

Převzaté výzkumné a vědecké články

Experimentální vývoj vysokopotenciálního keramického zásobníku tepla pro průmyslovou energetiku

Experimental Development of a High-Capacity Ceramic Heat Storage Tank for Industrial Power Generation

Ing. Dalibor Jančar, Ph.D.¹; prof. Ing. Jozef Vlček, Ph.D.¹; Ing. Milan Raclavský, CSc.²; Ing. Radek Nikel³; Ing. Jindřich Višek⁴; Marek Chrenko⁴

¹ MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Ostrava – Vítkovice 703 00, Pohraniční 693/31, Česká republika, dalibor.jancar@mmvyzkum.cz

² Ecofer s.r.o., Oldřichovice 914, 739 61 Třinec

³ VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba

⁴ TECHNOSVAR a.s., Na Hrázi 2298, 738 01 Frýdek-Místek

Abstract

The paper deals with the development of a high-temperature ceramic thermal energy storage system intended for the accumulation of electrical energy in the form of heat at temperatures up to 1 300 °C. The main objective of the research is the design of a structurally and materially stable storage unit capable of long-term cyclic operation under extreme thermal loading while maintaining a high volumetric energy density. The proposed concept is based on high-alumina ceramic materials within the Al₂O₃-SiO₂ system, selected with respect to their thermal stability, resistance to thermal shock, and suitability for repeated high-temperature cycling. The article discusses the fundamental principles of sensible heat accumulation in solid ceramic media and analyses the influence of storage geometry on thermal losses and overall system efficiency. Special attention is devoted to the relationship between the volume-to-surface ratio and the resulting reduction of specific heat losses in large-scale storage units. The work further evaluates the material limitations of high-temperature heating elements, including FeCrAl and NiCr alloys as well as MoSi₂-based systems, and describes a two-stage heating concept consisting of a preheating chamber and a high-temperature heating section. This approach enables a more stable start-up regime and reduces thermal stress on critical components. An important part of the study is the design and realization of an experimental vertical cylindrical storage unit filled with perforated high-alumina ceramic blocks allowing controlled airflow through the storage body. The experimental device is intended for the verification of thermal gradients, charging and discharging dynamics, cyclic stability of the storage medium, and validation of numerical heat transfer models. Initial experimental results confirm the ability of the system to achieve the target operating temperatures and demonstrate stable behaviour of the ceramic accumulation medium during repeated thermal cycling. The presented concept is considered scalable for industrial applications with storage capacities ranging from units to tens of MWh. Compared with electrochemical battery systems, high-temperature thermal energy storage offers advantages in terms of service life, lower dependence on critical raw materials, and suitability for integration with high-temperature industrial technologies. The developed system therefore represents a promising solution for renewable energy storage, industrial waste heat utilization, and future decarbonized energy systems.

Key words: thermal energy storage, high-potential heat storage, heat storage tank, aluminosilicate ceramics

Abstrakt

Rozvoj obnovitelných zdrojů energie zvyšuje požadavky na efektivní systémy dlouhodobé akumulace energie schopné pracovat ve vysokoteplotním režimu. Příspěvek se zabývá vývojem experimentálního keramického zásobníku tepla určeného pro ukládání elektrické energie ve formě citelného tepla při teplotách až 1 300 °C. Systém je tvořen vysokoteplotním akumulacním sloupcem umožňujícím řízené proudění vzduchu skrz keramickou výplň. Článek se zaměřuje na materiálové limity vysokoteplotního provozu, geometrii akumulacního prostoru, dynamiku šíření teplotního pole a problematiku tepelných ztrát. Diskutovány jsou rovněž vlastnosti topných elementů pro provoz nad 1200 °C a význam dvoustupňového systému ohřevu. Součástí práce je popis experimentálního zařízení určeného pro validaci numerických modelů a ověření stability akumulacního média při cyklickém tepelném zatěžování. Výsledky potvrzují vhodnost navržené koncepce pro budoucí průmyslové aplikace v oblasti akumulace energie, využití odpadního tepla a dekarbonizace energeticky náročných provozů.

Klíčová slova: skladování tepelné energie, vysokopotenciální akumulace tepla, zásobník tepla, hlinito-křemičitá keramika

1. Úvod

Současná transformace energetiky vede k rychlému rozvoji obnovitelných zdrojů energie, jejichž výroba je však výrazně závislá na okamžitých klimatických podmínkách. Rostoucí podíl fotovoltaických a větrných elektráren proto zvyšuje požadavky na systémy akumulace energie schopné vyrovnávat krátkodobé i dlouhodobé výkyvy výkonu elektrizační soustavy. Vedle elektrochemických úložišť se proto stále výrazněji prosazují systémy akumulace energie ve formě tepla (Thermal Energy Storage, TES) [1], [2]. Zásadní výhodou vysokoteplotní akumulace je možnost zvýšení termodynamického potenciálu následného využití energie [3]. Teoretická účinnost zpětné přeměny tepla na mechanickou práci je dána Carnotovým vztahem:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}}} \quad (1) \quad (1)$$

kde: T_{hot} je absolutní teplota horního tepelného rezervoáru (K)
 T_{cold} - absolutní teplota spodního tepelného rezervoáru (obvykle teplota okolí nebo chladicího média) (K)

Zvýšení horní teploty akumulace tedy přímo zvyšuje teoretickou účinnost následné konverze. Z tohoto důvodu je vývoj zaměřen na zařízení schopná dlouhodobého provozu při teplotách přesahujících 1000 °C. Cílem práce je návrh a experimentální ověření vysokopotenciálního keramického zásobníku tepla určeného pro akumulaci elektrické energie ve formě citelného tepla při provozních teplotách až 1300 °C.

2. Termodynamické aspekty vysokoteplotní akumulace

Významnou výhodou vysokoteplotních zásobníků je možnost dosažení vysoké hustoty uložené energie a současně přímé využití tepla v průmyslových procesech. Množství akumulované energie v pevném médiu lze obecně vyjádřit vztahem:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (J) \quad (2)$$

kde: m je hmotnost akumulacního materiálu (kg)
 c_p - měrná tepelná kapacita akumulacního materiálu při konstantním tlaku ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 Δt - teplotní rozsah, ve kterém je zásobník provozován (K)

Pro vysocehlinité keramické materiály na bázi systému $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ se hustota (objemová hmotnost) pohybuje v rozmezí $2500 - 3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a měrná tepelná kapacita přibližně $900 - 1100 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [4]. Při provozních teplotách kolem $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ je tak možné dosáhnout velmi vysoké objemové hustoty akumulované energie.

Při provozním teplotním rozsahu přibližně $200\text{-}1300 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahuje měrná akumulovaná energie vysocehlinité keramiky hodnoty řádově $0,3 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zásobník obsahující desítky tun akumulací hmoty tak umožňuje ukládání energie v řádu desítek MWh, což jej řadí mezi středně velká průmyslová energetická úložiště.

Pro konstrukční návrh je však klíčové nejen samotné množství akumulací hmoty, ale také minimalizace tepelných ztrát. Pro radiální vedení tepla ve válcovém zásobníku lze tepelný tok aproximovat vztahem [5]:

$$P = \frac{2\pi l(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (\text{W}) \quad (3)$$

| | | | |
|------|-----------|----|--|
| kde: | l | je | výška zásobníku (m) |
| | λ | - | teplotně závislý součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) |
| | t_1 | - | vnitřní teplota ($^\circ\text{C}$) |
| | t_2 | - | vnější teplota ($^\circ\text{C}$) |
| | r_1 | - | vnitřní poloměr (m) |
| | r_2 | - | vnější poloměr (m) |

Z uvedené rovnice vyplývá zásadní konstrukční poznatek: s rostoucím průměrem zásobníku klesají měrné ztráty vztažené na jednotku uložené energie výrazně rychleji, než roste absolutní hodnota tepelných ztrát. Tento efekt je dán geometrickým poměrem objemu k povrchu a má zásadní dopad na ekonomiku velkokapacitních zařízení.

3. Materiálové aspekty akumulací média

Koncepce vysokopotenciálního zásobníku tepla částečně vychází z historicky ověřených principů regenerativních ohříváčů větru vysokých pecí, kde keramické mřížoví slouží jako akumulací médium [6]. Geometrie průduchů je navržena jako kompromis mezi tlakovou ztrátou a velikostí teplosměnné plochy. Akumulací médium je tvořeno vysocehlinitou keramikou s optimalizovaným fázovým složením, zejména s vyšším podílem mullitu a korundu. Volba materiálu byla podmíněna následujícími požadavky:

- dlouhodobá stabilita při teplotách nad $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,
- odolnost vůči cyklickému tepelnému namáhání,
- odolnost vůči proudícímu vzduchu,
- příznivá kombinace hustoty a tepelné kapacity.

Nevhodné se ukázaly materiály s vyšším obsahem polymorfních forem SiO_2 (obsah cristobalitu a tridimitu), u nichž dochází při teplotních přechodech k výrazným objemovým změnám v důsledku fázových transformací. Tyto transformace generují lokální napěťové koncentrace a mohou vést k degradaci akumulací struktury. Jako nevhodné byly vyhodnoceny rovněž magneziové žárovzborné materiály [4].

Přestože vykazují vysokou objemovou tepelnou kapacitu, jejich relativně vysoký součinitel lineární teplotní roztažnosti vede při cyklickém zatěžování k významnému nárůstu teplotně indukovaných napětí.

Nízká odolnost proti tepelnému šoku je zde přímým důsledkem této vysoké roztažnosti v kombinaci s mechanickou tuhostí materiálu. V podmínkách vysokopotenciální akumulace by tak mohlo docházet k výrazným dilatačním deformacím akumulárního zdiva, k tvorbě trhlin a ke ztrátě geometrické stability konstrukce.

Akumulační část je proto tvořena soustavou děrovaných keramických tvarovek uspořádaných ve vertikálním sloupci, což umožňuje efektivní přenos tepla mezi proudícím médiem a keramickým tělesem.

4. Konstrukční řešení vysokoteplotního ohřevu

Z konstrukčního hlediska představuje nejkritičtější část zařízení otopná soustava. Při požadovaných teplotách nad 1200 °C dochází k výraznému omezení použitelného spektra materiálů.

Posuzovány byly zejména:

- slitiny FeCrAl,
- slitiny NiCr,
- intermetalická sloučenina MoSi₂,
- keramické elementy na bázi Si.

Slitiny FeCrAl umožňují provoz do cca 1400 °C, avšak vykazují zvýšenou křehkost po dlouhodobém vystavení vysokým teplotám.

Slitiny NiCr si zachovávají vyšší plasticitu, jejich nevýhodou je však vysoký obsah niklu a s tím spojená ekonomická rizika.

Intermetalická sloučenina MoSi₂ umožňuje provoz až do 1800 °C, avšak vykazuje výraznou teplotní závislost elektrického odporu. Poměr odporu při pokojové teplotě a při pracovní teplotě může dosahovat až 1:10, což zásadně komplikuje startovací režim a regulaci výkonu. Na základě těchto skutečností je možno zvažovat dvoustupňovou topnou koncepci:

1. předehřevová komora (do cca 800 °C),
2. vysokoteplotní dohřevová komora (nad 1200 °C).

Toto řešení umožňuje snížení teplotního namáhání jednotlivých komponent a zlepšení regulačních vlastností celého systému.

5. Dynamika proudění a šíření teplotního pole

Konstrukce zásobníku vychází ze sloupcového uspořádání akumulárních tvarovek, přes které proudí vzduch. Během nabíjení dochází k šíření teplotní vlny směrem od vstupu horkého média ke spodní části zásobníku. Limitujícím parametrem je výstupní teplota vzduchu z dolní části zásobníku, která musí zůstat v mezích bezpečných pro ventilátor a další navazující technologii. Poměr výšky k průměru (h/d) se ukázal jako klíčový parametr.

Nízký poměr h/d vede k vyšším relativním ztrátám a omezuje podobnost modelového zařízení s průmyslovým řešením. Naopak štíhlá koncepce umožňuje lépe simulovat reálné provozní podmínky.

Při návrhu vysokoteplotních zásobníků je důležité zohlednit také rychlost šíření teplotní fronty v akumulačním médiu. Orientačně lze rychlost prostupu teplotní vlny vyjádřit součinitelem teplotní vodivosti akumulacních tvarovek:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (4)$$

kde: λ je součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 ρ - objemová hmotnost ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 c_p - měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

6. Tepelně-technické aspekty izolačního systému

Izolace je řešena vícevrstevným systémem vláknitých rohoží a desek s referenční teplotou 1300 – 1400 °C. Návrh izolačního systému vysokoteplotního zásobníku musí zohledňovat teplotní závislost tepelně-technických vlastností použitých materiálů a jejich vliv na celkové tepelné ztráty zařízení [7].

Výsledky ukazují, že technicky nejvýhodnější varianta izolace nemusí být ekonomicky optimální. U velkokapacitních zásobníků se rozdíl mezi jednotlivými variantami z hlediska tepelných ztrát relativně snižují, zatímco investiční náklady mohou výrazně růst. Měrné náklady vztažené na jednotku uložené energie s rostoucím průměrem zásobníku klesají. Tento efekt podporuje koncepci větších průmyslových jednotek oproti menším modulárním řešením.

7. Potenciál průmyslového využití systému

Vysokopotenciální akumulované teplo lze využít:

- pro zpětnou výrobu elektřiny [8],
- pro napájení průmyslových vysokoteplotních procesů,
- pro termochemické transformace odpadů,
- pro výrobu syntézního plynu a následně metanolu,
- pro vysokoteplotní elektrolýzu vody.

Ve srovnání s bateriovými systémy nabízí vysokoteplotní akumulace delší životnost, nižší materiálovou náročnost a vyšší energetický potenciál na jednotku objemu při průmyslovém měřítku.

8. Pilotní vysokoteplotní akumulační jednotka

Na základě uvedených konstrukčních a materiálových analýz bylo navrženo a realizováno experimentální zařízení vysokopotenciálního akumulátoru tepla („Žárojem“). Zařízení je koncipováno jako vertikální válcová jednotka o výšce přibližně 6 m, tvořená sloupcem děrovaných vysocehlinových keramických tvarovek (viz **obr. 1**). Otopná soustava je řešena dvoustupňově s oddělením přehřevové a vysokoteplotní části, což umožňuje řízený náběh do provozních teplot a omezení teplotního namáhání jednotlivých komponent.

Experimentální jednotka je dimenzována na akumulaci energie přibližně 125 kWh při provozním teplotním rozsahu cca 200–1300 °C.

Zařízení slouží primárně k ověření materiálového chování, teplotních gradientů, dynamiky nabíjení a validaci numerického modelu. Konstrukce umožňuje řízené proudění vzduchu skrz akumulací těleso a sledování teplotního pole v průběhu nabíjení a vybíjení. Zařízení je v současné době ve fázi experimentálního testování.

Probíhá ověřování stability topných elementů při cyklickém provozu a verifikace energetické bilance systému. První výsledky potvrzují dosažitelnost projektovaných provozních teplot a stabilitu akumulací média při cyklickém zatěžování.

Navržená koncepce je však konstrukčně škálovatelná a při navýšení průměru a množství akumulací hmoty umožňuje dosažení kapacit v řádu jednotek až desítek MWh pro průmyslové aplikace.



Obr. 1 Experimentální vysokoteplotní akumulací jednotka a keramická akumulací tvarovka
Fig. 1 Experimental High-Temperature Heat Storage Unit and Ceramic Heat Storage Fitting

9. Závěr

Experimentální vývoj vysokopotenciálního keramického zásobníku tepla potvrdil technickou realizovatelnost akumulace energie při teplotách přesahujících 1200 °C. Výsledky ukazují, že kombinace vysocehlinitých keramických materiálů, vertikální geometrie zařízení a dvoustupňové koncepce ohřevu představuje vhodné řešení pro dlouhodobý cyklický provoz.

Zásadním poznatkem je výrazný vliv geometrického měřítka na měrné tepelné ztráty a ekonomiku zařízení. S rostoucím objemem zásobníku dochází ke zlepšení poměru akumulované energie vůči tepelným ztrátám, což podporuje využití této technologie zejména u středních a velkých průmyslových jednotek.

Vysokopotenciální akumulátor tepla tak může představovat nový konstrukční prvek spojující energetiku, hutnictví a procesní průmysl v kontextu dekarbonizace a transformace energetických soustav. Další vývoj bude zaměřen na optimalizaci proudění média, numerickou simulaci teplotního pole a dlouhodobé testování stability topných elementů při opakovaném tepelném cyklování.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu č. TS01020110 „Výzkum a vývoj vysokopotenciálního akumulátoru tepla“ a dále za podpory projektu „Institucionální podpora dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2026“, poskytované Ministerstvem průmyslu a obchodu.

„Originál tohoto článku byl publikován ve sborníku konference Oceláři 2026 a jeho modifikovaná verze je zde uveřejněn se souhlasem autora.“

Literatura

- [1] MITALI, J, DHINAKARAN, Shanmugam, MOHAMAD, Abdulmajeed. Energy storage systems: a review. *Energy Storage and Saving*. 2022, 1(3), 166-216. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>.
- [2] VLČEK Jozef, NIKEL, Radek, RACLAVSKÝ, Milan, VÍŠEK, Jindřich. Akumulace tepelné energie. In *Sborník přednášek z konference Hutní keramika*. 5. - 6. 11. 2024, Rožnov pod Radhoštěm. Ostrava: Tanger, 2024, p. 98 - 102. ISBN 978-80-88365-22-8.
- [3] GIL, A, MEDRANO, M, MARTORELL, I, LÁZARO, A, DOLADO, P, ZALBA, B, CABEZA, L, F., State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. 2010, 14(1), 31-55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>.
- [4] SCHACHT, CH. Refractories Handbook. 2004. ISBN-13: 9780824756543.
- [5] TALER, J., DUDA, P. *Solving Direct and Inverse Heat Conduction Problems*. Berlin: Springer, 2006. ISBN 978-3-540-33470-5.
- [6] KRÓL, L. Konstrukcja i urządzenia wielkiego pieca. Ślask. 1989.SBN 83-216-0809—4.
- [7] SANTOS, M.F, MOREIRA, M.H., CAMPOS, M.G.G., PELISSARI, P.I.B.G.B, ANGÉLICO, R.A., SAKO, E.Y, SINNEMA, S, PANDOLFELLI, V.C. Enhanced numerical tool to evaluate steel ladle thermal losses. 2018. 44 (11), 12831-12840. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.092>.
- [8] DURCANSKÝ, Peter, NOSEK, Radovan a JANDACKA, Jozef. Use of Stirling Engine for Waste Heat Recovery. *Energies*. 13(16). June 2020. doi:10.3390/en13164133.

INFORMATIVNÍ ČLÁNEK

Hyundai Steel a POSCO investují do nového integrovaného závodu v USA

4. května 2026

Korejské společnosti Hyundai Steel a POSCO pokračují v přípravách rozsáhlého investičního projektu výstavby nového integrovaného hutního závodu v americkém státě Louisiana. Projekt je realizován prostřednictvím společného podniku HYUNDAI-POSCO Louisiana Steel LLC a představuje jednu z největších současných investic korejského ocelářského průmyslu v Severní Americe.

Kapacita závodu má dosahovat přibližně 2,7–2,9 milionu tun oceli ročně, přičemž významná část produkce bude určena pro automobilový průmysl v Severní Americe. Závod je navržen jako „hydrogen-ready“, což umožní postupný přechod k nižším emisím CO₂ a případné využití vodíku v procesu přímé redukce.

Investice ve výši přibližně 5,8 miliardy USD patří mezi klíčové projekty transformace ocelářské výroby směrem k nízkoemisním technologiím mimo tradiční vysoké pece.

Originál článku naleznete zde: danieli.com