

# **Aplikace technologie horkých trubíc k využití odpadního tepla ve válcovnách, kovárnách a slévárnách - teoretický rozbor**

## **Applications of Heat Pipes Technology for Utilization of Waste Heat in the Rolling Mills, Forging Shops and Foundry Plants – Theoretical analysis**

**Ing. Pavel Szturc, Ph.D., ForSTEEL,s.r.o., Ing. Zdeněk Vomočil, Ph.D., VÍTKOVICE MECHANIKA,s.r.o.**

### **Abstrakt**

*Odpadní teplo ze spalin je dnes často vypouštěno do atmosféry. Technologie horkých trubíc nabízí přeměnu tohoto nevyužitého zdroje tepla do využitelné formy energie. Takto zachycené teplo může být využito v řadě aplikací v závislosti na požadavcích výrobního procesu – například k vytápění budov a výrobních hal, předehřevu spalovacího vzduchu, ohřevu užitkové vody, přeměně tepla na páru a v neposlední řadě k výrobě elektrické energie atd. Všechny tyto postupy v konečném důsledku přispívají k ekonomické úspoře. Společnost VÍTKOVICE je provozovatelem energetických agregátů s vysokou energetickou náročností a plně si uvědomuje nutnost využití všech zdrojů ke snížení provozních nákladů a zvýšení efektivity výroby. Společnost ForSTEEL, s.r.o. se angažuje v oblasti využití odpadního tepla a využití technologie horkých trubek v hutním průmyslu. Proto obě společnosti spojily své síly v pilotním projektu využití odpadního tepla na kovárně.*

### **Abstract**

*The heat pipe technology recovers the waste heat from flue gases now vanishing into the atmosphere and converts it into useable energy. This recovered heat may then be utilized in several different applications depending on process requirements. Heat for buildings, the pre-heating of combustion air, preheating of water, and heat converted to steam to power a standard steam-driven electrical generator are a few examples. All of these processes reduce boiler and/or burner run time which save money. VITKOVICE operates a lot of power devices with great intensity and this company is aware of necessity of production cost reduction and increase production efficiency. ForSTEEL, Ltd. is engaged in the area of utilization of waste heat and introduction of heat pipe technology into metallurgical industry. For this reason both above mentioned companies have joined forces in the pilot project for utilization of waste heat within forging shop.*

## **1. Úvod**

Využití odpadního tepla spalin patří v současné době k nejdiskutovanějším tématům v oblasti energetického hospodářství hutí. Jedná se nejen o ekonomickou otázku nadměrného spalování zemního plynu v důsledku nevhodnosti využívání získaného tepla, ale i o ekologické důsledky způsobené zvýšeným množstvím emisí. Existuje reálná obava, že nadměrným spalováním uhlíku může dojít k narušení rovnováhy systému planety a podle některých studií právě emise oxidu uhličitého produkované průmyslem způsobují skleníkový efekt a z toho vyplývající vzrůstání teploty povrchu Země.

Ztráta tepla odcházejícími spalinami (komínová ztráta) tvoří u plynových pecí, stejně jako u všech typů plynových spotřebičů, největší ztrátovou položku. Podíl na celkových ztrátách pecí v hutnictví je však značně

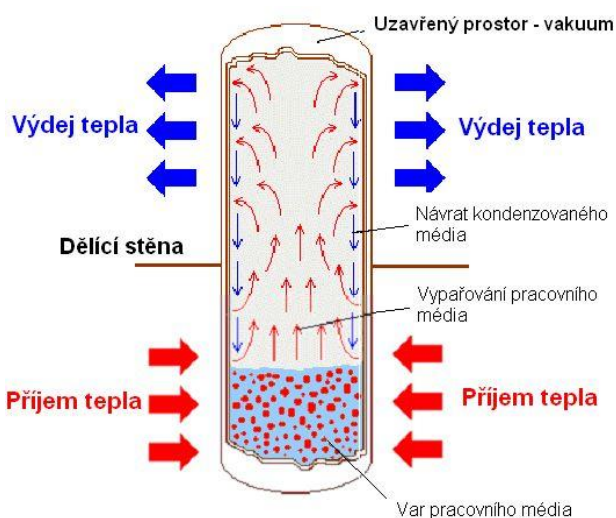
vyšší než u ostatních plynových spotřebičů a dosahuje až 70% celkového tepla oproti 10 až 15 % v případě plynových kotlů. Tento rozdíl je způsoben vysokými teplotami v pracovním prostoru pecí, při kterých probíhají technologické procesy. Pro možnost snížení ztráty tepla pecí odcházejícími spalinami se používají výměníky tepla (rekuperátory a regenerátory), které ohřevem spalovacího vzduchu teplem odcházejících spalin tuto ztrátu snižují a zvyšují tak účinnost využití paliva.

K využití tepelné kapacity spalin je možné aplikovat v současné době technologie, které v minulosti při nízkých cenách energie nebyly ekonomicky rentabilní. Účinné použití klasických výměníků tepla je možné pouze v provozech, ve kterých teplota odcházejících spalin dosahuje na vstupu do výměníku určité limitované hodnoty. Je to dáno konstrukcí výměníku resp. použitými materiály nebo účinností teplotní

výměny. Pro procesy, ve kterých vznikají spaliny o nižší teplotě, nebo ve kterých je naopak teplota spalin i na výstupu z klasického výměníku ještě vysoká, lze použít nový systém výměníku tepla na principu tepelných trubíc (HEAT PIPE TECHNOLOGY – HPT). S ohledem na skutečnost, že tato technologie nebyla v oblasti metalurgických provozů v minulosti téměř vůbec využívána, je tato problematika předmětem tohoto článku.

## 2. Princip HPT k využití odpadního tepla

HPT výměníky pracují na odlišném principu než klasické výměníky. HPT slouží k přenosu tepla z jednoho místa na druhé za pomoci par pracovní látky. Hlavní částí těchto výměníků jsou hermeticky uzavřené tepelné trubice, které představují samostatný tepelný okruh. Jeden konec trubice je ohříván médiem, které své teplo předává (např. spaliny) a druhý konec naopak předává teplo chladicímu médiu (např. předehříváný vzduch, topná voda, předehříváný spalovací vzduch apod.). Obě oblasti jsou odděleny přepážkou tvořenou dělicí stěnou, kterou trubice procházejí. Pracovní látka uzavřená uvnitř trubice se na ohřívání straně vlivem teploty odcházejících spalin odpařuje a na druhé straně předává teplo uvolněné svou kondenzací do ohřívání média – viz Obr. 1.



Obr.1 Schéma principu výměny tepla u HPT  
Fig.1 – Scheme of the heat exchanging in HPT

Spodní část trubice, tzv. výparná část, je zahřívána a po dosažení teploty, na kterou je trubice nastavena, se začne pracovní kapalina odpařovat. K vlastnímu odpaření pracovního média je nutné dodat tepelnou energii z proudících horkých spalin. Takto vzniklá plynná směs stoupá směrem vzhůru do tzv. kondenzační

části, kde na plášti trubice zkondenzuje a tím uvolní výparné teplo, které bylo kapalině uděleno při vypařování. Toto teplo je přes stěnu trubice předáváno chladnějšímu médiu, které je tímto způsobem ohříváno. Spaliny a ohřívání média jsou od sebe odděleny dělicí stěnou, která zabraňuje vzájemnému přímému kontaktu.

Pracovní teplota, při které pracovní médium dosáhne teploty varu, je v přímé závislosti na velikosti tlaku uvnitř tepelné trubice. Jako pracovní látku lze použít i vodu, která vykazuje značnou hodnotu výparného tepla (na odvedení srovnatelného tepla se jí odpaří oproti ostatním používaným kapalinám velmi málo). Přehled nejčastěji používaných pracovních látek a jejich pracovních teplot je uveden v tabulce 1.

Pracovní látka	Rozsahy teplot [°C]	Bod varu při atm. tlaku [°C]
Dusík	-200 ÷ -170	-196
Čpavek	-70 ÷ 50	-33
Freon 12	-60 ÷ 40	-30
Methanol	-30 ÷ 100	65
Voda	10 ÷ 200	100
Rtuť	190 ÷ 500	356
Draslík	400 ÷ 800	760
Sodík	500 ÷ 900	883
Lithium	900 ÷ 1500	1330

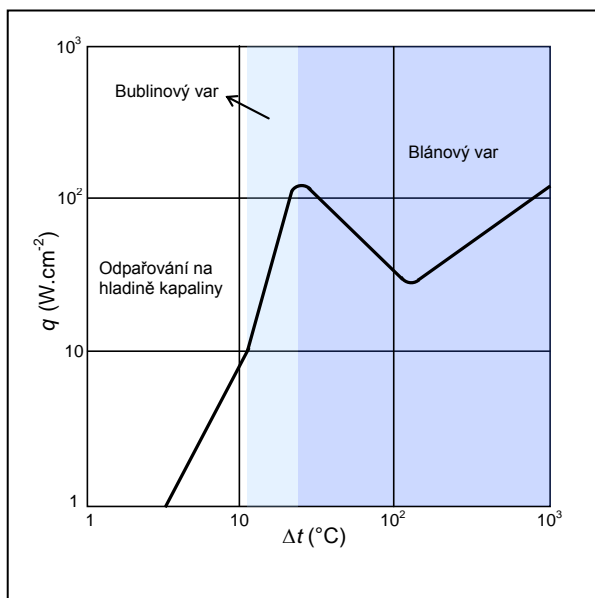
Tab. 1. Nejčastěji používaná média pro tepelné trubice  
Tab. 1 The most used medium for heat pipes

## 3. Sdílení tepla konvekcí při změně skupenství kapalného v plynné

Sdílení tepla za současné změny skupenství hmoty je fyzikálně složitější děj než konvekce bez změny skupenství teplotonosné tekutiny. Podle změny skupenství rozlišujeme sdílení tepla při změně skupenství kapalného v plynné, tj. sdílení tepla při vypařování a varu nebo sdílení tepla při změně skupenství plynného v kapalném, tj. sdílení tepla při kondenzaci.

Oba tyto případy sdílení tepla jsou realizovány v tepelné energetice. Podle toho, na kterém místě a při jaké teplotě dochází ke změně skupenství kapalného v plynné, rozlišujeme následující typy:

- odpařování na hladině kapaliny,
- bublinkový var,
- blánový var.



Obr. 2 Stádia vypařování v- kapalně [1]  
Fig.2 Stages of liquid's evaporation [1]

Tři stupně vypařování jsou zjevné na obr. 2, který znázorňuje rozdíl teplot mezi vnitřním povrchem nádoby a povrchem odpařující se kapaliny uvnitř nádoby jako funkci vstupní hustoty tepelného toku. V prvním stupni (odpařování na hladině kapaliny) je vstupujícího tepla právě tolik, aby způsobilo vypařování z povrchu kapaliny. Ve druhém stupni (bublinový var) vznikají bubliny par uvnitř tekutiny a stoupají k hladině. Ve třetím stupni (blánový var), kdy rozdíl teplot stále stoupá, mají jednotlivé bubliny sklon k tvorbě filmu, který pokrývá celý nebo velké části povrchu (počáteční klesající část křivky odpovídá částečnému blánovému varu). Počátek blánového varu reprezentuje kritickou vstupní hustotu tepelného toku, která nemůže být překročena bez poškození nádoby.

### 3.1 Odpařování na hladině kapaliny

Odpařování na hladině kapaliny je změna skupenství kapalného v plynné na rozhraní kapalné a plynné fáze hmoty. Zahříváme-li kapalinu, roste tlak sytých par. Difúze páry z hladiny kapaliny do plynného prostředí nad hladinou probíhá i za nižších teplot než je teplota varu (teplota změny skupenství). Teplota varu je teplota, při které se tlak syté páry rovná tlaku působícímu na kapalinu. Teplota varu kapaliny je závislá na tlaku plynného prostředí působícího na hladinu kapaliny, který je výsledkem rozdílu parciálních tlaků syté páry na hladině kapaliny a přehřáté páry uvnitř uzavřené nádoby ( trubice).

Při fázové přeměně kapaliny v páru, je spotřebováno výparné teplo, které se odnímá kapalině, jež v důsledku toho vykazuje v blízkosti hladiny pokles teploty.

Má-li být teplotní pole kapaliny časově stálé, je nutno přivést kapalině z vnějšího prostředí stěnami nádoby (trubice) právě tolik tepla, kolik bylo odvedeno z hladiny kapaliny v důsledku odparu. Teoreticky, pokud by stěny nádoby byly ideálně tepelně izolovány, ustálí se teplota hladiny kapaliny na takové hodnotě, při níž teplo odvedené z hladiny kapaliny odparem je rovno teplu, přivedenému konvekci k hladině z prostředí o vyšší teplotě.

### 3.2 Var na teplosměnné ploše

Var na teplosměnné ploše je změna skupenství kapalného v plynné při teplotě změny skupenství, přičemž teplota výhřevné plochy je větší než teplota změny skupenství. V důsledku teplotního rozdílu těchto dvou teplot proudí ve smyslu II. zákona termodynamiky z výhřevné plochy do kapaliny teplo, jež se spotřebovává na změnu skupenství kapalného v plynné.

### 3.3 Kondenzace na teplosměnné ploše

Při kondenzaci par, na chladné stěně nádoby (trubice), se uvolní stejné množství tepla, jako při odpaření kapaliny (varu). Podle II. věty termodynamické přechází toto teplo přes stěnu nádoby (trubice) do prostředí chladnějšího. Zkondenzovaná kapalina stéká do spodní části trubice, kde dochází k novému odpaření a proces se opakuje.

## 4. Praktické výhody rekuperátorů HPT

Základní výhody rekuperátorů, používajících systém tepelných trubíc, jsou proti klasickým výměníkům dosti značné. Vyplyvají z jejich konstrukce a výše definovaných vlastností tepelných trubíc (několikanásobně větší měrná tepelná vodivost než u měděné tyče stejných rozměrů). Po dosažení pracovní teploty tepelné trubice udržují velmi malý rozdíl teplot (čím větší je uvnitř tlak, tím snáze dochází ke kondenzaci). Změnou pracovního média a nastavením vnitřních parametrů při výrobě trubice je určen pracovní teplotní rozsah trubice, teoreticky pro velmi širokou škálu teplot. Nižší tlak uvnitř trubice posouvá var pracovní kapaliny k nižším teplotám, což umožňuje tento systém použít i při nižších teplotách odcházejících spalin. Nebo naopak volbou vhodného média (např. draslíku, sodíku, lithia), lze využívat i spaliny s velmi vysokou teplotou, kde by již klasické výměníky byly nefunkční.

Vysoká spolehlivost systému pro využití odpadního tepla plyne z absence pohyblivých částí, bez použití žebrování na straně spalin. Lze tak systém použít i pro znečištěné spaliny a nedochází k zanášení. Celkově je

možno shrnout výhody použití HPT rekuperátorů oproti klasickým rekuperátorům do následujících bodů:

- vysoká účinnost přestupu tepla,
- možnost využití nízkoteplotních odpadních spalin,
- rychlá návratnost investice,
- minimální provozní náklady,
- absence pohyblivých dílů,
- vysoká spolehlivost systému,
- snadná údržba a čištění (vyměnitelné části),
- rovnoměrné rozložení teploty (minimální efekt teplotních dilatací a minimalizace koroze),
- menší rozměry, než klasické rekuperátory.

Další možnosti použití tepelných trubíc jako výměníků tepla lze využít především v následujících oblastech:

- předehřátí spalovacího vzduchu,
- vytápění pracovních hal,
- výroba elektrické energie,
- rekuperace tepla v systémech pracujících při nízkých teplotách.

## 5. Pilotní projekt HPT ve VÍTKOVICÍCH

Na základě podrobného literárního přehledu ve světě používaných technologií v oblasti využívání odpadního tepla, respektive podrobné analýzy možností uplatnění technologie HP, byla v první fázi výtíkována varianta využití odpadního tepla pro ohřev teplé užitkové vody v kombinaci s vytápěním výrobních hal v zimním období.

Pro využití odpadního tepla s využitím HPT byl v roce 2007 proveden celkový rozbor u všech pecních agregátů ve společnosti VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., používaných jak pro technologické ohřevy materiálu, tak pro tepelné zpracování výrobků Kovárny NS 340. Rozbor byl zaměřen na získání parametrů jednotlivých spotřebičů s ohledem na možné využití odpadního tepla. Na základě této analýzy jsou výtíkovány kovářské pece č. 8 a 9 se společným odtahovým kanálem, u které byla navržena možnost napojení výměníku. Následně bylo zajištěno zpracování projektové dokumentace pilotního zařízení.



Obr. 4 Pohled na kovářskou pec č. 8 a 9  
Fig. 4 View across the forging furnace No. 8 and 9

Hlavním cílem pilotního projektu je využití zbytkového odpadního tepla (po klasickém rekuperátoru) k ohřevu užitkové vody a sezónnímu vytápění výrobní haly. Vedle prokazatelných ekonomických úspor je nutné poukázat i na snižování emisí CO<sub>2</sub>. Teplo, získané z kominového odtahu, umožní snížení emisí CO<sub>2</sub> a tím se usnadní plnění emisních limitů. Návratnost podobných zařízení se přitom podle odhadů ekonomického úseku pohybuje kolem jednoho až dvou let od uvedení do činnosti.

## 6. Závěr

Předložený teoretický rozbor problematiky technologie HPT nastínil potenciál možností použití tepelných trubíc především v oblasti hutních provozů. S ohledem na skutečnost, že jsou tepelné trubice schopny s vysokou účinností pracovat i při nižších teplotách odcházejících spalin, je možné je zařadit až za klasický rekuperátor a tím ještě dále posunout využití zbytkového odpadního tepla a zvýšit energetické úspory.

Autoři připravují další příspěvky, v nichž bude pozornost věnována konkrétním aplikacím HPT ve světě a detailnímu popisu provedených prací v rámci prvního pilotního projektu v ČR – využití odpadního tepla u kovářské pece ve společnosti VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s.

### Literatura

1. G.Yale Eastman, The Heat Pipe, Scientific American – May 1968, vol. 218, No.5
2. Study of the Heat of Reversible Adsorption at The Air-Solution Interface, Vochten et al, Journal of Colloid and Interface Science, vol. 42, No. 2, Feb., 1973, pp. 320-327.
3. Dean, N., Energy Efficiency in Industry, Environmental Law Institute, 1st Edition, 1980.
4. Kiang, Y., “Waste Energy Utilization Technology”, Energy, Power and Environment Series, Vol. 10, 1st Edition, 1981.
5. Goldstick, R., & Thumann, A., “Principles of Waste-heat Recovery”, Fairmont Press, 1st Edition, 1986.
6. Noskievič J., Mechanika tekutin, Praha, SNTL 1987

7. Pool boiling of a non-azeotropic binary mixture under microgravity, Abe et al, Int. Journal of Heat & Mass Transfer, vol. 37, No. 16, pp. 2405-2413, 1994.
8. ASHRAE, 1996 HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigeration and Air- Conditioning Engineers, Inc. Handbook, Series, 1996.
9. Effects of gravity on the boiling of binary fluid mixtures, Ahmed et al, Intl. Journal of Heat & Mass Transfer, vol. 41, No. 16, pp. 2469-2483, 1998.
10. Mechanisms of Convection Instability in Thin Liquid Layers Induced by Evaporation, Zhang et al, Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol. 26, No. 8, pp. 1069-1080, 1999.
11. Sikora K., Bakalářská práce, VŠB-TU, 2008

*Tento příspěvek byl zpracován v rámci grantového projektu MPO, program IMPULS, registrační číslo projektu – FI-IM3/165, název projektu – Komplexní snižování měrných emisí CO<sub>2</sub> při výrobě oceli.*