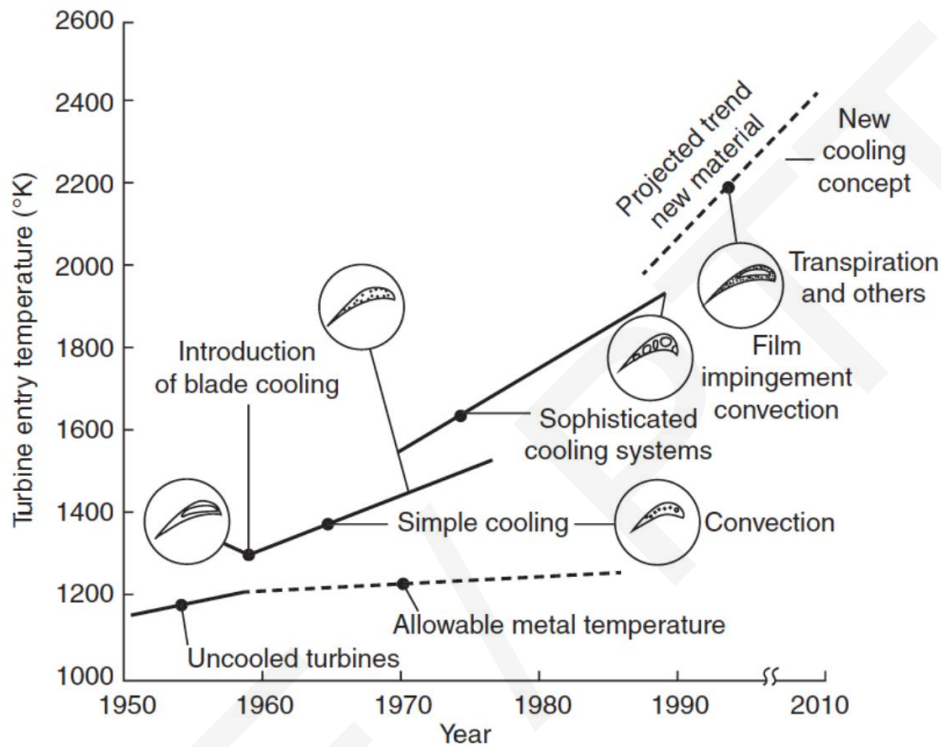


## Chlazení PT

Z rozborů tepelného cyklu TKM bylo zřejmé, že pro dosažení co nejvyšší tepelné účinnosti a výkonu TKM je jednou z možností zvýšení teploty na vstupu do turbíny ( $T_3$ ). Limitujícím faktorem pro zvyšování teploty  $T_3$  je tepelná odolnost materiálu lopatek, především prvních turbínových stupňů. Materiály teplotně exponovaných částí nesmí dosáhnout teploty tavení.



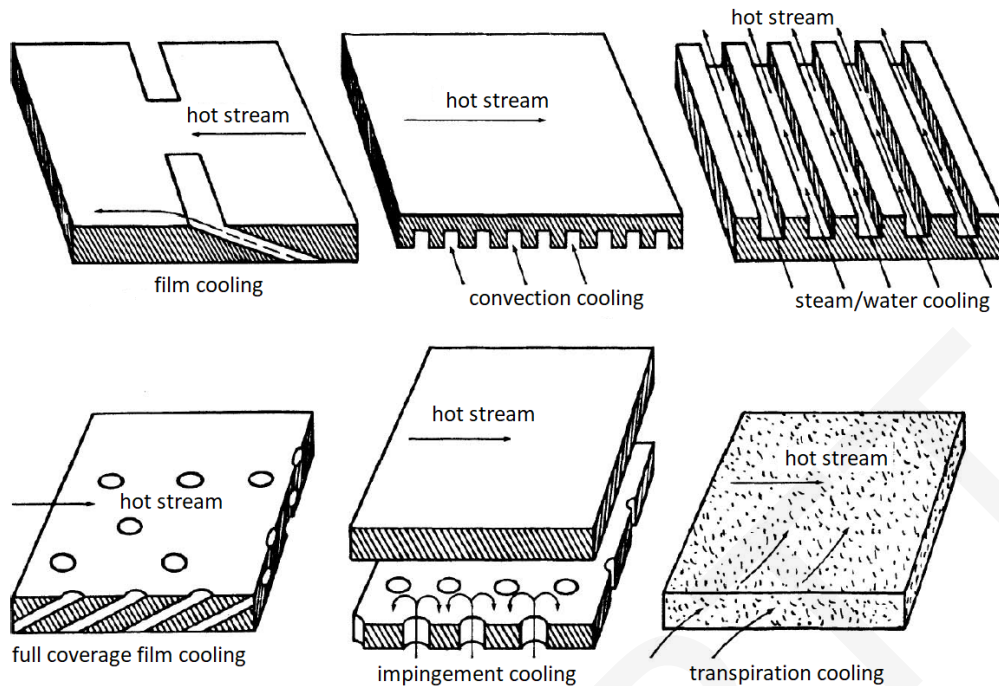
Obr. 1 Vývoj chlazení [1]

Na Obr. 1 je naznačen historický vývoj chlazení lopatek plynových turbín TKM. Maximální přípustná teplota pro nechlazené lopatky PT je kolem 1200°C. Při vyšších teplotách je již potřebné zabezpečit dostatečné chlazení.

Metody chlazení:

- a) Konvekční,
- b) Náporové,
- c) Chlazení filmem,
- d) Transpirační,
- e) Chlazení vodou/párou

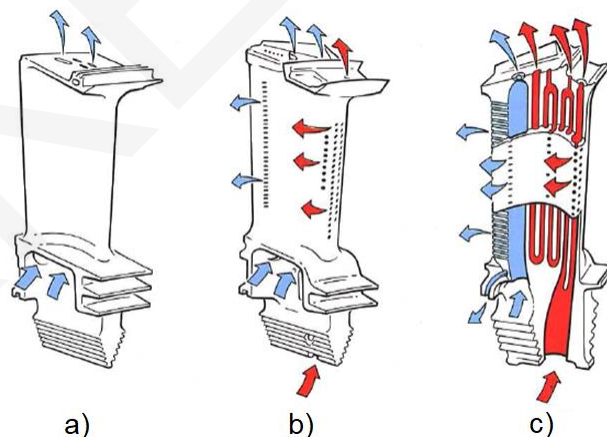
Jednotlivé principy chlazení jsou schematicky znázorněné na Obr. 2.



Obr. 2 Princip jednotlivých metod chlazení [2]

Chlazení konvekcí patří mezi nejjednodušší a nejčastěji používaný způsob chlazení. Chladicí vzduch proudí systémem kanálků uvnitř lopatek.

Starší způsob chlazení lopatek (60. roky 20. století) fungoval na principu jednoduchého průtoku chladicího vzduchu kanály uvnitř lopatky (Obr. 3-a). Později došlo ke zvýšení účinnosti chlazení zavedením dalšího zdroje chladicího vzduchu a doplněním o systém otvorů na povrchu lopatky vytvářejících chladicí film (Obr. 3-b). Další stupeň vývoje chlazení lopatek je uveden na Obr. 3-c. Pro dosažení co největší teplosměnné plochy jsou kanálky vysokotlakého chladicího vzduchu několikrát serpentinově vedeny.

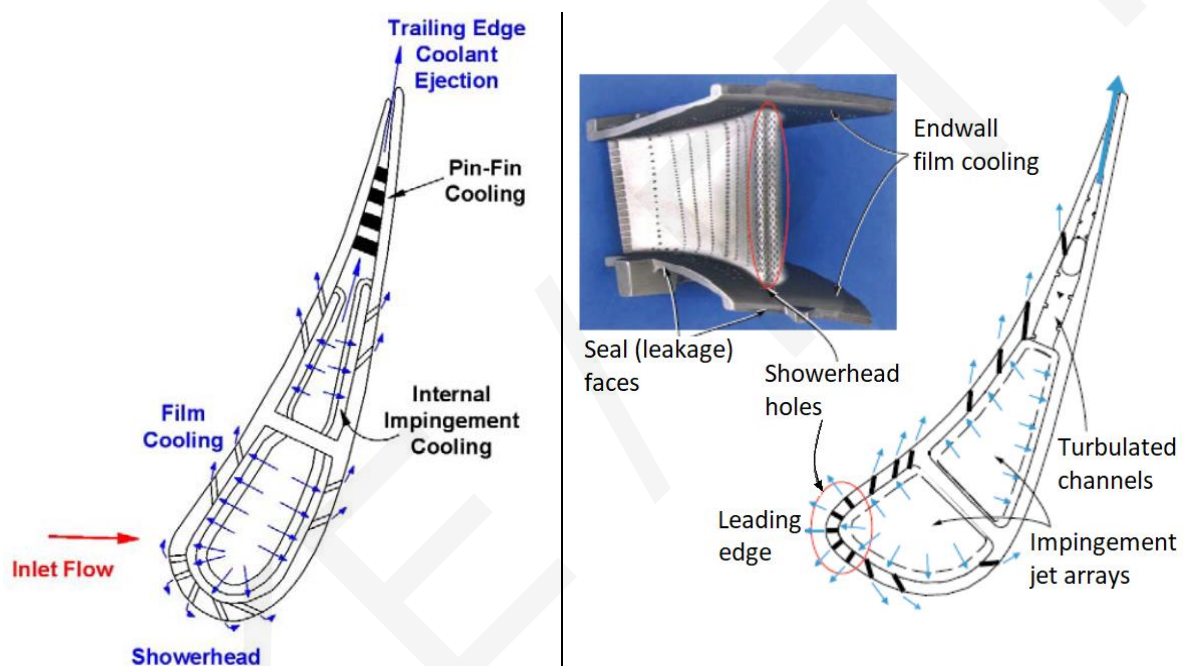


Obr. 3 Vývoj chlazení rotorových lopatek PT (modrá barva – nízkotlaký chladicí vzduch, červená barva – vysokotlaký chladicí vzduch) [5]

Chlazení transpirační metodou je způsob, při kterém chladicí tekutina proudí porézní stěnou materiálu lopatky. K přenosu tepla dochází přímo mezi chladicím médiem a horkým plynem. Chladicí tekutina vytvoří po celém povrchu lopatky „chladicí plášť“ (Thermal Barrier Coating), díky čemuž je tento způsob chlazení velmi účinný.

Náporové chlazení je, ve své podstatě, vysoce intenzivní forma konvekčního chlazení. Vevnitř lopatky je umístěna vložka s otvory, přes které chladicí vzduch proudí vysokou rychlostí a následně prudce naráží na vnitřní stěny lopatky. Díky tomu dochází k intenzivnímu odvodu tepla z teplého povrchu lopatky.

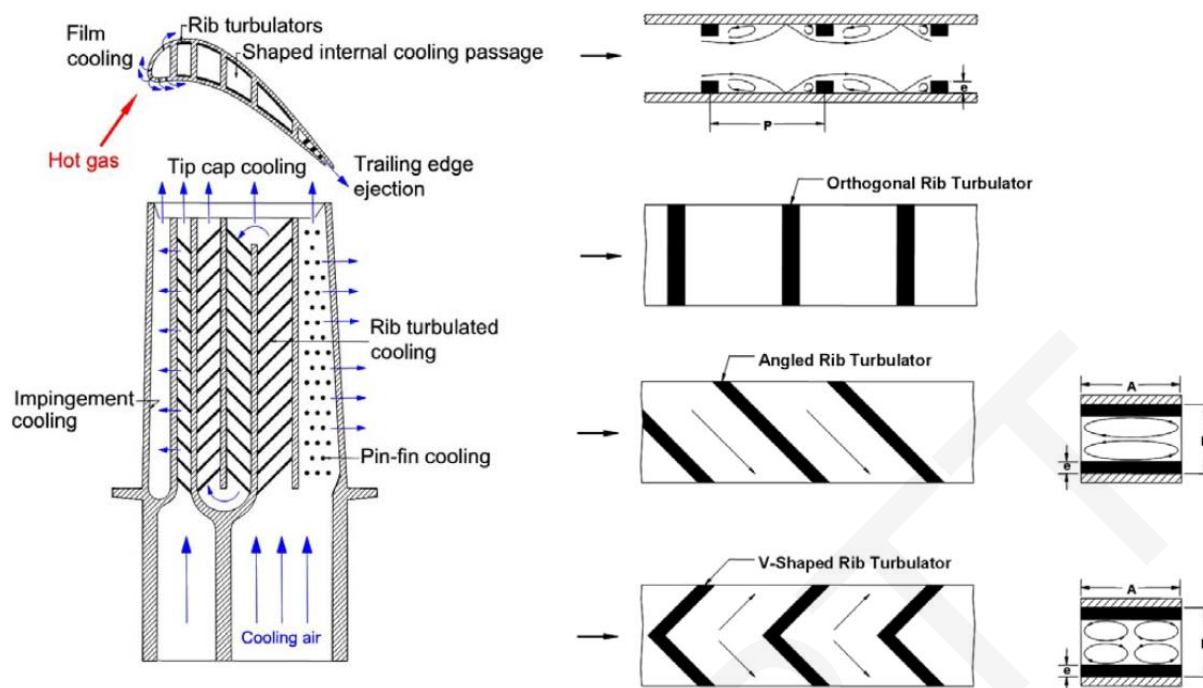
Pro zvýšení účinnosti chlazení používají moderní TKM kombinaci uvedených chladicích metod. Typické konstrukční řešení chlazení statorové lopatky je na *Obr. 4*. V tomto případě se jedná o kombinaci náporového chlazení a chlazení vzduchovým filmem. Pro chlazení odtokových hran může být použita například metoda „*pin-fin*“ (*Obr. 4-vlevo*), příp. soustava turbulizačních kanálků (*Obr. 4-vpravo*). Metoda chlazení „*pin-fin*“ představuje soustavu kolíků, které jsou umístěné mezi přetlakovou a podtlakovou stranou lopatky. Těmito kolíky je vedené teplo z horkých povrchů lopatky.



*Obr. 4* Příklad chladicího systému statorové lopatky [4]

Příklad systému chlazení rotorové lopatky je na *Obr. 5*. Lopatka se skládá ze systému serpentinově vedených kanálků lemovaných žebrovými turbulizátory. Náběžná hrana je chlazená náporovým způsobem a odtoková hrana metodou „*pin-fin*“.

Metody chlazení statorových a rotorových lopatek PT jsou ve své podstatě velmi podobné, avšak mechanismus přenosu tepla je u obou součástí zcela odlišný. Otáčení rotorových lopatek silně ovlivňuje proudění chladicí tekutiny, proto je potřebné zajistit dostatečný vnitřní přenos tepla. Nejčastěji používanou metodou pro zlepšení přenosu tepla ve vnitřních kanálech chladicího systému rotorových lopatek je použití žebrových turbulizátorů. V pravé části *Obr. 5* jsou zobrazené možné tvary turbulizačních žebrových turbulizátorů. Efektivita přenosu tepla žebrovými turbulizátory závisí na rozměrech žebrových turbulizátorů, jejich konfiguraci a Reynoldsovo číslu proudění chladicí tekutiny.



Obr. 5 Příklad chladičho systému rotorové lopatky [4]

Chladičí vzduch je možné odebírat buď z:

- dmychadla,
- nízkotlakého/vysokotlakého kompresoru,
- sekundárního proudu spalovací komory,
- druhého proudu u dvouproudých TKM.

### Chlazení vodou/párou

Zajímavým řešením chlazení, které je teprve v experimentální fázi, je chlazení vodou. Princip spočívá ve vedení chladičí vody uvnitř radiálně vedených měděných trubek, které jsou umístěné v dutých lopatkách. Během přenosu tepla dojde ke změně fáze chladičího média v páru, která je následně vstříkována do hlavního proudu.

Podobně jako vodou chlazené lopatky, i lopatky chlazené párou sestávají z řady měděných trubek umístěných uvnitř lopatek. Tento způsob lze použít u kombinovaných paro-plynových cyklů. Chladičí pára je odebírána z vysokotlaké části turbíny parního cyklu. Tato metoda přináší dva benefity. Prvním je cílené ochlazení částí plynové turbíny a druhým je ohřátí chladičí páry, která pak může být následně vedena zpátky do parního cyklu, díky čemuž je možné zvýšit tepelnou účinnost celého kombinovaného cyklu až o 1 až 3%.

### Intenzita chlazení a faktor rozložení teploty lopatek PT

Intenzita chlazení lopatek PT se posuzuje stupněm ochlazení lopatky  $\Theta$ .

$$\Theta = \frac{T_P - T_L}{T_P - T_V} \quad (1.1)$$

Kde:

$T_p$  – teplota plynu,

$T_L$  – teplota lopatky,

$T_V$  – teplota chladicího vzduchu.

Z důvodu nerovnoměrnosti teplotního pole vystupujícího ze spalovací komory, je pro návržení vhodného způsobu chlazení nutné vyhodnotit *faktor rozložení teploty*<sup>1</sup>.

$$PF = \frac{T_{3,max} - T_{3,avg}}{T_{3,avg} - T_2} \quad (1.2)$$

Kde:

$T_{3,max}$  – maximální teplota na výstupu ze spalovací komory,

$T_{3,avg}$  – průměrná teplota na výstupu ze spalovací komory,

$T_2$  – vstupní teplota do spalovací komory.

V praxi se vyhodnocuje buď radiální nebo obvodový faktor rozložení teploty (*RPF – Radial Pattern Factor*, *CPF – Circumferential Pattern Factor*).

$$RPF = \frac{T_{avg,u(r)} - T_{3,avg}}{T_{3,avg} - T_2} \quad (1.3)$$

$$RPF = \frac{T_{max,(u,r)} - T_{3,avg}}{T_{3,avg} - T_2} \quad (1.4)$$

Kde:

$T_{avg,u(r)}$  – obvodově zprůměrovaná teplota na definovaném poloměru na výstupu ze spalovací komory,

$T_{max,(u,r)}$  – maximální teplota v radiálním a obvodovém směru na výstupu ze spalovací komory.

### Účinnost chlazené PT

Hlavním problémem při určení účinnosti chlazené PT je správná interpretace příspěvků chladicích proudů k celkové užitečné práci PT a vyhodnocení procesu míchaní chladicích proudů s hlavním proudem. Univerzální závislost, která by komplexně tyto procesy přesně kvantifikovala, zatím neexistuje.

Nejjednodušší definici účinnosti chlazených PT zavedl *Hartsel*. Jeho úvaha vychází z myšlenky, že všechny chladicí proudy mohou konat práci, přičemž směšování mezi chladicím a hlavním proudem zanedbává. Skutečná výstupní práce turbíny ( $a_c$ ) je definovaná jako celkový pokles entalpie hlavního proudu a chladicích proudů mezi vstupem (včetně vstupů chladicího vzduchu) a výstupem z turbínového stupně.

<sup>1</sup> V anglické literatuře se často objevuje v této souvislosti pojem „*Temperature Traverse Quality*“ nebo „*Pattern Factor*“ (*PF*)

$$a_{ac} = m_g(h_{01} - h_{03}) + \sum_{i=1}^n m_{ci}(h_{i,01} - h_{03}) \quad (1.5)$$

Odpovídající ideální výstupní práce pak bude:

$$a_{id} = m_g(h_{01} - h_{03,is}) + \sum_{i=1}^n m_{ci}(h_{i,01} - h_{03,is}) \quad (1.6)$$

Účinnost pak bude poměr skutečné a ideální výstupní práce turbínového stupně.

$$\eta = \frac{m_g(h_{01} - h_{03}) + \sum_{i=1}^n m_{ci}(h_{i,01} - h_{03})}{m_g(h_{01} - h_{03,is}) + \sum_{i=1}^n m_{ci}(h_{i,01} - h_{03,is})} \quad (1.7)$$

Výhodou této definice je jasný fyzikální význam a poměrně snadný výpočet. Protože však nebere v úvahu skutečný proces míšení chladicích proudů s hlavním proudem, je získaná hodnota účinnosti obecně o něco vyšší, než reálná hodnota.

Ke zpřesnění metodiky určení účinnosti chlazené PT přispěl také *Kurzke*. Na rozdíl od *Hartsele* se domníval, že chladicí proudy v rotorové mříži nekonají práci, a proto by do výpočtu účinnosti neměly vstupovat. Naopak, chladicí proudy ve statorové mříži po promíchání s hlavním proudem, následně vstupují do rotorové mříže, přičemž tedy přispívají k produkci užitečné práce.

Doposud uvedené metody určení účinnosti chlazené PT zanedbávají vliv samotného míchaní hlavního proudu s proudy chladicími. Vlivu míšení těchto proudů se věnoval např. *Horlock* s kolektivem autorů, kteří vyvinuli tři základní definice:

- a) „*Mainstream-pressure method*“ - (MP),
- b) „*Fully-reversible method*“ - (FR),
- c) „*Weighted-pressure method*“ - (WP).

Tyto metody předpokládají, že proudy chladicího vzduchu a hlavní proud se v různých procesech mísí a tento smíšený proud koná práci. Entalpii smíšeného proudu lze zapsat jednotným vztahem:

$$h_m = \frac{a_{ac}}{(m_g + \sum_{i=1}^n m_{ci})(h_{01,m} - h_{03,is,m})} \quad (1.8)$$

Kde  $h_{01,m}$  je celková entalpie po smíchání proudů a  $h_{03,is,m}$  je ideální celková entalpie smíchaných proudů po expanzi na výstupu ze stupně.

Metoda MP předpokládá, že se proudy chladicího vzduchu mísí s hlavním proudem za tlakových podmínek hlavního proudu. Tato metoda tedy nemůže odrážet reálné podmínky míšení. Metoda FR zase předpokládá, že proces míchaní je izentropický, takže ani tato metoda není dostatečně přesná. Nejpresnější metodou se jeví metoda WP, která v procesu míchaní proudů respektuje nárůst entropie v důsledku vyrovnávání teplot interagujících proudů.

**Použita literatura:**

- [1] Meherwan P., Boyce P. E.: Gas Turbine Engineering Handbook, III. Edition. Elsevier Inc., 2006. ISBN: 978-0-7506-7846-9
- [2] Hünecke K.: Jet engines - Fundamentals of Theory, Design and Operation. Airline Publishing Ltd, Shrewsbury, England, 1997. ISBN: 0-7603-0459-9
- [3] Zou Z., Wang S., Liu H., Zhang W.: Axial Turbine Aerodynamics for Aero-engines – Flow Analysis and Aerodynamics Design. Springer, 2017. ISBN: 978-981-10-5749-6
- [4] Han J. Ch., Wright L.: Enhanced Internal Cooling of Turbine Blades and Vanes. Turbine Heat Transfer Laboratory - Department of Mechanical Engineering, Texas
- [5] Theoretical Knowledge Manual for ATPL(A): Aircraft General Knowledge 3 (021 00 Powerplant), 2.ed., Oxford Aviation Service, 2001, ISBN 0-88487-285-8.