let pro všech 6 reaktorů. Bylo zjištěno, že průměrná frekvence odstávek 1 reaktoru činí 21 odstávek za rok se směrodatnou odchylkou 3,1 odstávky za rok. Průměrná doba provozu reaktorů mezi dvěma odstávkami činila za uvedené období 331 hodinu. Z celkového počtu odstávek reaktorů připadalo na odstávky způsobené poruchou součástek reaktoru pouze 19,2 %. Předpokládáme, že odstavení reaktoru z jiného důvodu než pro poruchu součástky reaktoru neovlivňuje intenzitu poruch jednotlivých součástek: Proto jsme provozní hodiny jednotlivých součástek reaktoru stanovili tak, že jsme sčítali provozní čas mezi dvěma poruchami téže součástky bez ohledu na to, že mezi těmito poruchami mohl být reaktor odstaven z jiných příčin. Pro tryšku hořáku jsme získali paralelně dva údaje. Jedním údajem je poruchovost reaktoru způsobená poruchou trysky (ze záznamů o poruchách reaktorů), druhým je životnost trysky

v závislosti na provozním čase a počtu startů ze známých revizních zkoušek a provozních hodin pro danou trysku. Vzhledem k tomu, že se kvalita kapalného paliva, jakož i plynné směsi kyslíku a vodní páry ve sledovaném období nezměnila a že jednotlivé reaktory byly v průběhu tohoto období zatěžovány rovnoměrně, data pro poruchovost jednotlivých součástí jsou sumarizována z údajů pro všech 6 reaktorů. V tabulce I jsou uvedeny průměrné doby do poruchy pro jednotlivé součástky.

Tabulka I
Poruchy reaktoru

součástka reaktoru	plášť	vyzávka	nos hořáku	tryska hořáku	teplotní čidla	těsnění příruby
počet poruch	0	0	20	18	19	11
střední doba do poruchy T_S [h]	—	—	4422	5128	3226	6250

Empirická funkce spolehlivosti

Empirická funkce spolehlivosti součástky na čase byla získána tak, že jsme pro čas t vynásili

$$R_1(t) = 1 - N_1(t)/N_1 \quad (6)$$

kde N_1 značí celkový počet poruch dané součástky, $N_1(t)$ značí počet poruch dané součástky do doby t .

Jestliže se průběh závislosti spolehlivosti na čase blíží exponenciálnímu zákonu (1), byl tento zákon použit pro $\lambda = 1/T_S$, kde hodnota T_S (střední doba do poruchy součástky) byla zjištěna z provozních záznamů, a závislost spolehlivosti na čase podle vztahu (1) pro dané λ vynesena do grafu spolu s experimentálními hodnotami.

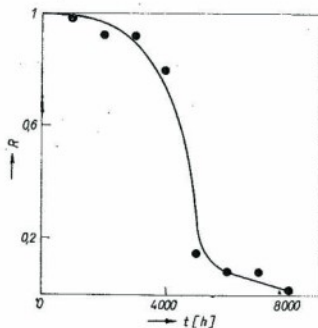
Spolehlivost nosu hořáku

Průměrná doba do poruchy (výměny) nosu pro všechny reaktory je 4422 hodin. Vzhledem k tomu, že z hlediska bezpečnosti provozu je spolehlivá funkce nosu hořáku velmi důležitá, je stav nosu hořáku průběžně kontrolován při plánovaných odstávkách reaktorů, resp. i při neplánovaných odstávkách. Primárním hlediskem při výměně nosu hořáku je možnost ohrožení bezpečnosti provozu dalším používáním již opotřebeného nosu hořáku, což může vážně poškodit reaktor. Opotřebení nosu hořáku je způsobeno agresivním médiem, které nosem hořáku protéká (kyslík s vodní párou) a relativně vysokou teplotou. Nepřekvapuje proto, že závislost empirické funkce spolehlivosti na čase podle vztahu (6) má tvar znázorněný na obrázku 2. Rozdělení doby do poruchy (výměny) nosu hořáku je normální se střední hodnotou $\mu = 4422$ h a směrodatnou odchylkou $\sigma = 1000$ h.

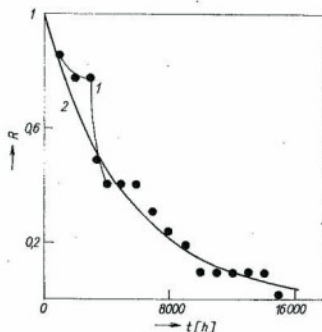
Spolehlivost trysky hořáku

Tryskou hořáku je přiváděno přehřáté kapalné palivo. Závislost spolehlivosti trysky hořáku na čase z údajů o poruchách reaktorů je uvedena na obrázku 3. Experimentálními body mezi 0 až 4000 hodinami je vedena křivka 1. Ze zlomu na křivce 1 mezi 3000 až 3500 hodinami vyplývá, že relativní četnost poruchy

trysky daná derivací $dR(t)/dt$ je v tomto intervalu maximální. Spolehlivost trysky se řídí kromě oblasti mezi 3000 až 3500 h přibližně exponenciálním zákonem spolehlivosti a intenzitou poruchy $\lambda_1 = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ (obr. 3, křivka 2).



Obr. 2. Empirická funkce spolehlivosti nosu reaktoru



Obr. 3. Závislost spolehlivosti trysky hořáku reaktoru na čase z dat o poruchách reaktoru
1 - empirická funkce spolehlivosti; 2 - exponenciální funkce pro $\lambda_1 = 1,95 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$; ● - experimentální body

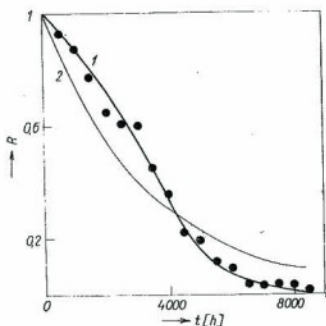
Ze záznamů o životnosti trysek bylo vybráno 31 údajů životnosti za období 3,5 roku. Data o životnosti trysek jsou souhrnně uvedena v tabulce II.

Tabulka II
Doba životnosti trysek

maximální doba životnosti 8490 h při 22 startech	průměrná doba životnosti 3345 h
minimální doba životnosti 301 h při 1 startu	průměrná doba na 1 start 293 h

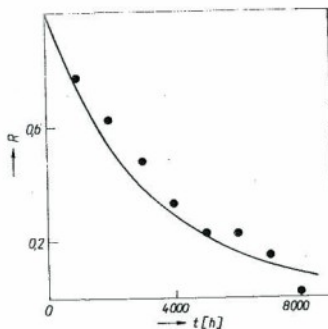
Porovnáním obrázku 3 a tabulky II zjistíme, že zlom na křivce 1 (obr. 3) mezi 3000 až 3500 h odpovídá průměrné době životnosti trysky podle tabulky II (3345 h). Rozdělení doby životnosti trysky je přibližně normální s maximem mezi 3000 až 3500 h. Empirická funkce spolehlivosti trysky z údajů pro životnost trysky má tvar znázorněný na obrázku 4, křivka 1. Pro srovnání je na tomto obrázku vynesena exponenciální závislost spolehlivosti na čase pro $T_B = 3345$ h ($\lambda = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$). Z obrázku je patrné, že exponenciální zákon spolehlivosti nevystihuje realitu životnosti trysky ani velmi přibližně.

Pro spolehlivost trysky hořáku platí pro účel sledování poruch reaktorů exponenciální zákon spolehlivosti (obr. 3), ve kterém jsou implicitně obsaženy výměny trysky podle výsledku jejich přezkoušení.



Obr. 4. Závislost spolehlivosti trysky hořáku reaktoru na čase z dat o životnosti trysky

1 - empirická funkce spolehlivosti; 2 - exponenciální zákon pro $\lambda = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$; ● - experimentální body



Obr. 5. Exponenciální závislost spolehlivosti teplotních židel reaktoru na čase pro $\lambda_5 = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$; ● - experimentální body

Spolehlivost teplotních židel

Závislost spolehlivosti teplotních židel na čase je znázorněna na obrázku 5. Výskyt poruch židel se řídí přibližně exponenciálním zákonem s $\lambda_5 = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$. Parametr λ_5 lze psát

$$\lambda_5 = \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (7)$$

kde m je počet židel reaktoru.

Spolehlivost těsnění příruby mezi reaktorem a kotlem

Závislost spolehlivosti těsnění příruby reaktoru na čase je znázorněna na obrázku 6. Výskyt poruchy těsnění se řídí přibližně exponenciálním zákonem spolehlivosti s $\lambda_6 = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$.

Spolehlivost pláště a vyzdívky reaktoru

Plášť i vyzdívka reaktoru mají o řád větší spolehlivost s průměrnou dobou životnosti pláště reaktoru přesahující 10 let (odhad), u vyzdívky asi 3 roky. Pro spolehlivost těchto součástí reaktoru uvažujeme proto

$$R_1 = R_2 = 1$$

Spolehlivost reaktoru

Pro spolehlivost reaktoru R platí

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \quad (8)$$

Indexy 1 až 6 odpovídají obrázku 1.

Platí:

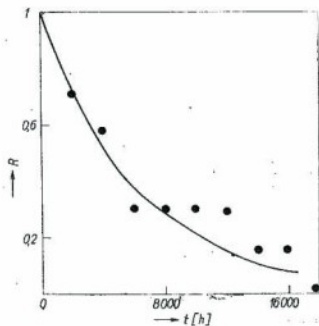
$$R_1 = R_2 = 1 \quad (9)$$

$$R_3(t) = 1 - 1/(1/\sqrt{2\pi\sigma}) \cdot \int_0^x \exp[-(x-\mu)^2/2\sigma^2] dx \quad (10)$$

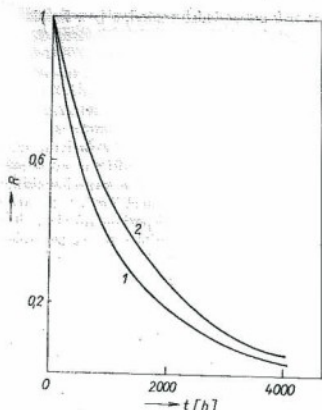
$$R_4(t) = \exp(-\lambda_4 t) \quad (11)$$

$$R_5(t) = \exp(-\lambda_5 t) \quad (12)$$

$$R_6(t) = \exp(-\lambda_6 t) \quad (13)$$



Obr. 6. Exponenciální závislost spolehlivosti těsnění příruby reaktoru na čase pro $\lambda_6 = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$; ● - experimentální body



Obr. 7. Závislost spolehlivosti reaktoru na čase.

1 - podle vztahu (14); 2 - podle vztahu (14), hodnoty $R_0(t)$ odečteny z obrázku 2

Pro $R(t)$ získáme

$$R(t) = \exp -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) t \cdot R_0(t) \quad (14)$$

Závislost spolehlivosti reaktoru na čase je uvedena na obrázku 7. Křivka 1 platí pro případ, kdy pro spolehlivost nosu hořáku uvažujeme vztah (10) a odpovídá

proto rovnici (14). Křivka označená 2 platí pro případ, že hodnoty funkce $R_0(t)$ byly odečteny z empirické funkce spolehlivosti nosu hořáku podle obrázku 2.

Při analýze doby poruchy reaktoru způsobené pouze poruchami součástek reaktoru bylo stanoveno, že střední doba do poruchy reaktoru činí $T = 1300$ h. Tento údaj velmi dobře koresponduje s hodnotou $1/(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = 1500$ h.

Závěr

Z rozboru poruchovosti součástek chemického reaktoru vyplynulo, že pro tyto součástky platí exponenciální zákon spolehlivosti s konstantní intenzitou poruch a normální rozdělení doby do poruchy a z něho vyplývající závislosti spolehlivosti na čase. Spolehlivostní funkce reaktoru je složena ze spolehlivostních funkcí jednotlivých součástek reaktoru. Nízká intenzita poruch součástek je základním předpokladem pro dosažení vysokého koeficientu pohotovosti¹⁾ zařízení s tím, že možnost výměny vadných součástek za bezvadné musí být propracována tak, aby oprava zařízení trvala minimálně možnou dobu.

Literatura

1. Bartoň J., Moudrý V., Novotný P.: Chem. prům. 32, 666 (1982).
2. Basovsky I.: *Reliability Theory and Practice*, str. 11, Prentice-Hall, Inc., New Jersey 1961.
3. Kaufmann A., Greenko D., Cron R.: *Mathematical Models for the Study of the Reliability of Systems*, Academic Press, New York, San Francisco, London 1977.
4. Green A. E., Bourne A. J.: *Reliability Technology*, Wiley-Interscience, London, New York, Sydney, Toronto 1973.
5. Thompson W. A. Jr.: *Technometrics* 23 (1), 1 (1981).

Zrnitost práškového oxidu hlinitého

Zdeněk Rytíř, Míruše Klofová,

Spolek pro chemickou a hutní výrobu, n. p., Ústí nad Labem

861.662.22
539.215.2

Redakce došlo 2. 8. 1982

Technologií výroby monokrystalů oxidu hlinitého a výroby polykrystalické korundové keramiky slinovinám jsou dány požadavky na zrnitost východního práškového oxidu hlinitého. Zrnitost byla sledována sedimentační analýzou s fotometrickou indikací a byl získán semiempirický vztah popisující zrnitost jemnějších podílů. Zrnitost lze ovlivňovat ve fázi dehydratace dodekahydrátu síranu amonno-hlinitého. Vyšší obsah nečistot v hrubších podílech práškového Al_2O_3 souvisí opět s dehydratačním procesem v první fázi tepelného rozkladu.

Úvod

Oxid hlinitý pro vysokoteplotní zpracování (syntéza monokrystalů korundu a jeho barevných odrůd a výroba polykrystalické korundové keramiky) má mít vedle požadované vysoké chemické čistoty i jisté fyzikální parametry¹⁾. Jelikož jde o práškový materiál, je jedním z těchto parametrů též zrnitost. Poža-

datky na velikost zrna práškového oxidu hlinitého, popřípadě na distribuci velikostí částic, jsou dány technologií vysokoteplotního zpracování. Tak při Verneuilově syntéze monokrystalů vedou nežádoucí velká zrna k tvorbě neprotavenin a defektů v monokrystalech, naopak velejemné podíly mají za následek vysoký rozprach materiálu²⁾. Při zpracování Al_2O_3 keramikou technologií jsou požadavky na jeho zrnitost dány zejména mechanismem slinování³⁾. Kromě toho jsou při zpracování Al_2O_3 keramikou technologií některé operace závislé na vlastnostech jako je soudrnost či přilnavost sypké hmoty, o nichž může do jisté míry vypovídat i distribuce velikostí částic^{4,5,28)}.

Oxid hlinitý se pro uvedené účely získává zpravidla termickým rozkladem dodekahydrátu síranu amonno-hlinitého $NH_4Al(SO_4)_3 \cdot 12 H_2O$. Výroba probíhá šaržovitě v křemenných miskách v muflonové peci po dobu 1 hodiny a teplotě 1050 °C. Zrnitost práškového Al_2O_3 získaného touto cestou prakticky nekolidá a bez další operace, např. třídění prášku síťováním, ji nelze ovlivnit. To vylučuje možnost regulace zrnitosti směrem k žádaným jemným podílům, používaným zejména při rozličných keramických aplikacích.

¹⁾ Předneseno na III. konferenci o oxidu hlinitém, Mezní Louka, květen 1982.