

# Ochlazování výlisků prouděním vzduchu

## Pressed pieces cooling by air flow

Ing. Václav ŠIMÁNEK  
C-Klima PRAHA s.r.o.

*Příspěvek informuje o chlazení teplých hliníkových výlisků proudícím vzduchem. Je uveden praktický příklad výpočtu včetně ověření na modelu, následné realizace i závěrečných provozních zkoušek.*

**Klíčová slova:** chlazení vzduchem, přenos tepla, hliník, experiment.

Recenzent  
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

*The contributions brings information about cooling of warm aluminium pressings by air flow. A practical example of calculation is indicated including verification on model, subsequent implementation and also the final operational tests.*

**Key words:** cooling by air, heat transfer, aluminium, experiment

Výrobce hliníkových profilů se rozhodl nahradit stávající vodní chlazení teplých výlisků novým chlazením proudícím vzduchem. Zpracovatel řešení byl postaven před úkol navrhnout vzduchové chladicí zařízení. Toto zařízení vyrobit, instalovat a při provozních zkouškách prokázat splnění všech zadaných parametrů.

### 1. ZADÁNÍ

Hliníkové profily jsou vyráběny za tepla protlačováním přes matici. Z protlačovacího lisu vystupuje hotový profil, jehož začátek je uchopen vytahovacím vozíkem a tažen po válečkové trati. Délka výlisku je volitelná až do rozměru 50 m.

Za výstupem z lisu je nutno zchladit pohybující se horký profil. Zchlazením se předejde tvarové deformaci výlisku a rovněž se sníží tepelné namáhání válečkové tratě, po které se vyráběné profily pohybují.

Zadání bylo přesně definováno pro čtyři rozměrově odlišné trubky, pro čtyři různé veliké teplotní spády ochlazení a pro čtyři různé lisovací rychlosti (pohyb výlisku na trati).

Pro umístění vzduchového chlazení byla za lisem k dispozici zóna dlouhá 11 m. Součástí zadání byla rovněž podmínka, že hluk způsobený vzduchovým chlazením nesmí v místě obsluhy tratě překročit hodnotu 83 dB.

Ze zadaných parametrů byl pro výpočty vybrán nejméně příznivý případ chlazení trubky o vnějším průměru 56 mm a síle stěny 3 mm. Zadaná rychlost lisování je 20 m/min., v chladicí zóně musí být trubka ochlazena o 150 K. Teplota profilu vystupujícího z lisu je 500 °C, materiál je hliník o čistotě minimálně 99,0 %. Pro tento konkrétní případ byly provedeny teoretické výpočty.

### 2. TEORETICKÁ PŘÍPRAVA ŘEŠENÍ

Již na začátku řešení bylo rozhodnuto, že teoretické výsledky budou nejprve experimentálně ověřeny a teprve následně bude vyrobeno a dodáno chladicí zařízení.

V první fázi řešení bylo pro výpočet použito několik teorií, z nichž byla nakonec jako nejpravděpodobnější vybrána metoda dle Kutateladzeho [1].

K výpočetnímu zjednodušenému postupu byla použita ruční kalkulačka. Mezi zjednodušení lze zařadit zanedbání sálavé složky sdílení tepla, používání

středních hodnot teplot, rychlostí, tepelné vodivosti atd. Výsledky výpočtů lze považovat pouze za přibližné a byly určeny jako podklad pro ověřovací experimenty.

Pro příčné obtékání trubky byla, při výpočtu přenosu tepla konvekcí, použita kritéria podobnosti Re, Nu, Pr a především výpočtový vztah podle [1]

$$Nu = C \cdot Pr^{0,35} \cdot Re^m \quad (1)$$

Hodnoty součinitelů  $C$  a  $m$  závisí na tvaru obtékané tyče (trubky) a na velikosti čísla Re pro které platí vztah

$$Re = \frac{w_0 \cdot d_1}{\nu}$$

$d_1$  [m] vnější průměr trubky  
 $w_0$  [m/s] střední rychlost přiváděného chladicího vzduchu  
 $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] kinematická viskozita chladicího vzduchu stanovená pro teplotu mezní vrstvy  $t_m$  [°C].

Teplota mezní vrstvy

$$t_m = \frac{t_s + t_\infty}{2} \text{ [°C]}$$

$t_s$  [°C] střední teplota povrchu ochlazované trubky, pro zadanou výrobní halu  
 $t_s = (500 + 350)/2 = 425 \text{ °C}$

$t_\infty$  [°C] teplota vzduchu mimo mezní vrstvu, pro zadanou výrobní halu  
 $t_\infty = +30 \text{ °C}$ .

Kriterium

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu}{\lambda \cdot \rho \cdot c}$$

charakterizuje podobnost rychlostních a teplotních polí.

$a$  [m<sup>2</sup>/s] součinitel teplotní vodivosti vzduchu charakterizuje rychlost přenosu tepla.

V prvním přiblížení bylo počítáno se dvěma hodnotami a střední rychlosti přiváděného chladicího vzduchu

$$w_0^{25} = 25 \text{ m/s} \quad \text{a} \quad w_0^{30} = 30 \text{ m/s}$$

Ze zadaných hodnot lze vyčíslit, že pro Reynoldsovo číslo platí  $5 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^4$  a následně lze z [1] odvodit velikost součinitelů  $C = 0,22$ ;  $m = 0,6$ .

Z Nusseltova kritéria stanovíme velikost součinitele přestupu tepla.

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot d_1}{\lambda_v} \quad (2)$$

$\alpha_k$  [W/m<sup>2</sup>K] součinitel přestupu tepla konvekcí,  
 $\lambda_v$  [W/mK] součinitel tepelné vodivosti vzduchu stanovený pro  $t_m$ .

Z rovnic (1) a (2) lze odvodit vztah

$$\alpha_k = C \cdot Pr^{0,35} \cdot Re^m \cdot \frac{\lambda_v}{d_1} \quad (3)$$

V další části výpočtu nebyly použity vztahy respektující sdílení tepla v tuhých tělesech při neustáleném stavu. Toto zjednodušení pracuje s předpokladem, že v tenkostěnné trubce je v průběhu ochlazování shodná teplota na povrchu i uvnitř stěny. Tento předpoklad podporuje vysoká tepelná vodivost hliníku.

Dále zjistíme, jaké množství tepla je nutné odvést z trubky pro hodnoty určené zadáním. Z rychlosti posuvu výlisku 20 m/min (0,333 m/s) a z délky chladič zóny 11 m, lze zadání transformovat na příklad, dle kterého má být trubka o délce  $l = 11$  m během doby  $\tau = 33$  s ochlazena z teploty 500 °C o teplotní rozdíl  $\Delta t = 150$  K.

Množství tepla, které je nutné z trubky odvést

$$Q = m \cdot c_{Al} \cdot \Delta t \quad [J] \quad (4)$$

$m$  [kg] hmotnost trubky určená z rozměrů trubky a měrné hmotnosti hliníku ( $\rho_{Al} = 2700$  kg/m<sup>3</sup>),  
 $c_{Al}$  [J/kg K] měrná tepelná kapacita hliníku stanovená pro střední teplotu 425 °C.

Po dosazení

$$Q = 14,828 \cdot 0,99646 \cdot 10^3 \cdot 150 = 2\,216,3 \cdot 10^3 \quad [J]$$

Toto teplo, které je nutné odvést, označíme jako 100 %.

Pro teplo odváděné konvekcí  $Q_k$  z povrchu trubky platí vztah

$$Q_k = S \cdot \alpha_k (t_s - t_\infty) \cdot \tau \quad [J] \quad (5)$$

Teplo  $Q_k$  odvedené ofukováním vyčíslíme pro dvě zvolené hodnoty rychlosti ochlazovacího vzduchu.

Po dosazení do rovnic (3) a (5) platí pro  $w_0 = 25$  m/s ( $\alpha_k = 73,39$  W/m<sup>2</sup>K) je  $Q_k = 1850 \cdot 10^3$  [J], tj. 83 % požadované hodnoty,

pro  $w_0 = 30$  m/s ( $\alpha_k = 81,88$  W/m<sup>2</sup>K) je  $Q_k = 2064 \cdot 10^3$  [J], tj. 93 % požadované hodnoty.

**Závěr:** Podle teoretického výpočtu je při ochlazování trubky vzduchem přiváděným o rychlosti 30 m/s odvedeno 93 % tepla z celkového množství tepla určeného k odvodu.

Tuto odchylku 7 % můžeme považovat za přijatelnou a přikročit k experimentálnímu ověření použité teorie.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ TEORETICKÝCH VÝPOČTŮ

Pro ověření teoretického výpočtu byla k dispozici vzduchotechnická trať o výkonu, který neumožňoval dosáhnout vypočtené rychlosti vzduchu 30 m/s. Rovněž testovaný vzorek měl rozměr odlišný od zadání. Z tohoto důvodu byl experiment proveden s rychlostí přiváděného vzduchu  $w_0 = 21$  m/s a s trubicí 53 x 3 mm. Na experimentech byl ověřen použitý výpočetní postup.

Délka vzorku byla zvolena 0,3 m s ohledem na velikost ohřívacího prostoru el. pece. V peci byl vzorek ohříván až na teplotu 550 °C (obr. 1) a následně byl přenesen do měřicí tratě. Na trati byl vzorek ofukován vzduchem o teplotě +20 °C (obr. 2). Teplota povrchu trubky byla snímána termočlánkem PtRh – Pt a vyhodnocována na zapisovači a na mikrovoltmetru.

Experimenty byly opakovány s různými výstupními rychlostmi vzduchu a s různě tvarovanou výstupní šterbinou.

Z celkem třinácti experimentů jsou na diagramu (obr. 3) znázorněny čtyři průběhy chladnutí vzorku ofukovaného rychlostí 21 m/s. Při jednotlivých experimentech se lišila výchozí teplota ochlazovaného vzorku  $t_0$ . Z tohoto důvodu je v grafu použit bezrozměrný tvar  $t/t_0$ . Symbolem  $t$  je označena okamžitá povrchová teplota vzorku.

Podle vztahů (1) až (5) bylo vypočteno ochlazování trubky použité jako vzorek a teoretický průběh chlazení byl rovněž zanesen do diagramu na obr. 3.

Při výpočtu se vycházelo z následujících hodnot platných pro vzorek trubky:

$w_0 = 21$ m/s	$C = 0,22$
$d_1 = 53$ mm	$m = 0,6$
$\Delta t = 150$ K	$\alpha_k = 67,6$ W/m <sup>2</sup> K
$t_s = 425$ °C	$m = 0,381$ kg
$t_\infty = 20$ °C	$Q = 57,023 \cdot 10^3$ J
$t_m = 222,5$ °C	$S = 0,0499$ m <sup>2</sup>
$Re = 2,856 \cdot 10^4$	

Z rovnice (5) určíme dobu potřebnou pro ochlazení vzorku

$$\tau = \frac{Q}{\alpha_k \cdot S \cdot (t_s - t_\infty)} \quad [s] \quad (6)$$

Po dosazení je vyčíslen hledaný čas  $\tau = 42,8$  s. Z teoretického průběhu chlazení zaneseného do diagramu je zřejmé, že koreluje s experimenty a použitý postup výpočtu je pro chlazení proudícím vzduchem vyhovující.

### 4. PROJEKT A REALIZACE

Pro časovou tíseň byla projektová příprava velmi krátká a částečně byla v souběhu s realizací. V této fázi úkolu bylo nutné změnit původně požadovaný spodní přívod vzduchu. Při rychlosti vzduchu 25 až 30 m/s působí na výlisk aerodynamické síly, které trubku nadnášejí a znemožňují kontrolovaný pohyb trubky po válečkové trati.

Problém byl vyřešen šikmým přívodem vzduchu z obou stran válečkové tratě. Přívodní vzduchotechnické potrubí je tvarováno tak, aby umožnilo horní pohyb tažného vozíku a rovněž přístup k údržbě válečkové tratě. Výslednice aerodynamických sil, působících na kruhový průřez trubky, stabilizuje trubku ve středu válečkové dráhy s přítlakem na válečky tratě (obr. 4). Usměrnění výtokové rychlosti vzduchu kolmo k ose trubky bylo dosaženo přepážkami vloženými do



Obr. 1 – Ohřev zkušební vzorku trubky v elektrické peci



Obr. 2 – Zkušební trať při testování chlazení vzorku trubky



Obr. 5 – Výfukové štěrbin instalované v chladicí zóně válečkové tratě



Obr. 6 – Montáž tlumičů hluku a ventilátoru na sací straně

výfukových štěrbin (obr. 5). Toto řešení s oboustranným ofukem výlisku rovněž přispělo ke zvýšení účinnosti ochlazování.

Zařízení určené pro přívod vzduchu bylo nutno umístit pod podlahu válečkové tratě, tzn. zabudovat pod trať zařízení pro přívod cca 56 000 m<sup>3</sup>/h vzduchu včetně tlumičů hluku na sání a na výtlaku.

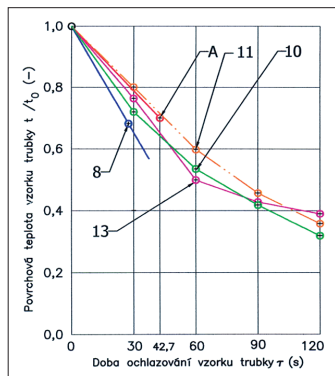
Rozměrovým i výkonovým požadavkům nejlépe vyhovely axiální ventilátory WOODS o průměru 560 mm. Ventilátory (3 ks) byly upraveny na napětíovou soustavu 3x 500 V používanou v hutních provozech.

Stavitelné lopatky oběžného kola ventilátoru poskytly možnost přesného seřízení vzduchového výkonu. Pro útlum hluku byly na straně sání použity upravené kulísové tlumiče hluku obr. 6. Proti výtlakové straně ventilátoru byl vybudován hlukový retardér ve tvaru niky a vnitřní povrch podzemních kanálů byl obložen akustickým obkladem.

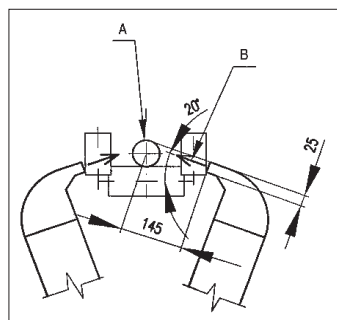
Zařízení bylo vyrobeno a namontováno během čtrnácti dnů.

## 5. UVEDENÍ DO PROVOZU, ZKOUŠKY

Při uvedení do provozu byly seřizovány vzduchové výkony ventilátorů změnou nastavení úhlu lopatek. Současně bylo kontrolováno proudové zatížení elektromotorů. Po seřízení byly změřeny rychlosti vzduchu na výstupu ze štěrbin. Měřeno bylo na štěrbinách po celé délce chladicí tratě (11 m) celkem v osmdesáti měřících místech.



Obr. 3 – Průběh teploty vzorku při ochlazování vzduchem o rychlosti 21 m/s. Křivky 8, 10, 11, 13 jsou odměřené na skutečném vzorku, křivka A odpovídá teoretickému průběhu ochlazování.



Obr. 4 – Schéma chlazení výlisku, umístěného na válečkové tratě, vzduchem výfukovaným ze štěrbin. A – chlazený výlisk, B – výfuková rychlost  $w_1$

Naměřené hodnoty rychlosti vzduchu se pohybovaly v rozsahu od 25,8 do 30,5 m/s.

Současně proběhly kouřové zkoušky pro znázornění pohybu vzduchu v okolí výrobní linky.

Přijímací zkoušky uskutečnil odběratel po spuštění výrobní linky a zahájení výroby výlisků. V této době byly ve výrobním programu výlisky s rozměry odlišnými od zadaných parametrů. Měření výrobcem profilů však potvrdilo splnění původního zadání a zařízení bylo předáno bez připomínek.

O spokojenosti s účinností vzduchového chlazení svědčí rovněž skutečnost, že během jednoho roku bylo obdobné vzduchové chlazení navrženo a realizováno na další výrobní lince.

### Použité zdroje:

- [1] KUTATELADZE, s.s., BORIŠANSKIJ, V.M.: *Příručka sdílení tepla*. SNTL 1962, Praha
- [2] CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. a kol.: *Větrání a klimatizace*. Technický průvodce 31, Bolit Press 1993, Brno
- [3] Firemní dokumentace, C-KLIMA PRAHA s.r.o.

### \* Nová technologie výroby ledové kaše

Britská firma *Thermetica* představila na IKK 2003 novou patentovanou technologii výroby směsi led/kapalina (ledové kaše) bez použití mechanických pohyblivých dílů.

Systém označený „iStorm“ sestává z běžného chladicího agregátu vody, nádrže, výměníků tepla a čerpadel a pracuje takto: Chladicí agregát ochladí ve výměníku tepla kapalinu/kapalinu tekutinu „iStorm“ na teplotu výrazně pod 0 °C. Tato tekutina má výrazně nižší bod tuhnutí a vyšší hustotu než voda a nemísí se s vodou. Ochladená tekutina se vstříkuje speciální tryskou do nádrže a vytvoří v určité zóně emulzi s vodou. Přitom tekutina odnímá teplo z vody, která nato zmrzne na malé krystalky ledu. Vzhledem k menší hustotě stoupají krystalky do horní části nádrže a vytvoří zde směs ledové kaše, která má teplotu 0 °C a vzhledem k podílu ledu vysoký specifický chladicí výkon. Ledová kaše se pak odebírá čerpadlem z nádrže a předává chlad (nebo jeho velký díl) buď přímo nebo prostřednictvím procesního okruhu, načež se vrací zpět do nádrže. Na druhé straně klesá tekutina „iStorm“, po odběru tepla z vody v důsledku své vyšší hustoty ke dnu nádrže, odtud se odsává a znovu přivádí do výměníku tepla chladicího agregátu.

Standardní výrobek na zástrčku s cca 5 m<sup>3</sup> velkou nádrží má kapacitu zásobníku chladu asi 110 kWh, které mohou být „vybíjeny“ při špičkové zátěži až 150 kW.