

Tepelná bilance izolovaného obráběcího stroje

Bc. Miroslav Vávra

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Miroslav Vávra
Osobní číslo: T11041
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Forma studia: kombinovaná

Téma práce: Tepelná bilance izolovaného obráběcího stroje

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se blíže s problematikou sdílení tepla konvekcí, prostupem nestacionárním sdílením tepla vedením v tuhých látkách.
2. Seznamte se s výkresovou dokumentací stroje.
3. Navrhněte izolaci stroje a způsob jeho temperace.
4. Proveďte rozbor a výpočet tepelného toku mezi povrchem stroje a okolím pro letní a zimní režim, jak pro neizolovaný, tak pro izolovaný stroj.
5. Vypočítejte součinitele přestupu tepla pro všechny případy v bodu 4.
6. Simulaci teplotních polí ve vybraných částech stroje proveďte v programovém prostředí Comsol Multiphysics a porovnejte s vypočtenými výsledky.
7. V experimentální části proveďte termografická měření povrchové teploty stroje in-
frakamerou pro posouzení vypočtených součinitelů přestupu tepla.
8. V závěru práce zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

HEJZLAR, R.: Sdílení tepla, 4. vydání, ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-02974-3

DVOŘÁK, Z.: Sdílení tepla a výměníky, ČVUT Praha, FS, 1992

KLEČKOVÁ, M.: Nestacionární teplotní pole a napjatost ve strojních částech, SNTL Praha, 1979

POTŮČEK, J.: Modelování a simulace [online], ČVUT, FE, Dostupné z WWW:

cw.felk.cvut.cz/lib/exe/fetch.php/courses/a6m33mos/mos_p1_mbp.ppt

Dynamické systémy a děje, které v nich probíhají [online], VŠB – TU Ostrava, Dostupné z

WWW: http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_mechanika/DYNAM_SYST.pdf

COMSOL MULTIPHYSICS – oficial website. [online], Dostupné z WWW:

<http://www.comsol.com/>

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Teoretická část mé diplomové práce je zaměřena na mechanismy sdílení tepla. Práce zmiňuje sdílení tepla vedením (kondukcí), konkrétně jednoduchou a složenou jak rovinnou, tak válcovou stěnou. Je popsáno stacionární a nestacionární vedení tepla a jejich podmínek úloh, nezbytných pro jejich praktické řešení a rozdělení na geometrické, fyzikální, časové a okrajové. Je popsáno navazující sdílení tepla prouděním (konvekcí), její rozdělení včetně matematických modelů výpočtu součinitele přestupu a dalších kritériálních rovnic. Následuje teoretický popis sdílení tepla sáláním (radiací) a popis kombinovaného sdílení prouděním. V práci jsou stručně zmíněny výměníky tepla jak souprůdné tak protiprůdné a klimatizační jednotky. Poslední oblastí teoretické části je seznámení se simulačním programem Comsol Multiphysics.

V praktické části jsou uvedeny konkrétní výpočty teplotní stabilizace podstavy a příčného unášeče frézovací hlavy karuselu. Tento úkol je popsán a teoreticky vypočten pomocí známých matematických modelů a následně naprogramován a zpracován v programu Excel, pro konkrétní režim zimního a letního provozu včetně tepelné stabilizace uvnitř pracovního prostoru. Všechny praktické výpočty jsou simulovány v prostředí Comsol Multiphysics a vzájemně porovnány.

Klíčová slova: sdílení tepla, matematické modely, kritériální rovnice, Comsol Multiphysics

ABSTRACT

Theoretical part of my diploma thesis is focused on mechanism of heat interchange. Thesis mentions interchange by conduction, concretely single and combined by plane and cylindrical shell. There is described stationary and non-stationary thermal conduction and their conditions necessary for practical solution and discription for geometrical, physical, time division and marginal. There is described successive heat interchange by convection, its diversification including mathematical models for calculation of heat transfer coefficient and another criterion formulas. Next follows theoretical description of heat interchange by radiation and description of combined heat transmission.

In this work are shortly mentioned heat exchange devices both concurrent and counter-current as well as air-conditioning units. Last area of theoretical part is dealing with introduction to Comsol Multiphysics simulation programme.

In practical part are mentioned factual calculations of temperature stabilization of bottom and cross tappet milling head. This task is described and theoretically calculated based on known mathematical models and consequently programmed and processed in Excel programme, with respects for factual winter and summer mode including heat stabilization inside working space. All practical calculations are simulated in Comsol Multiphysics software and mutually compared.

Keywords : thermal conduction, mathematical models, criterion formulas, Comsol Multiphysics

Děkuji všem svým spolupracovníkům a přátelům, za kamarádský postoj a podporu při zdolávání mého studia. Dále děkuji panu Ing. Michalu Kovářovi z firmy Trimill a.s., za poskytnutí technické dokumentace a dalších technických prostředků nutných pro řešení mé diplomové práce. Též děkuji paní Ing. Haně Charvátové, Ph.D. za pomoc při vytváření simulací teplotních polí v prostředí Comsol Multiphysics.

V neposlední a největší míře bych touto cestou rád poděkoval mé vedoucí diplomové práce, vážené paní doc. Ing. Dagmar Janáčové, CSc. za její maximálně vstřícný a korektní přístup a cenné informace pro vypracování této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronicky nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 MECHANISMY SDÍLENÍ TEPLA.....	12
1.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM – KONDUKČÍ.....	13
1.2 NESTACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA	19
1.3 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM – KONVEKČÍ.....	22
1.4 SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM (RADIACE).....	25
1.5 KOMBINOVANÉ SDÍLENÍ TEPLA PROSTUPEM.....	26
2 COMSOL MULTIPHYSICS.....	31
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	32
3 VÝPOČTOVÁ ČÁST.....	33
3.1 SIMULACE ROZLOŽENÍ TEPLoty PŘI TEMPERACI PODSTAVY OBRÁBĚCÍHO STROJE.....	52
3.2 SIMULACE ROZLOŽENÍ TEPLoty V PŘÍČNÍKU OBRÁBĚCÍHO STROJE	65
3.3 TERMOGRAFICKÉ MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLot STROJE INFRAKAMEROU.....	70
3.4 VÝPOČET TEPELNÉHO TOKU MEZI NEIZOLOVANOU A IZOLOVANOU PODSTAVOU FRÉZOVACÍHO STROJE (KARUSELU).....	72
3.5 NÁVRH VÝKONU KLIMATIZAČNÍ JEDNOTKY PRO TEMPEROVÁNÍ PODSTAVY A PŘÍČNÉHO UNÁŠEČE VZDUchem	74
4 ZÁVĚR	76
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	77
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	80
SEZNAM OBRÁZKŮ	82
SEZNAM PŘÍLOH	85

ÚVOD

V technické praxi se často setkáváme se sdílením tepla v různých formách. Zahříváním povrchu libovolného tepelně vodivého tělesa se mění jeho rozměr, těleso zvětšuje svůj objem. Naopak chlazením povrchu téhož tělesa se jeho rozměr také mění, těleso se smršťuje, přičemž tyto jevy se nepříznivě promítají zejména ve strojírenském průmyslu, kde je kladen velký důraz na přesnost. Náplní této diplomové je zpracování návrhu tepelné izolace a temperance podstavy a příčného vedení pro upínací hlavu obráběcího stroje z důvodu dosažení jeho přesnějšího obrábění forem. Pro řešení této úlohy se nelze obejít bez nástrojů Procesního inženýrství v oblasti sdílení tepla. V technických a především ve strojírenských oborech je vždy velmi nutné se touto problematikou zabývat, aby nedocházelo k velkým rozměrovým nepřesnostem při obrábění. Je velmi důležité stroje a nástroje teplotně stabilizovat a tím dosáhnout přesnějšího obrábění ve srovnání s prací tohoto stroje, na který působí nežádoucí okolní vlivy (střídání tepla a chladu, vibrace, prašnost atd.). Za stabilní prostředí je možno považovat například pracoviště výstupní (dílenské) kontroly. To je pracoviště, které je klimatizované, kde je stálá, požadovaná teplota v rozmezí 20 až 23°C, kde dochází k minimální tepelné cirkulaci vzduchu, k osálení měřidel a měřících přístrojů slunečními paprsky. V praxi však stroje musí pracovat v mnohem náročnějších podmínkách a zejména při obrábění je nutné stabilní prostředí zajistit. A právě proto je důležité, pokusit se takovému to prostředí alespoň přiblížit teplotou strojů, protože kromě vibrací, prašnosti atd. ve velké míře na stroj působí teplo, které se vytváří nejen při samotné práci stroje a nástroje, ale je též předáváno z okolního prostředí.

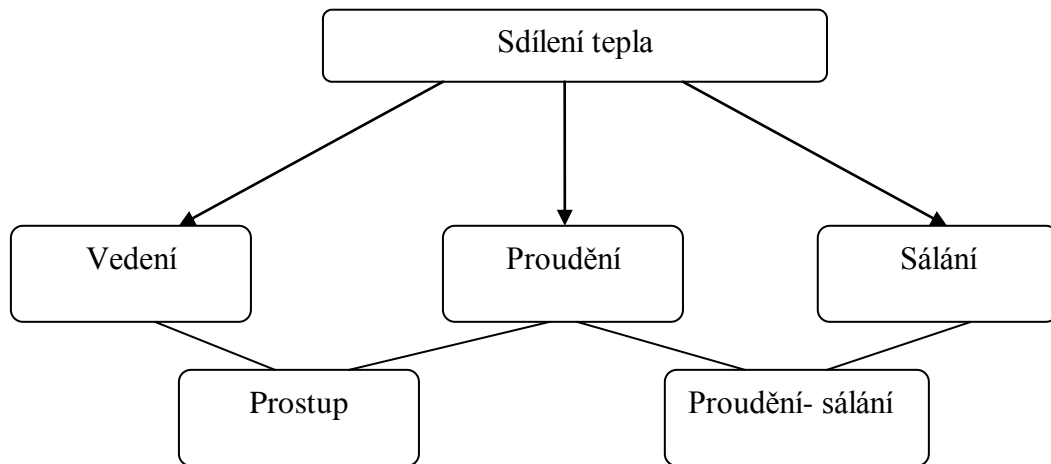
Z výše uvedených důvodů jsem se v následující kapitole práce zaměřil na mechanismy sdílení tepla vedením, prouděním, sáláním a na prostup tepla, který je kombinací sdílení tepla vedením a prouděním a také na nestacionární sdílení tepla vedením, bez kterých se při řešení této úlohy nelze obejít.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MECHANISMY SDÍLENÍ TEPLA

Poněvadž v této práci je řešen návrh tepelné izolace a temperance podstavy a příčného vedení pro upínací hlavu obráběcího stroje, je nutná znalost a aplikace nástrojů z oblasti procesního inženýrství, které shrnuje poznatky více vědeckých oborů, zejména z fyziky - termomechaniky, hydrodynamiky a též matematiky a částečně z fyzikální chemie. V technických, především strojírenských oborech je velmi nutné a důležité brát ohled na sdílení tepla. A právě proto je velmi nutné stroje a nástroje tepelně stabilizovat, aby nedocházelo k velkým pracovním a rozměrovým nepřesnostem. Je známo, že stroj, který pracuje ve stabilním prostředí, pracuje daleko přesněji než ten samý stroj na který působí nežádoucí vlivy, jako je střídání tepla a chladu, vibrace, prašnost a jiné. Za stabilní prostředí je možno považovat příkladně pracoviště výstupní (dílenské) kontroly. To je pracoviště, které je klimatizované, kde je stálá, téměř ideální teplota v rozmezí 20 až 23°C, kde dochází k minimální tepelné cirkulaci vzduchu a k osálení měřidel a měřících přístrojů slunečními paprsky. Takového prostředí v normální praxi nelze pro všechny stroje nikdy dosáhnout, snad pouze pro stroje, které musí v takových to, až sterilních prostředích pracovat. A právě proto je důležité, pokusit se takovému to prostředí alespoň přiblížit. Nejvíce, jak známo, na stroj působí teplo, které se vytváří nejen při samotné práci stroje a nástroje, ale je též předáváno. V technické praxi je teplo formou energie, kterou systém vymění, (přijme nebo odevzdá) při styku s jiným systémem, aniž by přitom docházelo ke konání práce. Jedná se o tepelnou výměnu [1]. Dalšími důležitou veličinou je teplota, která je charakteristikou tepelného stavu hmoty, nebo taky mírou vnitřní energie, a tím je též součástí translačních, vibračních a rotačních systémů [2].

V této části jsem se zaměřil na sdílení tepla, hlavně na mechanismy sdílení tepla vedením, prouděním, sáláním a na prostup tepla, který je kombinací sdílení tepla vedením a prouděním.



Obrázek 1. Schéma rozdělení sdílení tepla

Hybnou silou sdílení tepla je rozdíl energií mikroskopického pohybu částic, nebo taky tepelných energií, v různých místech systému, kterým se v technické praxi nahrazuje rozdíl teplot, protože na rozdíl od energie tepelného pohybu lze teplotu snadno měřit. Tepelný tok, nebo taky tok tepla \dot{Q} lze definovat jako množství tepla Q , které projde danou plochou za jednotku času ve směru kolmém k této ploše

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau}, \quad (1)$$

kde \dot{Q} je tepelný tok, Q je množství tepla a τ je čas

Existuje více možností přenosů energií. Pro zjednodušení, jak pro teoretický popis procesu, tak pro praktickou tvorbu matematického modelu a jeho výpočet, bylo v technické praxi sdílení tepla rozděleno do tří základních, již výše uvedených způsobů sdílení tepla[1], [2].

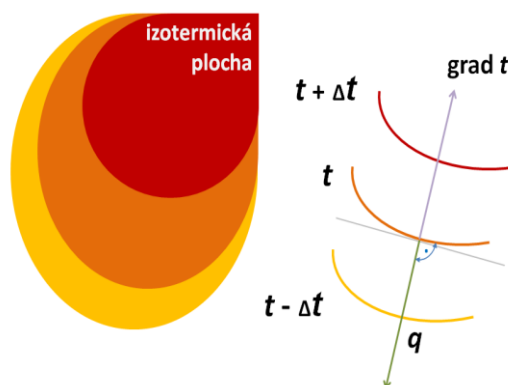
1.1 Sdílení tepla vedením – kondukcí

Vyskytuje se z velké části zejména u pevných těles, a to pouze za předpokladu, že v těchto pevných tělesech existuje rozdíl teplot. Vedení tepla je způsobeno pohybem molekul a atomů, nebo taky mikročástic, jejímž kmitáním se přenáší energie z místa s vyšší teplotou na místo s teplotou nižší. Jak bylo již zmíněno, kondukce je šíření tepla bezprostředním

dotykem jednotlivých částic tělesa, popřípadě jednotlivých těles, majících různou teplotu, čímž je způsoben pohyb těchto mikročástic. O „čistém“ vedení tepla lze mluvit především a pouze u pevných látek. U plynů a kapalin, které jsou v pohybu, probíhá kondukce pouze v malé, téměř zanedbatelné míře, neboť tekutiny se makroskopicky promíchávají, a tak dochází ke sdílení tepla prouděním. A proto je nutno se obeznámit se základními pojmy a výrazy, protože se budou v dalších částech této práce vyskytovat [2]. Jsou to pojmy teplotní pole, izotermické plochy, izotermy, teplotní gradient, tepelná vodivost, tepelný odpor a jiné. Sdílení tepla vedením lze popsat Fourierovým zákonem vedení tepla.

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dt}{dx}, \quad (2)$$

kde A je teplosměnná plocha, λ je součinitel tepelné vodivosti



Obr. 1 Znáornění teplotního pole a izotermy [1]

Fourierův zákon je základní model bilanční rovnice, ze které se bude dále vycházet při tvorbě matematických modelů. Kondukce je jedním ze způsobů šíření tepla v tělesech, při kterém částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh [5]. Podle součinitele tepelné vodivosti se látky dělí na tepelné vodiče a izolanty. Vodiče jsou látky s velmi vysokou intenzitou vedení tepla a vysokou hodnotou součinitelem tepelné vodivosti, z běžných látek jsou to především ušlechtilé kovy (stříbro, měď, hliník, wolfram, a jejich slitiny), které obsahují elektronový plyn, který svým pohybem uvnitř kovu způsobuje dobrý přenos tepla z jedné části tělesa do jiné. Naproti tomu tepelný izolant je látka, která špatně vede teplo, to znamená, že má nízký součinitel tepelné vodivosti. Z pevných látek jsou dobrými tepelnými izolanty především ty látky, které jsou porézní a proto obsahují

hodně plynu (vzduchu), např. minerální vlna (kamenná nebo skelná), peří, srst, papír, dále např. sklo, dřevo, polystyren, a další. Z látek neobsahující plyny jsou dobrými tepelnými izolanty například polymery na bázi styrenů, uretanů a jiných [7],[8].

Dále vedení tepla lze rozdělit na ustálené (stacionární) a na neustálené (nestacionární) vedení tepla [5],[6].

Ustálené (stacionární) vedení tepla je teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa stálý, tj. nezávisí na čase, naopak při neustáleném (nestacionární) vedení tepla postupně dochází k postupnému vyrovnávání teplotních rozdílů mezi jednotlivými částmi tělesa [9],[10],[11].

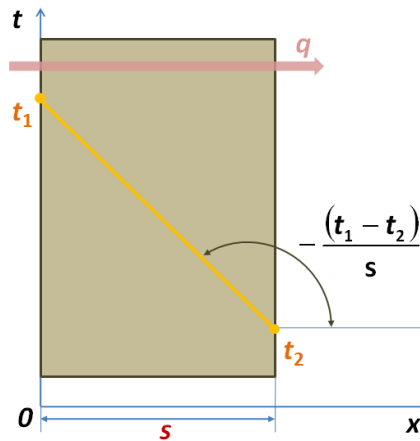
Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou

Při ustáleném jednosměrném vedení tepla jednoduchou stěnou musí být intenzita tepelného toku konstantní. Pokud by tomu tak nebylo, intenzity toku tepla jednou a druhou plochou by byly různé. V prostoru mezi plochami by docházelo k akumulaci entalpie, což by bylo v rozporu s předpokladem ustáleného stavu. Z rovnice intenzity tepelného toku vyplývá, že pokud je intenzita tepelného toku a tepelná vodivost konstantní, je teplota lineární funkcí prostorové souřadnice. Z tohoto plyne, že hybnou silou sdílení tepla vedením je rozdíl teplot povrchů desky [1].

Po integraci výše zmíněného Fourierova zákona lze dosáhnout vztah pro vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou

$$\dot{Q} = -\lambda \frac{t_1 - t_2}{s} A, \quad (3)$$

kde t_1, t_2 jsou teploty užitečných ploch stěny, s je tloušťka stěny

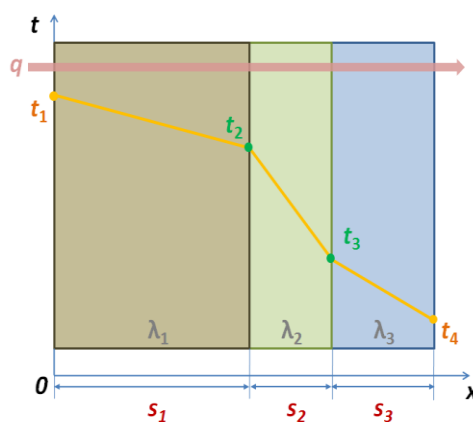


Obr. 2 Znárodnění vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou [1]

Vedení tepla složenou rovinnou stěnou

Teplu může postupně procházet několika různými vrstvami rozdílných materiálů s obecně různou tloušťkou a hlavně s různou tepelnou vodivostí. Tok tepla pro každý s těchto procesů lze vyjádřit jako podíl dané hybné síly a daného dílčího odporu. S toho plyne, že celková hybná síla je součtem všech hybných sil a celkový odpor je součtem všech dílčích hybných odporů [1]. Toto opět vyjadřuje integrovaný Fourierův zákon pro sdílení tepla vedením pro vícevrstvou stěnu

$$\dot{Q} = \frac{t_1 - t_n}{\sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j}} A \quad (4)$$



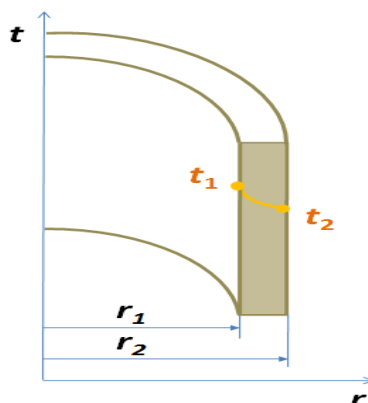
Obr. 3 Vedení tepla složenou rovinnou stěnou [1]

Vedení tepla válcovou stěnou

Při ustáleném vedení tepla pouze ve směru kolmém na podélnou osu systému souosých válcových ploch, musí být tepelný tok každou s těchto ploch stejný. To znamená, že nezávisí na vzdálenosti od osy soustavy ploch. Pokud by celkové toky tepla dvěma sousedícími plochami byly odlišné, tak v prostoru mezi plochami by docházelo k akumulaci entalpie, což je v rozporu s předpokladem ustáleného stavu. Opět platí, že hybnou silou pro sdílení tepla vedením je rozdíl teplot povrchů desky [1]. Toto lze opět vyjádřit matematickým vztahem odvozeným z integrovaného Fourierova zákona po integraci ve tvaru

$$\dot{Q} = -2\pi r l \lambda \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}, \quad (5)$$

kde r je poloměr válce, l je charakteristický rozměr, d_1, d_2 jsou průměry válce

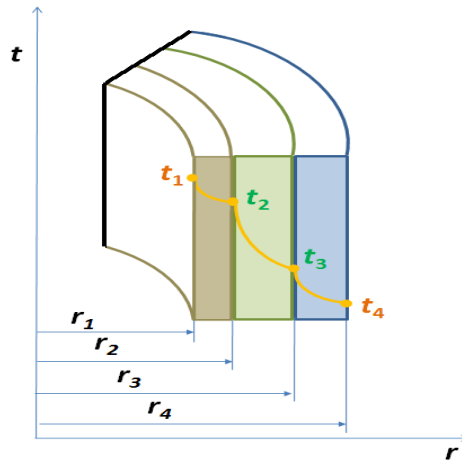


Obr. 4 Vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou [1]

Vedení tepla složenou válcovou stěnou

Vedení tepla složenou válcovou stěnou je naprosto shodné s vedením tepla jednoduchou válcovou stěnou, pouze s tím rozdílem, že procesy sdílení tepla musí být řazeny za sebou. Teplo prochází několika různými vrstvami rozdílných materiálů s obecně různou tloušťkou a hlavně různou tepelnou vodivostí. Tok tepla pro každý s těchto procesů nelze jinak vyjádřit, než jako podíl dané hybné síly a daného dílčího odporu. A opět platí, že celková hybná síla je součtem všech hybných sil a celkový odpor je součtem všech dílčích hybných odporů [1].

$$\dot{Q} = 2\pi r l \frac{t_1 - t_2}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_j} \right) \ln \left(\frac{d_j}{d_{j-1}} \right)} \quad (6)$$



Obr. 5 Vedení tepla složenou válcovou stěnou [1]

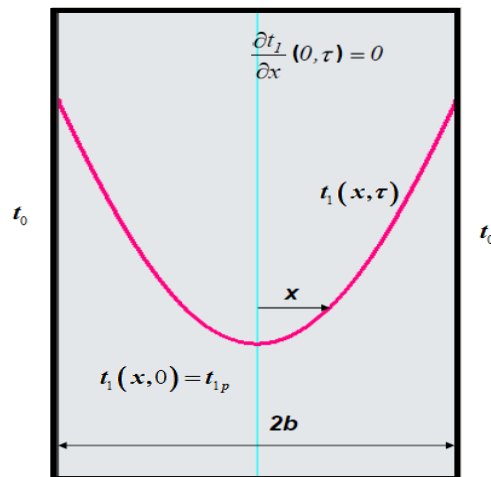
Látka	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Měď	395
Mosaz	106
Ocel 0,2%	50
Beton armovaný	1,5
Tepelně izolační materiál	
Pěnový polystyren	0,04
Lehčený polyuretan	0,033
Suchý vzduch	0,024
Voda	0,6

Obr. 6 Vybrané hodnoty součinitelů tepelné vodivosti [24]

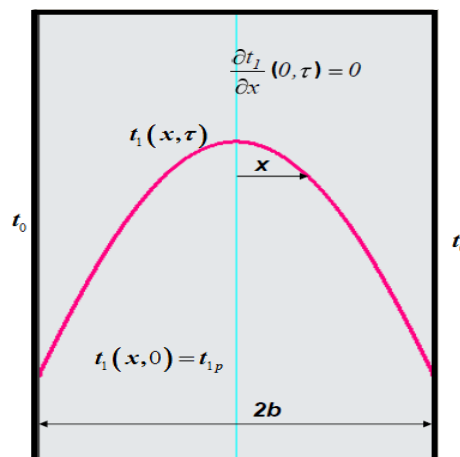
V technické praxi je pro výpočty teplotní stabilizace strojů a strojních zařízení a pro návržení jeho konstrukce využívat znalostí jak stacionárního, tak nestacionárního vedení tepla. V předchozím textu bylo pojednáváno o stacionárním vedení tepla. Další kapitola bude věnována nestacionárnímu sdílení tepla vedením v tuhých látkách.

1.2 Nestacionární vedení tepla

Při popisu nestacionárního (neustáleného) pole v tělese jde o popis, který odpovídá časově neustálenému sdílení tepla vyvolanému jiným tepelným působením na toto těleso. Velmi často se lze setkat s nestacionárním vedením tepla při ohřevu nebo ochlazování těles, které má v technické praxi značný význam.



Obr. 7 Průběh teplotního pole ve stěně při ohřevu [22]



Obr. 8 Průběh teplotního pole ve stěně při chlazení [22]

Ve zpracovatelském průmyslu velká část výrobních operací se provádí při vyšších teplotách než jsou běžné teploty kolem asi 20°C . Značná část technologických procesů

probíhá v rozmezí teplot mezi 100 až 200°C. Při popisu nestacionárního pole v tělese jde tedy o popis, který odpovídá časově neustálenému sdílení tepla vyvolanému jiným tepelným působením na toto těleso.

Důvodů provádění operací při zvýšené teplotě je několik a lze je rozdělit do dvou skupin. První skupinou je posunutí rovnováhy daného termodynamického děje, druhou skupinou je možnost zvýšení rychlosti zpracovatelského procesu. Jednorozměrné vedení tepla v desce popisuje následující Fourier-Kirchhoffova rovnice:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}(x, \tau) = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}(x, \tau), \quad (7)$$

kde a je součinitel teplotní vodivosti

Pro sdílení tepla vedením v tuhých tělesech, jak stacionárním, tak nestacionárním, platí podmínky úloh, které se rozdělují na geometrické, fyzikální, časové nebo počáteční a na okrajové podmínky. Geometrické podmínky určují tvar a rozměry tělesa, ve kterém proces probíhá. Fyzikální podmínky charakterizují fyzikální vlastnosti tělesa, např. součinitel tepelné vodivosti, hustotu nebo měrné teplo. Počáteční podmínky jsou nutné při rozložení teplot ve zkoumaném tělese v počátečním čase. Poslední, okrajové podmínky, charakterizují vzájemné působení zkoumaného tělesa s obklopujícím prostředím a jsou děleny do čtyř druhů.

Okrajová podmínka 1.druhu určuje rozdělení teploty tělesa na povrchu v každém časovém okamžiku,

$$t_p = t(x, y, z, \tau), \quad (8)$$

kde t_p je povrchová teplota tělesa, x, y, z jsou souřadnice povrchu tělesa

Okrajová podmínka 2.druhu určuje podmínky tepelného toku v jednotlivých bodech povrchu tělesa v libovolném časovém okamžiku,

$$q_p = q(x, y, z, \tau), \quad (9)$$

kde q_p je hustota tepelného toku na povrchu tělesa

Okrajová podmínka 3.druhu charakterizuje zákon výměny tepla mezi povrchem a obklopujícím prostředím v procesu ochlazování nebo ohřívání tělesa,

$$\alpha[t(b, \tau) - t_o] = -\lambda \frac{\partial t(b, \tau)}{\partial x} \quad (10)$$

Okrajová podmínka 4.druhu charakterizuje podmínky vedení tepla systémem těles za předpokladu, že mezi tělesy existuje ideální kontakt, tj. teploty stýkajících se povrchů jsou stejné. Ve zkoumaných podmínkách bude tepelný tok jednotlivými povrchy těles konstantní,

$$\frac{q_{1A}}{q_{1B}} = \frac{q_{2A}}{q_{2B}} = konst \quad (11)$$

Pro popis a řešení vedení tepla nestacionárního pole v tělese odpovídajícímu časově neustálenému sdílení tepla vyvolaného jiným tepelným působením platí již výše zmíněný matematický model,

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}(x, \tau) = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}(x, \tau) \quad (12)$$

s uvažovanými následujícími počátečními a okrajovými podmínkami,

$$t_{1p} = t_1(x, 0) \quad (13)$$

$$t_o = t_1(x, \infty) \quad (14)$$

podmínka symetrie,

$$\frac{\partial t_1}{\partial x}(0, \tau) = 0 \quad (15)$$

Okrajová podmínka prvního druhu charakterizuje, že přestup tepla na fázovém rozhraní je dokonalý,

$$t(x = b, \tau) = t_0 \quad (16)$$

Okrajová podmínka třetího druhu charakterizuje naopak, že přestup tepla na fázovém rozhraní není dokonalý

$$-\lambda \frac{\partial t(b, \tau)}{\partial x} = \alpha(t_1 - t_0) \quad (17)$$

Analytické řešení je možno provést Fourierovou separací proměnných anebo Laplaceovou transformací.

Pro popis teplotního pole s uvažovanou okrajovou podmínkou 3. druhu v nekonečné desce obdržíme vztah

$$t^* = \frac{t_1 - t_0}{t_{1p} - t_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(q_n)}{q_n + \sin(q_n) \cos(q_n)} \cos(Xq_n) e^{-Foq_n^2}, \quad (18)$$

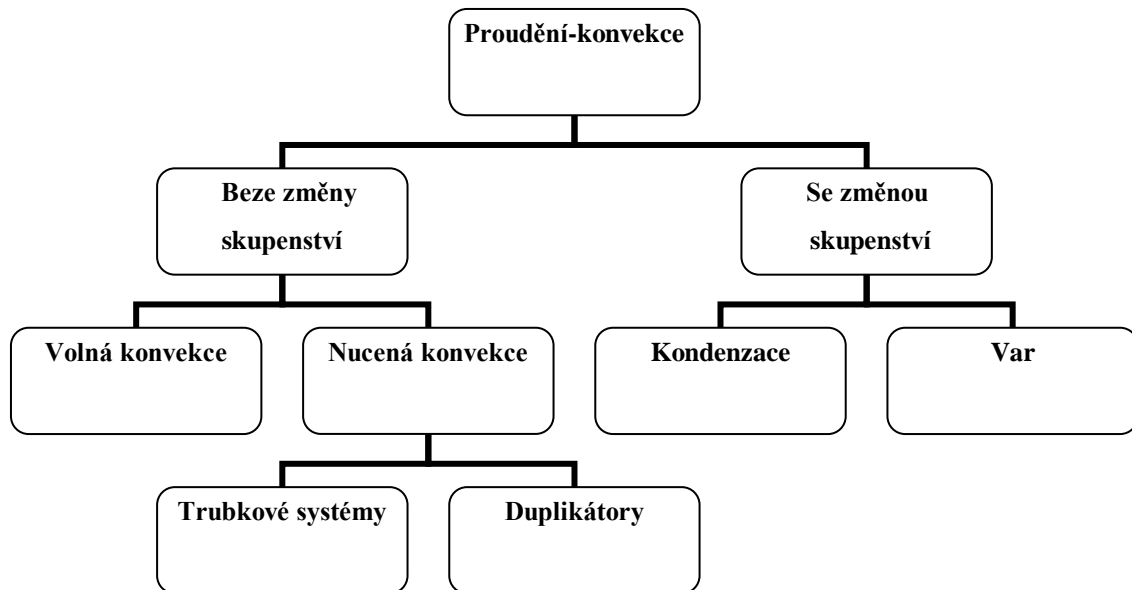
kde b je poloviční tloušťka, t je čas, x je vzdálenost od středu, $t(x,t)$ je teplota v daném místě a čase, t_p je počáteční teplota tělesa, t_o je teplota okolí, t^* – bezrozměrná teplota, q_n

jsou kořeny transcendentní rovnice pro desku $\cot q = \frac{Bi}{q}$, kde Bi je Biotovo kritérium

S prodlužující se dobou ohřevu nebo chlazení se mění rozložení teploty v tělese. Jak se bude měnit závisí na tloušťce b , na vlastnostech materiálu tj. měrné tepelné kapacitě c_p , součiniteli tepelné vodivosti λ , hustotě ρ .

1.3 Sdílení tepla prouděním – konvekcí

Šíření tepla prouděním (konvekcí) je jeden ze způsobů šíření tepla, kdy dochází k proudění hmoty o různé teplotě, to znamená, že konvekce je bezprostředně spojená s přenosem hmotnosti. Šíření tepla prouděním není možné u pevných látek a z toho důvodu se uplatňuje pouze u tekutin (kapalin a plynů), případně u plazmatu. Promíchávání tekutiny a je nerozlučně spjata s přenosem samotného prostředí. Pohybem hmoty dochází k vzájemnému pohybu jednotlivých částí, které mají odlišnou teplotu a tedy různou hustotu vnitřní energie, a tím se přenáší teplo. Současně s konvekcí probíhá v tekutině i kondukce, daná pohybem mikročástic, ta se vyskytuje vždy, pokud se stýkají částice o různé teplotě. Takže pod hodně širokým pojmem sdílení tepla konvekcí si lze představit spojení obou těchto dějů. Jak bylo již zmíněno, kondukce probíhá u kapalin a plynů pouze pokud jsou v makroskopickém klidu, což u proudění není zcela pravda. Takže tato složka takzvaného makroskopického klidu je velmi malá, téměř zanedbatelná [2],[12].



Obr. 9 Schéma rozdělení sdílení tepla [12]

Při sdílení tepla konvekcí velmi záleží na druhu proudění tekutiny. Jak je známo s mechaniky tekutin, může být proudění přirozené (volné) beze změny, nebo nucené se změnou skupenství. Proudění volné beze změny skupenství vzniká rozdílem hustot ohřáté tekutiny. Toto proudění je známo pod pojmem termosifonový efekt a lze si ho představit jako proudění vody ve vodních tocích, proudění vzduchu v atmosféře, dále těž jako volná cirkulace vyhřívání pokoje nebo taky jako ohřev vody, těsně pod bodem varu, na plynovém sporáku. Kdežto nucené proudění také beze změny skupenství vzniká působením vnějších sil. Pro představu je to příkladně doprava stlačených plynů pomocí kompresoru, dále to může být doprava vody v potrubí tlačena čerpadlem, trubkové či deskové výměníky tepla, duplikátory, sušárny a jiné [2],[13],[14],[15].

Z hlediska tvaru proudnic se dále dělí proudění beze změny skupenství na laminární a turbulentní [18]. Laminární proudění je takové proudění vazké kapaliny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se, to znamená, že částice kapaliny se pohybují vedle sebe jakoby ve vrstvách nebo destičkách, které se vzájemně nepromíchávají. Mezi jednotlivými vrstvami se předpokládá existence vnitřního tření a platnost vztahu Newtonova zákona viskozity [16],[1],[2]. Turbulentní proudění je způsob pohybu viskózních kapalin (např. krve), při kterém jednotlivé částice kapaliny procházejí různými vrstvami kapaliny, čímž dochází k promíchávání těchto vrstev. Částice kapaliny vykonávají při proudění kromě posouvání i

složité vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů a je doprovázen zvukovými fenomény na rozdíl od proudění laminárního. Rychlosti jednotlivých částic kapaliny se nepravidelně mění, tzn. částice již nemají ve všech místech neměnnou rychlost, proudění tedy není stacionární [2],[17],[19].

Do konvekce se změnou skupenství se dále řadí zkapalnění (kondenzace) a var, při kterých součinitel přestupu nabývá vysokých hodnot a lze říci, že přestup tepla je téměř dokonalý. Během temperance stroje nebude k těmto jevům docházet a proto nebudou tyto případy v této práci více rozebírány. Pro výpočty matematických modelů v praktické části diplomové práce je důležité seznámení se, se součinitelem přestupu tepla a kritériálními rovnicemi. Součinitele přestupu tepla nebo též součinitele konvekce α je nutno stanovit z kritériálních rovnic empiricky stanovených aplikací teorie podobnosti pro různé tvary stěn a druhy proudění různých tekutin. Kritériální rovnice má obvykle na levé straně bezrozměrný součinitel přestupu tepla nazvaný Nusseltovo číslo (Nu), které dává do souvislosti intenzitu přestupu tepla, charakterizovanou součinitelem přestupu tepla a teplotní pole v mezní vrstvě tekutiny, které charakterizuje její tepelná vodivost. Na pravé straně kritériální rovnice jsou bezrozměrná kritéria hydrodynamické a termokinetice podobnosti, z nichž jsou pro výpočty matematických modelů nejdůležitější kritéria :

$$\text{Nusseltovo kritérium} \quad Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (19)$$

kde α je součinitel přestupu tepla, l je charakteristický rozměr, λ je tepelná vodivost tekutiny

$$\text{Pécletovo kritérium} \quad Pe = Re Pr = \frac{\nu l}{a}, \quad (20)$$

kde ν je charakteristická rychlost proudění kapaliny

$$\text{Reynoldsovo kritérium} \quad Re = \frac{\nu l}{\nu} = \frac{\nu \rho}{\eta}, \quad (21)$$

Kde ν je kinematická viskozita, η je dynamická viskozita

$$\text{Prandtlovo kritérium} \quad Pr = c_p \frac{\eta}{\lambda}, \quad (22)$$

kde c_p - měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku

$$\text{Grashofovo kritérium} \quad Gr = \frac{g \beta l^3}{\nu^2} \Delta t, \quad (23)$$

kde g je gravitační zrychlení, β je koeficient objemové roztažnosti, Δt je rozdíl teplot

Hlavní výhodou použití bezrozměrných podobnostních čísel, též se v odborné literatuře nazývají kritéria podobnosti, protože dochází k redukci počtu nezávisle proměnných. Při samovolné konvekci závisí součinitel přestupu tepla na tíhovém zrychlení zemské tíže, kinematické viskozitě tekutiny, na součiniteli objemové roztažnosti tekutiny. V případě že se hustota tekutiny s teplotou nemění, k samovolné konvekci nedojde. Dále intenzita proudění a následně součinitel přestupu tepla závisí na rozdílu teplot T_o a T_s , tepelné vodivosti tekutiny, například ve rtuti bude přestup zjevně intenzivnější, než ve vodě nebo vzduchu. Ze zkušenosti je známo, že tvar těles má podružný význam [21].

1.4 Sdílení tepla sáláním (radiace)

Sdílení tepla sáláním je třetím základním způsobem přenosu tepla. Sálání se vyskytuje v širokém měřítku v tepelně fyzikálních procesech. Tepelné záření je druhem přenosu tepla pomocí elektromagnetických vln [2]. Teplo sálajícího tělesa se nejprve změní v záření, které po dopadu na pohlcující těleso se opět mění v teplo. Podle vlnové délky se rozlišuje záření rentgenové, ultrafialové, světelné, infračervené a elektromagnetické vlny. V teorii šíření tepla má největší význam infračervené záření, neboť je pohlcováno tělesy a jeho energie se přitom mění na energii tepelnou. Vlnová délka infračerveného záření je asi v rozmezí mezi 0,78 až 360 μm . Principiálně není rozdíl mezi tepelným a jiným elektromagnetickým zářením. Každé záření je spojeno s transportem energie. Také pro radiaci platí optické zákony přímočarého šíření rychlosti světla, lomu a odrazu. Šíření zářivé energie v zásadě nepředpokládá existenci zprostředkující látky, čímž se zásadně liší od sdílení tepla vedením a prouděním. Vznik tepelného záření z tepelné energie se označuje jako emise, kdežto přeměnu záření v tepelnou energii je označováno jako absorpce. Tato přeměna záření v teplo a obráceně je vázána na hmotnost tělesa. Vyzářená energie závisí jen na vlastnostech zářiče nikoli však na jeho okolí. Záření při všech vlnových délkách se označuje jako základní vlastnost těles. Tato energie se při dopadu na jiné těleso zčásti odrazí, zčásti jím prochází a z části je jím pohlcováno. Pohlcená část energie se může po určitém čase opět vyzářit. Energie, která tělesem prošla, nebo byla odražena, dopadá na okolní tělesa a může být jimi pohlcena. Tímto způsobem se celá vyzářená energie předává okolním tělesům. Ke sdílení tepla sáláním dochází pro představu například v kosmickém prostoru nebo ve vysokoteplotních plynech

chlazených reaktorech. Samozřejmě, sdílení tepla radiací je velmi náročný proces, se kterým se v další části diplomové práce již nesetkáme a již nebude dále zmiňováno [23].

1.5 Kombinované sdílení tepla prostupem

Jsou to především kombinace sdílení tepla vedením a prouděním nazývané prostup. Prostup tepla je kombinace sdílení tepla prouděním a vedením, a je tím myšlen přenos tepelné energie s jednoho prostoru s první tekutinou odděleného pevnou stěnou od druhého prostoru s druhou tekutinou. Tyto tekutiny se vzájemně nemísí. Za tekutinu lze považovat libovolnou kapalinu nebo plyn. Při výměně tepla za ustálených podmínek na pevné stěně jedno nebo vícevrstvé plochy platí rovnice pro desku ve tvaru

$$\dot{Q} = k(t_A - t_B)A, \quad (24)$$

kde k je součinitel prostupu tepla

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B}, \quad (25)$$

kde α_A, α_B jsou součinitele přestupu tepla na jedné a druhé straně desky

a rovnice pro válec nebo trubku

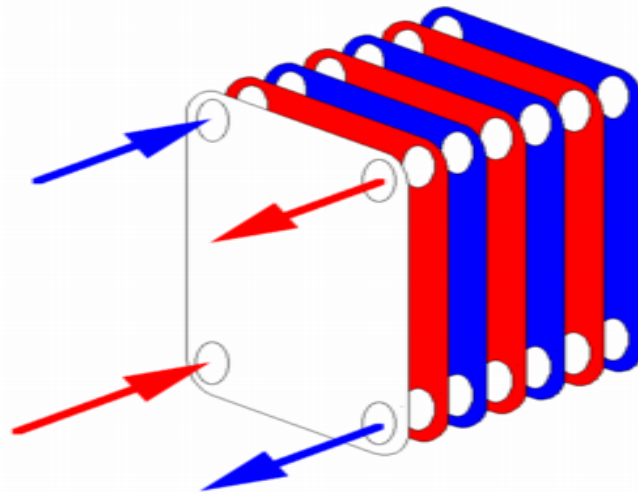
$$\dot{Q} = k_L(t_A - t_B)L, \quad (26)$$

kde k_L – délkový součinitel, L - délka válce nebo trubky [22] [30]

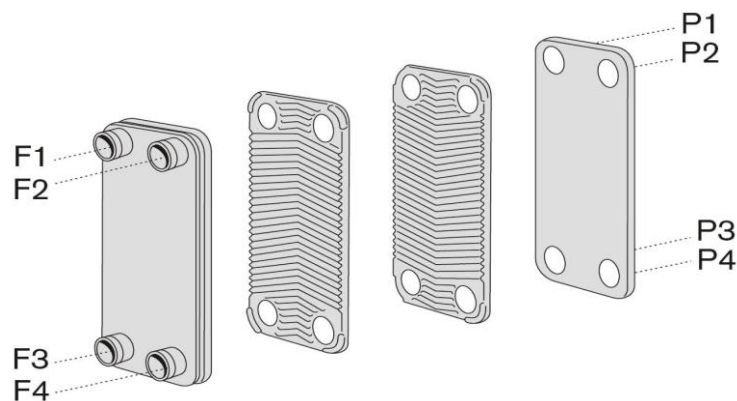
$$\frac{\pi}{k_L} = \frac{1}{\alpha_A d_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\ln \frac{d_{j+1}}{d_j}}{2\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B d_B} \quad (27)$$

Ke sdílení tepla prostupem slouží nejen pro technické či stavební účely výměníky tepla. Tepelný výměník je zařízení, které slouží k distribuci a výměně tepla nebo energie mezi soustavami a objekty o různých parametrech. Podle pracovního média se dají výměníky dělit do dvou základních skupin: beze změny fáze (například výměník vzduch-vzduch, spaliny-voda, olej-voda), nebo se změnou fáze (v nich dochází ke změně skupenství, tj. kondenzaci nebo odpaření jedné látky, například kondenzátor páry chlazený vodou). Podle konstrukce teplosměnné plochy jsou nejčastěji používány výměníky deskové nebo trubkové.

Deskový výměník tepla se skládá ze sady desek, seřazených za sebou a stažených pomocí šroubů mezi hlavní a přítlačnou deskou, nebo jsou jednotlivé jeho komponenty mezi sebou spájeny. Tak je vytvořen systém dvou oddělených mezi deskových prostorů - kanálů pro průtok primárního a sekundárního média. Tyto podmínky platí taky pro deskové výměníky. Všechny desky jsou prolisovány tak, aby v proudícím médiu docházelo k intenzivní turbulenci, čímž se zvyšuje přestup tepla. Mezi ty nejpodstatnější výhody deskových výměníků patří malé rozměry a nízká hmotnost, vysoká teplotní a tlaková odolnost, malý vnitřní objem, snadná montáž a demontáž příznivá relace výkon vůči ceně, vysoká účinnost a efektivita. Je možno říci, že deskové výměníky tepla mají asi 3 až 5 krát vyšší účinnost než výměníky trubkové, a právě proto tyto výměníky již nebudou zmíněny [31],[33].

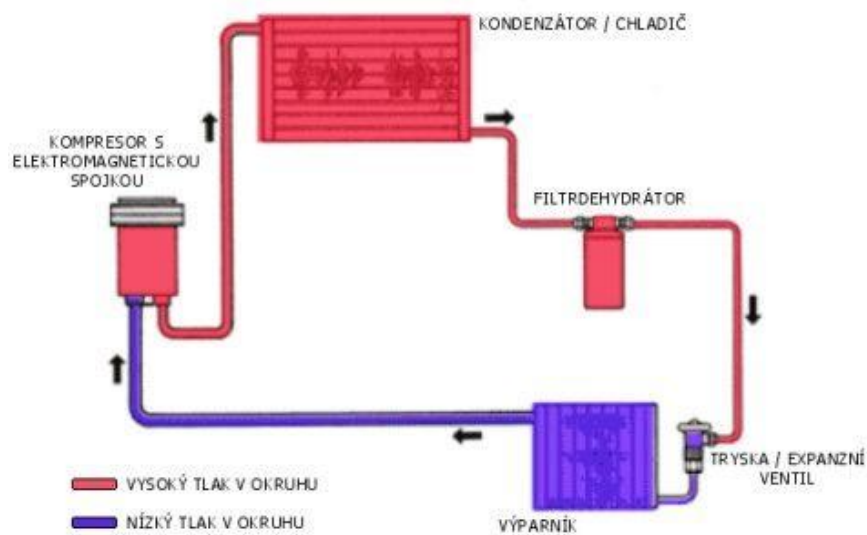


Obr. 10 Nákres deskového výměníku tepla [33]



Obr. 11 Schéma deskového výměníku tepla [34]

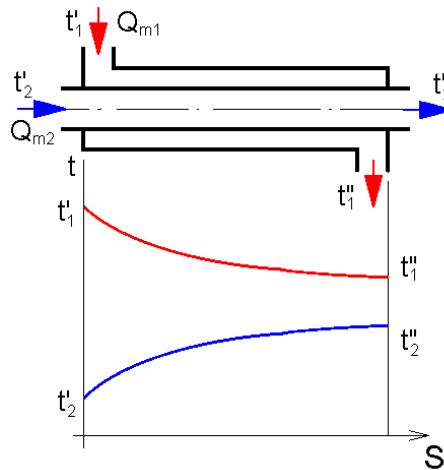
K dalším důležitým tepelným výměníkům se řadí klimatizace, které na rozdíl od výměníků neslouží pouze k ohřevu nebo chlazení, ale slouží především pro úpravu vzduchu v místnostech nebo dopravních prostředcích [31],[32],[35]. Nejsnazším vysvětlením funkce klimatizace je princip chladničky. Chladnička odnímá teplo potravinám a to následně uvolňuje do místnosti. Jednoduše z jednoho prostoru teplo odebírá a do druhého jej předává. Funkce klimatizační jednotky je obdobná. Fyzikální princip v klimatizaci je složený z více procesů za sebou. Základní etapy jsou stlačování par chladiva, kondenzace vysokotlakého plynu na kapalinu (ochlazením), transport kapaliny pod tlakem do vnitřní jednotky, expanzi do oblasti s nižším tlakem (přes kapiláru, expanzní ventil) spojené s odpařováním, tj. přeměně kapaliny na plyn (ohřívání, přijímá teplo z prostoru). A pak jsou páry chladiva opět nasávány do kompresoru, stlačovány, a celý tento koloběh se stále opakuje.



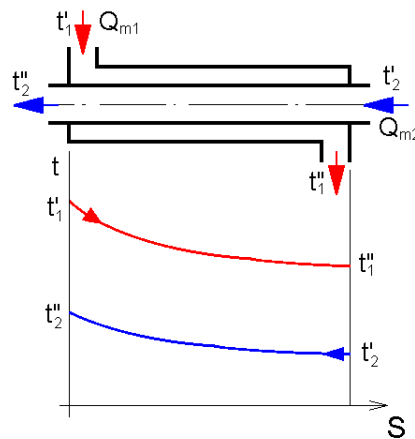
Obr. 12 Schéma klimatizační jednotky [34]

Dále podle směru toku média se výměníky tepla dělí na souproudé, protiproudé a křížové toky.

U souproudých výměníků putují všechna média stejným směrem, u protiproudých putují média proti sobě a u křížových proudí do kříže.



Obr. 13 Souproudý výměník tepla [34]



Obr. 14 Protiproudý výměník tepla [34]

Teplotní rozdíly na obou koncích výměníku Δt_1 a Δt_2 lze vyjádřit:

$$\Delta t_1 = (t'_1 - t''_1) \quad (28)$$

$$\Delta t_2 = (t'_2 - t''_2) \quad (29)$$

Mezi základní výpočtové vztahy patří rovnice entalpické bilance pro ohřívací a ohřívanou tekutinu:

$$\dot{Q} = \dot{m}' c'_p (t'_1 - t'_2), \quad (30)$$

kde \dot{m} je hmotnostní průtok, c_p je měrná tepelná kapacita (ochlazovaného média)

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (t_1'' - t_2''), \quad (31)$$

kde \dot{m}' je hmotnostní průtok, c_p' je měrná tepelná kapacita (ohříváného média)

Prostup tepla přes přepážku výměníku

$$\dot{Q} = kA\Delta t_{1s} \quad (32)$$

$$\dot{Q} = k_L L \Delta t_{1s} \quad (33)$$

Logaritmický střed rozdílů teplot je nutno počítat z důvodu, že podél teplosměnné plochy výměníku se teplota mění

$$\Delta t_{1s} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (34)$$

Ve výše uvedených pasážích teoretické části diplomové práce byly uvedeny obecné vztahy platné pro sdílení tepla jak volné tak nucené konvekce, vedení, sálání a prostupu, včetně vztahů pro výpočet tepelného toku, ze kterých budou vycházet všechny následující praktické výpočty, které jsou důležité pro zpracování praktické části. Dále byly uvedeny principy souprroudých a protiproudých výměníků tepla a klimatizačních jednotek, které budou uvažovány při praktických výpočtech tepelné bilance a stabilizace podstavy a příčnicku frézovacího karuselu. Pro simulační ověření výpočtů bude použit program Comsol Multiphysics. Toto programové prostředí je velmi vhodné pro simulace fyzikálních a multifyzikálních úloh ze všech oblastí fyziky.

2 COMSOL MULTIPHYSICS

Program COMSOL Multiphysics umožňuje řešit fyzikální úlohy popsané parciálními diferenciálními rovnicemi metodou konečných prvků. Tímto programem lze modelovat multifyzikální děje v inženýrské praxi a v mnoha vývojových oblastech technických i vědeckých oborů. Hlavní výhodou programu COMSOL Multiphysics je možnost kombinace několika fyzikálních rozhraní (PDE) do jednoho komplexního, multifyzikálního modelu. Propojení jednotlivých rovnic se zajišťuje přímo v uživatelském rozhraní programu a není třeba vytvářet jakékoliv přídavné kódy nebo skriptové soubory. Multiphysics lze s využitím speciálního nadstavbového modulu propojit s univerzálním nástrojem MATLAB určeným pro vědecko-technické výpočty. Funkce tohoto nástroje je možné využívat například při kreslení geometrických tvarů, generování FEM sítí, při vlastním numerickém řešení nebo při konečném zpracování výsledků úlohy [37],[38],[39].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

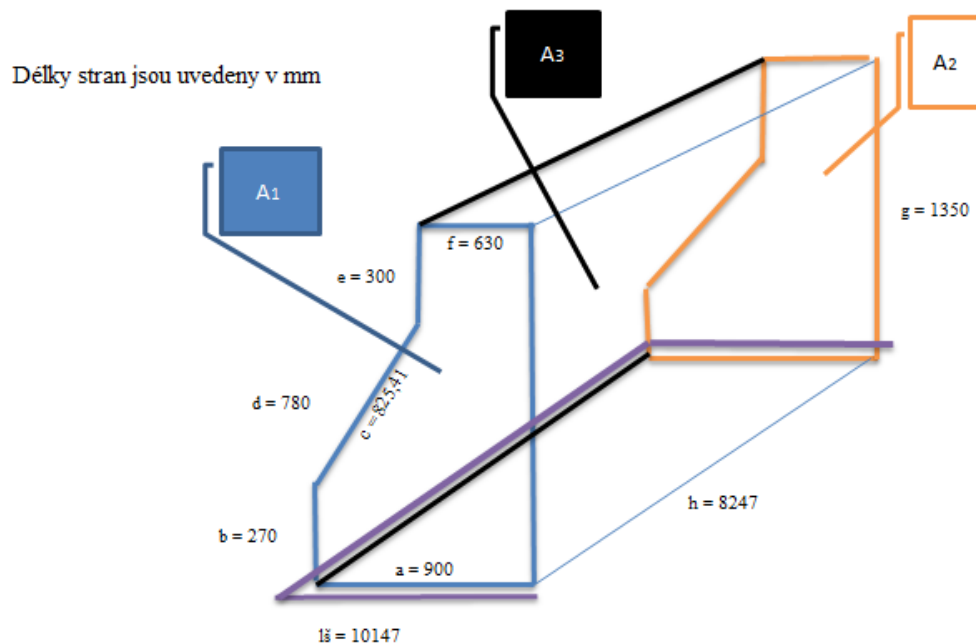
3 VÝPOČTOVÁ ČÁST

Pro konkrétní výpočty tepelné bilance stroje je velmi důležité zjistit a určit si, o jaké sdílení tepla se bude jednat. Zda půjde o vedení, proudění či sálání, nebo o jejich kombinace nebo prostu. V tomto konkrétním případě se jedná o proudění tepla z okolního prostředí do materiálu. Tímto materiálem je betonový podstavec, zhotovený jako dva monolity, sloužící jako pevné betonové lože velkého frézovacího stroje (karuselu). Druhým zadaným materiálem je příčník, pohybující se na betonových podstavcích, a má za úkol unášet podélným a částečně příčným směrem velkou frézovací hlavu. Tento příčníkový unášec je vyroben jako odlitek ze šedé litiny. Okolním prostředím vzduch za normálního atmosférického tlaku, asi 0,1 MPa. Teplota okolního vzduchu byla uvažována letní a zimní provoz. Teplota okolí pro zimní cyklus je 18°C a pro letní provoz je teplota 30°C. Navíc bude ještě uvažováno a počítáno s teplotou 50°C uvnitř zakrytovaného pracovního prostoru. Jedná se o případ řešení volné konvekce beze změny skupenství pro výpočet tepelného toku z neizolovaného stroje. Pro případ, že by úkolem bylo izolace nosníku a příčníku, jednalo by se o řešení prostupu tepla. Úkolem této diplomové práce je navržení nejen izolace, ale i temperování a teplotní stabilizaci stroje.

Popis volné konvekce včetně výpočtů součinitelů přestupu tepla výše uvedené případy

V prvním kroku je důležité určit, zda li se jedná o proudění, sálání či vedení tepla, nebo jejich kombinace. Jak bylo výše určeno a popsáno v této fázi výpočtů se bude jednat o volnou konvekci. To znamená, že k proudění dochází svévolně, a hybnou silou je pouze vyrovnání rozdílů teplot v jednotlivých prostředích a není tudíž nutno brát na zřetel ani rychlost proudění média, ani působící tlak. V tomto případě je uvažován běžný atmosférický tlak. Pro požadované výpočty volné konvekce platí již dříve uvedeny matematické modely zmíněné již v teoretické části této práce. Jsou to výpočet součinitele přestupu α , Nusseltovo kritérium Nu , Grashofovo kritérium Gr a výpočet součinitele objemové roztažnosti β . Po prostudování, konzultaci a možných malých úpravách, byly zhotoveny jednoduché nákresy o původních rozměrech. Tyto délkové rozměry v milimetrech byly přepsány do tabulky a automaticky převedeny do základních jednotek a použity pro výpočty zadaných ploch. Dále byly do tabulky zapsány naměřené a požadované teploty. Na základě těchto výsledků byly z tabulek pro procesní inženýrství vyhledány a zapsány potřebné tepelné vlastnosti suchého

vzduchu. Těmito potřebnými požadovanými veličinami jsou kinetická viskozita ν , měrná tepelná kapacita c_p , Prandtlovo kritérium Pr a součinitel tepelné vodivosti λ . Pomocí výše zmíněných matematických modelů a jednoduchého algoritmu byly vypočítány požadované hodnoty. Velmi důležitým faktorem je, že pro volnou konvekci je typickou teplosměnnou veličinou pouze charakteristická délka. Pro kouli a vodorovný válec je charakteristický rozměr \varnothing , pro rovinnou desku a svislý válec je to výška, a v tomto případě pro obdélníkovou desku je to kratší strana. Toto vše bylo zhotoveno, zaprogramováno a pomocí matematických modelů započítáno pro volný přestup tepla z okolí do podstavy a příčnicku pro zimní, letní provoz a pro vnitřní část obráběcího pracovního prostoru.



Obr. 15 Schématický náčrt podstavy obráběcího stroje

Příklad výpočtu volné konvekce pro uvedený náčrt podstavy obráběcího stroje

Zadáno:

Délky stran – dle náčrtu (délky stran jsou uvedeny v mm, pro výpočet jsou převedeny do základních jednotek -m)

Teplota vnějšího okolí $t_{in} = 18^\circ\text{C}$

Požadovaná teplota povrchu $t_w = 26^\circ\text{C}$

Postup výpočtu:

Výpočet jednotlivých ploch dle náčrtu, $A_1 = A_2 = \underline{1,0287 \text{ m}^2}$, $A_3 = \underline{11,5079 \text{ m}^2}$,

$$A_{\text{celkové}} = A_1 + A_2 + A_3 = (\text{celková plocha pro výpočet součinitele přestupu } \alpha) \quad (35)$$

$$A_{\text{celkové}} = 1,0287 + 1,0287 + 11,5079 = \underline{13,5653 \text{ m}^2}$$

$$\text{Rozdíl teplot } \Delta t = t_w - t_{in} \text{ (hybná síla volné konvekce)} \quad (36)$$

$$\Delta t = 26 - 18 = \underline{8^\circ\text{C}}$$

$$\text{Střední teplota } t_s = (t_w + t_{in})/2 \quad (37)$$

(=> zadávání konstant a kritérií z tabulek pro vzduch 22°C)

$$t_s = (t_w + t_{in})/2$$

$$t_s = 26 + 18 = \underline{22^\circ\text{C}}$$

Tabulkové hodnoty:

Gravitační zrychlení	g	9,81	m s^{-2}
Kinematická viskozita	ν	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Prandtlovo kritérium	Pr	0,73	
Součinitel tepelné vodivosti	λ	$2,52 \cdot 10^{-2}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

Výpočet koeficientu teplotní objemové roztažnosti β

$$\beta = \frac{1}{(t_s + 273,15)} \quad (38)$$

$$\beta = \frac{1}{(22 + 273,15)} = \underline{3,39 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}}$$

Výpočet Grashofova kriterium Gr

$$Gr = \frac{gl^3 \beta \Delta t}{\nu^2} \quad (23)$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 1,3954 \cdot 3,39 \cdot 10^3 \cdot 8}{(1,57 \cdot 10^{-5})^2} = \underline{2,93 \cdot 10^9}$$

Výpočet součinu Grashofova a Prandtlova kritéria $Gr Pr$

$$Gr Pr = 2,93 \cdot 10^9 \cdot 0,73 = \underline{2,41 \cdot 10^9} \quad (=> \text{zadávání konstant z tabulek}) [38]$$

Konstanta Nusseltova kritéria c 0,135

Konstanta Nusseltova kritéria n 0,333

Výpočet Nusseltova kritéria Nu

$$Nu = c (GrPr)^n \quad (39)$$

$$Nu = 0,135 \cdot (2,41 \cdot 10^9)^{0,333} = \underline{1,73 \cdot 10^2}$$

Výpočet součinitele přestupu tepla α_0

$$\alpha_0 = \frac{Nu \lambda}{l} \quad (40)$$

$$\alpha_0 = \frac{1,73 \cdot 10^2 \cdot 2,52 \cdot 10^{-2}}{1,3954} = 3,12 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Výpočet tepelného toku ze svislých stěn podstavy a do okolního prostředí \dot{Q}_0

$$\dot{Q}_0 = \alpha_0 A_0 (t_w - t_{in}) \quad (24)$$

$$\dot{Q}_0 = 3,12 \cdot 13,5653 (26 - 18) = \underline{3,38 \cdot 10^2 \text{ W}}$$

Příklad výpočtu nucené konvekce izolovaného podstavce frézovacího stroje výše uvedeného náčrtu

Zadáno:

Délky stran – dle náčrtu včetně délky a šířky štěrbiny pro proudění vzduchu sloužícího na temperaci (délky stran jsou uvedeny v mm, pro výpočet se provedl převod na m)

Teplota vnějšího okolí	t_{in}	18°C
Požadovaná teplota povrchu	t_w	26°C
Teplota Oc plechu	$t_{ocplechu}$	20°C
Tloušťka Oc plechu	$\delta_{ocplehu}$	$3 \cdot 10^{-3}$ m
Tloušťka izolace (plst')	$\delta_{izolace}$	$5 \cdot 10^{-2}$ m
Šířka škvíry	\check{s}	$5 \cdot 10^{-3}$ m
Délka trubky	$l_{\check{s}}$	10,047 m

(materiál, tloušťka ocelového plechu a izolace, délka trubky se škvírou – **navržená**)

Postup výpočtu:

Výpočet jednotlivých ploch dle náčrtu, $A_1 = A_2 = \underline{1,0287 \text{ m}^2}$, $A_3 = \underline{11,5079 \text{ m}^2}$,

$A_{celkové} = A_1 + A_2 + A_3$ (celková plocha pro výpočet součinitele přestupu α) – stejný jako pro volnou konvekci (35)

$$A_{celkové} = 1,0287 + 1,0287 + 11,5079 = \underline{13,5653 \text{ m}^2}$$

Rozdíl teplot $\Delta t = t_w - t_{in}$ (rozdíl teplot vzduchu ve štěrbině a okolního prostředí) (36)

$$\Delta t = 26 - 18 = \underline{8 \text{ °C}}$$

Střední teplota $t_s = t_w = \underline{26 \text{ °C}}$ (=>zadávaní konstant a kriterií z tabulek pro vzduch 26 °C)

Tabulkové hodnoty:

Gravitační zrychlení	g	9,81	m s^{-2}
Kinematická viskozita	ν	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01	$\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Prandtlovo kritérium	Pr	0,73	
Součinitel tepelné vodivosti	λ	$2,55 \cdot 10^{-2}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Hustota	ρ	1,15	kg m^{-3}
Souč. tepelné vodivosti oc plechu	$\lambda_{oc\ plech}$	47	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Souč. tepelné vodivosti izolace	λ_{izol}	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Reynoldsovo kritérium	Re	3000 (zvoleno pro turbulentní oblast)	

Výpočet ekvivalentního průměru d_{ek}

$$d_{ek} = 4 (\check{s} l_{\check{s}}) / 2 (\check{s} + l_{\check{s}}) \quad (40)$$

Výpočet rychlosti proudění v

$$v = \frac{Re v}{d_{ek}} \quad (41)$$

$$v = \frac{3000 \cdot 4,85}{10^{-2}} = \underline{4,85 \text{ m s}^{-1}}$$

Výpočet koeficientu teplotní objemové roztažnosti β

$$\beta = \frac{1}{(t_s + 273,15)} \quad (38)$$

$$\beta = \frac{1}{(26 + 273,15)} = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Výpočet Grashofova kritérium Gr

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2} \quad (23)$$

Výpočet součinu Grashofova a Prandtlova kritéria $Gr Pr$

$$Gr Pr = \underline{5,40 \cdot 10^8} \text{ (=> zadávání konstant z tabulek [38])}$$

Konstanta Nusseltova kritéria c 0,135

Konstanta Nusseltova kritéria n 0,333

Výpočet Nusseltova kritéria Nu

$$Nu = c (GrPr)^n \quad (39)$$

$$Nu = 0,135 \cdot (5,4 \cdot 10^8)^{0,333} = \underline{1,09 \cdot 10^2}$$

Výpočet teplotní vodivosti a

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (42)$$

$$a = \frac{3,6 \cdot 10^2}{1,15 \cdot 1,01} = \underline{2,2 \cdot 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}}$$

Výpočet Pecletova kritéria Pe

$$Pe = \frac{v d_{ekv}}{a} \quad (20)$$

$$Pe = \frac{4,85 \cdot 10^{-2}}{2,2 \cdot 10^{-5}} = \underline{2,2 \cdot 10^3}$$

Výpočet Nusseltova kritéria Nu pro turbulentní oblast

$$Nu = 0,116(\text{Re}^{2/3} - 125) \cdot \text{Pr}^{1/3} (1 + (d_{ekv}/l)^{2/3})(h/h_w)^{0,14} \quad (43)$$

$$Nu = 0,116(3000^{2/3} - 125) \cdot 0,73^{1/3} (1 + (10^{-2}/10,147)^{2/3})(1/1)^{0,14} = \underline{8,67}$$

Výpočet součinitele přestupu tepla α_{nuc}

$$\alpha_{nuc} = \frac{Nu \lambda}{d_{ekv}} \quad (44)$$

$$\alpha_{nuc} = \frac{8,67 \cdot 3,6 \cdot 10^2}{10^2} = \underline{2,21 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}}$$

Výpočet součinitele prostupu tepla k

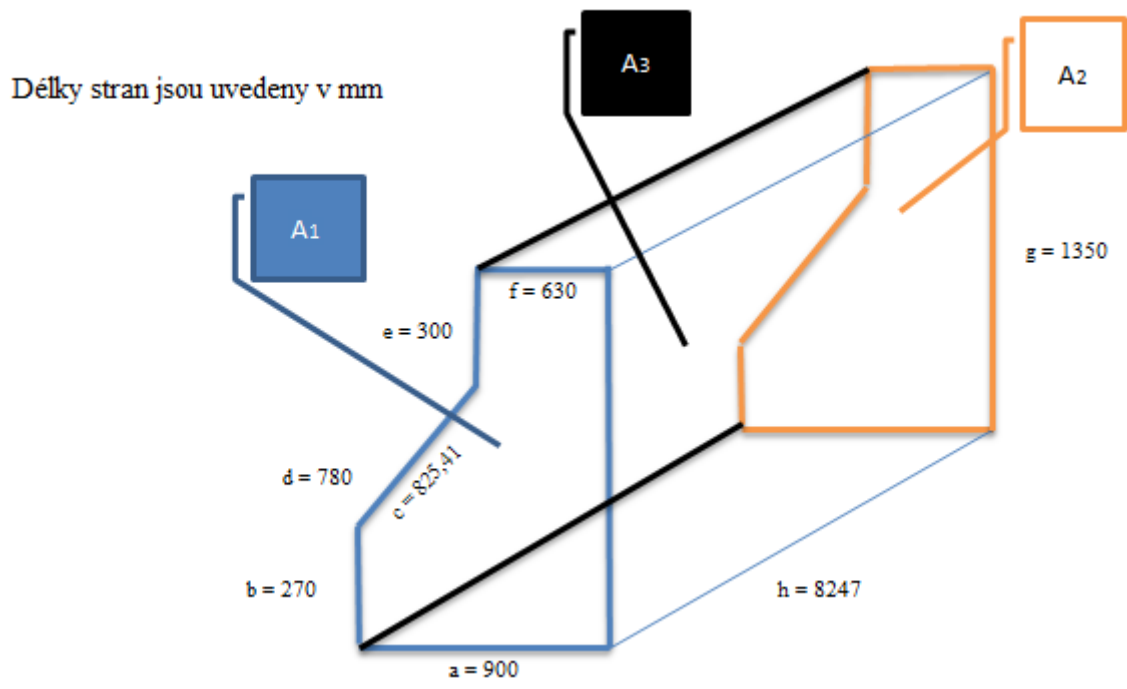
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{nuc}} + \frac{1}{\alpha_0} + \frac{1}{\delta_{ocplechu}} + \frac{1}{\lambda_{ocplechu}} + \frac{1}{\delta_{izolace}} + \frac{1}{\lambda_{izolace}}} \quad (45)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{2,21} + \frac{1}{2,2 \cdot 10^{-5}} + \frac{1}{0,003} + \frac{1}{47} + \frac{1}{0,05} + \frac{1}{3,6 \cdot 10^2}} = \underline{5,15 \cdot 10^3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}}$$

Tepelný tok skrz izolaci podstavy do okolního prostředí Q_{nuc}

$$Q_{nuc} = k A_{vně}(t_w - t_{in}) \quad (46)$$

$$Q_{nuc} = 5,15 \cdot 10^3 \cdot 13,5653 \cdot (26 - 18) = \underline{55,9 \text{ W}}$$



Obr. 16 Návrh podstavy obráběcího stroje pro výpočet volné konvekce z vnější strany

Postup výpočtu tepelného toku tepla pro volnou konvekci (zimní provoz
teplota okolí 18 °C)

Materiál podstavy - beton

Poznámka
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	a	0,9000	m	Zadané dle výkresu
Strana	b	0,2700	m	Zadané dle výkresu
Strana	c	0,8254	m	Zadané dle výkresu
Strana	d	0,7800	m	Zadané dle výkresu
Strana	e	0,3000	m	Zadané dle výkresu
Strana	f	0,6300	m	Zadané dle výkresu
Strana	g	1,3500	m	Zadané dle výkresu
Strana	h	8,2470	m	Zadané dle výkresu
Charakteristický rozměr	l	1,3954	m	Kratší strana
Plocha	$A1$	1,0287	m^2	Dle obrázku
Plocha	$A2$	1,0287	m^2	Dle obrázku
Plocha	$A3$	11,5079	m^2	Dle obrázku
Celková plocha	<i>Avnější</i>	13,5653	m^2	Teplosměnná plocha obvodu ($A1+A2+A3$)
Teplota povrchu	t_w	26	$^{\circ}C$	Požadovaná teplota povrchu a uvnitř podstavy
Teplota okolí	t_{in}	18	$^{\circ}C$	Naměřená teplota okolí
Přepočet teploty ve $^{\circ}C$ na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	$0^{\circ}C \approx 273,15 K$
Rozdíl teplot	Δt	8,00	$^{\circ}C$	$\Delta t = (t_w - t_{in})$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Rozdíl teplot	ΔT	8,00	K	$\Delta T = (T_w - T_{in})$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Střední teplota	t_s	22	$^{\circ}C$	$t_s = (t_w + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	ms^{-2}	konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,57E-05	m^2s^{-1}	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	$kJ kg^{-1} K^{-1}$	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,52E-02	$W m^{-1} K^{-1}$	Tabulková hodnota
Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,39E-03	K^{-1}	$\beta = 1/(t_s + 273,15)$

Grashofovo kritérium	Gr	2,93E+09	-	$Gr = g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtova kritéria	$Gr Pr$	2,14E+09	-	$Gr Pr$
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,73E+02	-	$Nu = c (Gr Pr)^n$
Součinitel přestupu tepla	α_0	3,12E+00	$W m^{-2} K^{-1}$	$\alpha_0 = (Nu \lambda) / l$
Tepelný tok	Q_0	3,38E+02	W	Celkový tepelný tok ze svislých stěn podstavy a do okolního prostředí $Q_0 = \alpha_0 A_0 (t_w - t_{in})$

$Gr Pr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

Obr. 17 Tabulka výpočtu tepelného toku neizolované podstavy pro volnou konvekci při zimním režimu

Postup výpočtu tepelného toku mezi podstavcem, izolací a venkovním okolím, kdy mezi izolací a podstavcem dochází k nucené konvekci

Materiál podstavy - beton

Materiál navržené izolace - ocelový plech a plst'

Poznámka :

Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty
Platí pro nucenou konvekci

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	a	0,9000	m	Zadané dle výkresu
Strana	b	0,2700	m	Zadané dle výkresu
Strana	c	0,8254	m	Zadané dle výkresu
Strana	d	0,7800	m	Zadané dle výkresu

Strana	e	0,3000	m	Zadané dle výkresu
Strana	f	0,6300	m	Zadané dle výkresu
Strana	g	1,3500	m	Zadané dle výkresu
Strana	h	8,2470	m	Zadané dle výkresu
Šířka štěrbin	δ	0,0050	m	
Délka štěrbin	l_s	10,0470	m	
Tloušťka Ocelového plechu	$\delta_{Oc\ plechu}$	0,0030	m	
Tloušťka izolace	$\delta_{Izolace}$	0,0500	m	
Charakteristický rozměr	l	1,3954	m	Kratší strana
Plocha	A_1	1,0287	m^2	Dle obrázku
Plocha	A_2	1,0287	m^2	Dle obrázku
Plocha	A_3	11,5079	m^2	Dle obrázku
Celková plocha	$A_{vnější}$	13,5653	m^2	Teplosměnná plocha obvodu ($A_1+A_2+A_3$)
Teplota povrchu	t_w	26	$^{\circ}C$	Požadovaná teplota povrchu a uvnitř podstavy
Teplota Ocelového plechu	$t_{Oc\ plechu}$	28	$^{\circ}C$	
Teplota okolí	t_{in}	30	$^{\circ}C$	Naměřená teplota okolí
Přepočtení teploty ve $^{\circ}C$ na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	$0^{\circ}C \approx 273,15\ K$
Rozdíl teplot	Δt	2,00	K	$\Delta t = (t_{in} - t_{oc})$ - rozdíl teplot okolního prostředí povrchu ocelového plechu
Rozdíl teplot	ΔT	2,00	$^{\circ}C$	$\Delta T = (T_{in} - T_{oc})$ - rozdíl teplot okolního prostředí povrchu ocelového plechu
Rozdíl teplot	$\Delta T_{Izolace}$	4,00	$^{\circ}C$	$\Delta T = (T_{in} - T_w)$ - rozdíl teplot vzduchu v okolním prostředí a ve štěrbině
Rozdíl teplot	$\Delta T_{Izolace}$	4,00	K	$\Delta t = (t_{in} - t_w)$ - rozdíl teplot vzduchu v okolním prostředí a ve štěrbině
Střední teplota	t_s	26,00	$^{\circ}C$	$t_s = t_w$
Střední teplota	t_s	29,00	$^{\circ}C$	$t_s = (t_{oc} + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	$m\ s^{-2}$	konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,66E-05	$m^2\ s^{-1}$	Tabulková hodnota
Kinematická viskozita	ν	1,66E-05	$m^2\ s^{-1}$	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$	Tabulková hodnota
Prandtlův kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,58E-02		Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,52E-02	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	Tabulková hodnota
Hustota	ρ	1,15E+00	$kg\ m^{-3}$	
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Oc\ plech}$	4,70E+01	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	Tabulková hodnota (Ocel měkká tl. 3 mm)
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Izolace}$	3,60E-02	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	Tabulková hodnota (PLSŤ tl. 50 mm)
Reynoldsovo kritérium	Re	3,00E+03	-	Zvolená hodnota
Ekvivalentní průměr	d_{ek}	1,00E-02		$d_{ek} = 4(\delta\ l)/(2(\delta + l))$
Rychlost proudění	v	4,98E+00	$m\ s^{-1}$	$v = Re\ \nu / d_{ek}$

Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,31E-03	K ⁻¹	$\beta=1/(ts+273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	6,40E+08	-	$Gr= g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtlůva kritéria	$Gr Pr$	4,67E+08	-	$Gr Pr$
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,04E+02	-	$Nu=c (Gr Pr)^n$
Pecletovo kritérium	Pe	2,23E+03	-	$Pe=v d_{ekv}/a$
Teplotní vodivost	a	2,23E-05	m ² s ⁻¹	$a=\lambda /(\rho c_p)$
Nusseltovo kritérium	Nu	8,67E+00	-	$Nu=0,116 (Re^{2/3} \cdot 125) Pr^{1/3} (1+(d_{ekv}/l)^{2/3}) \cdot (h/h_w)^{0,14}$
Součinitel přestupu tepla	α_{nuc}	2,24E+01	-	$\alpha_0=(Nu \lambda)/d_{ekv}$
Součinitel přestupu tepla	α_0	1,88E+00	W m ⁻² K ⁻¹	$\alpha_0=(Nu \lambda)/l$
Tepelný tok	Q_0	5,10E+01	W	Tepelný tok mezi okolním prostředím a povrchem ocelového plechu $Q_0=\alpha_0 A (t_{in}-t_{oc})$
Součinitel prostupu tepla	k	5,09E-01	W m ⁻² K ⁻¹	$k=1/(1/\alpha_{nuc}+1/\alpha_0+1/\delta_{oc} \text{ plechu}+1/\lambda_{oc} \text{ plechu}+1/\lambda_{izolace}+1/\lambda_{izolace})$
Tepelný tok	Q_{nuc}	2,76E+01	W	Tepelný tok skrz izolaci podstavy z okolního prostředí $Q_{nuc}=k A_{vn}(t_{in}-t_w)$

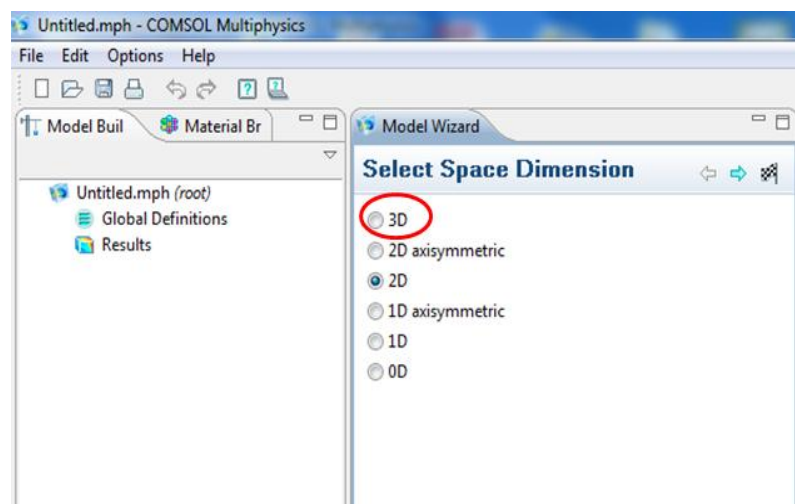
$Gr Pr$	c	n	°C /normální tlak	η (Pa s)
<10000>	0,6	0,000	18	1,2090E-06
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125	20	1,2010E-06
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250	24	1,1850E-06
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333	26	1,1770E-06

Obr. 18 Tabulka výpočtu tepelného toku neizolované podstavy pro volnou konvekci při zimním režimu

Simulace rozložení teploty v podstavě a v příčniku obráběcího stroje v programovém prostředí Comsol Multiphysics

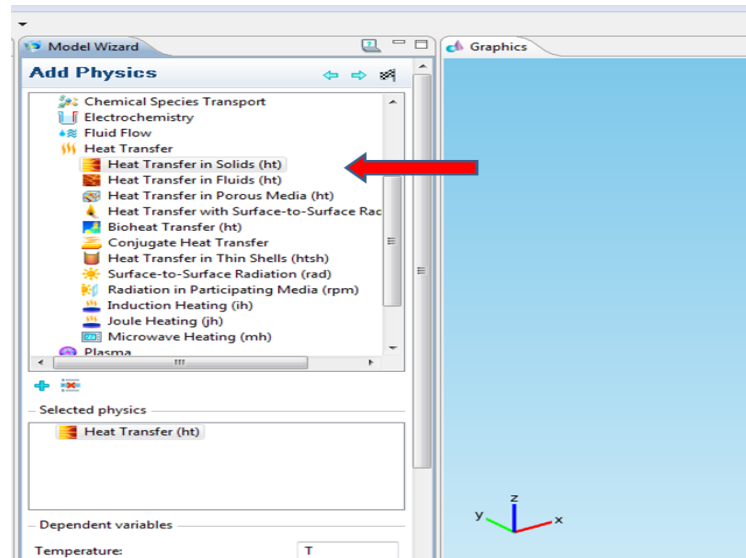
Obecný postup přípravy modelu v prostředí Comsol Multiphysics se skládá z několika kroků. Nejdříve je potřeba určit modul, který bude použit pro daný výpočet. Následně je potřeba určit, zda má být provedeno modelování ve 2D nebo 3D zobrazení a určit, zda se jedná o stacionární či nestacionární děj. Poté je možno nadefinovat potřebné parametry. Pomocí grafických nástrojů se provede nákras příslušného tělesa či skupiny těles, která tvoří daný model. Dále se určí termofyzikální vlastnosti těles v modelu. Následně je potřeba nadefinovat příslušné počáteční a okrajové podmínky. V poslední fázi přípravy se zvolí typ a jemnost sítě potřebné pro numerický výpočet. Při nestacionárním ději se ještě zadá délka trvání a délka časového kroku. Poté se spustí automatický výpočet.

Příklad výpočtu uvádím na modelování rozložení teploty v neizolované podstavě při zimním provozu s využitím součinitelů přestupu tepla, které jsem vypočítal v naprogramované aplikaci v programovém prostředí Microsoft Excel. Pro simulaci rozložení teploty jsem zvolil v nabídce „Select Space Dimension“ variantu 3D (viz obr. 19) .



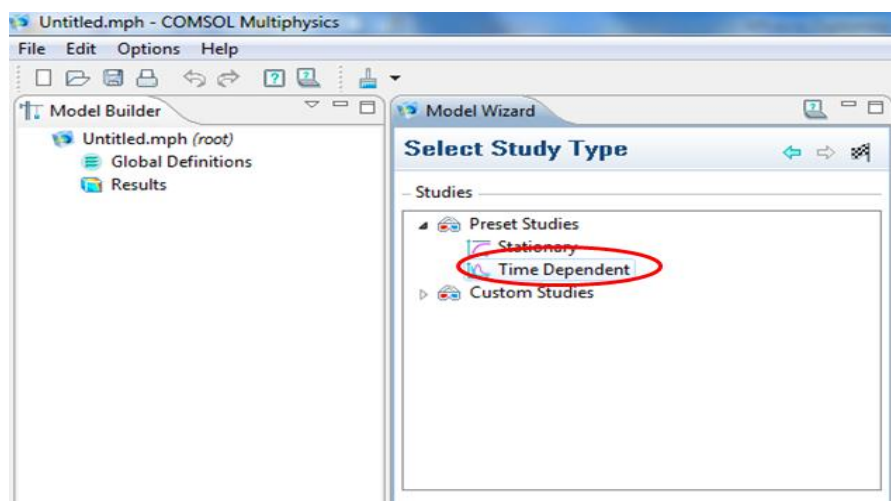
Obr. 19 Volba 2D či 3D zobrazení modelu v prostředí Comsol Multiphysics

Dále jsem zvolil z nabídky „Add Physics“ variantu sdílení tepla v tuhých látkách „Heat transfer in solids“ modulu „Heat transfer“, který je určen pro popis sdílení tepla (obr. 20).



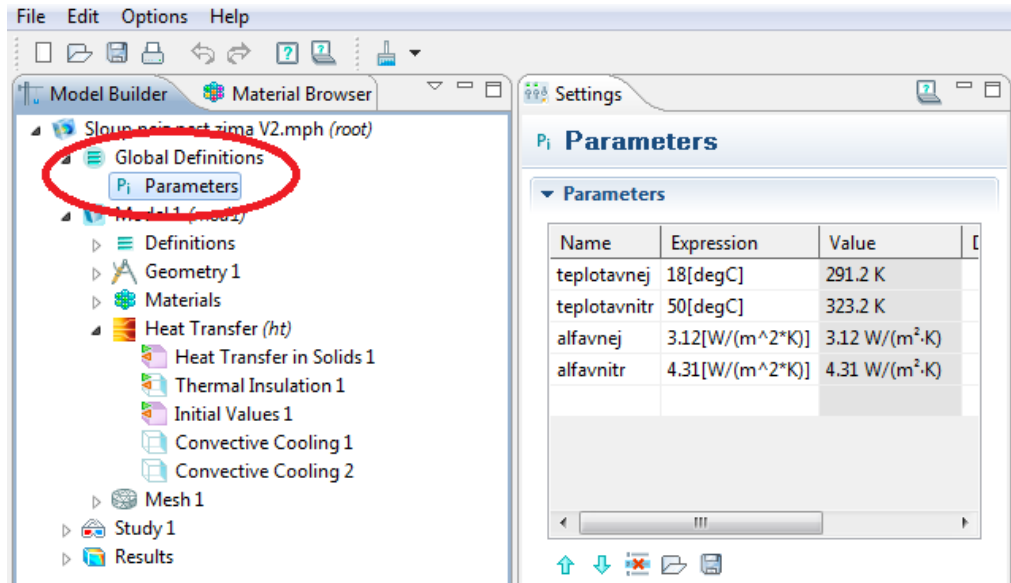
Obr. 20 Volba požadovaného modulu a jeho specifikace v prostředí Comsol Multiphysics

Z nabídky „Select Study Type“ jsem zvolil variantu „Time Dipendent“ pro popis nestacionárního sdílení tepla (obr. 21).



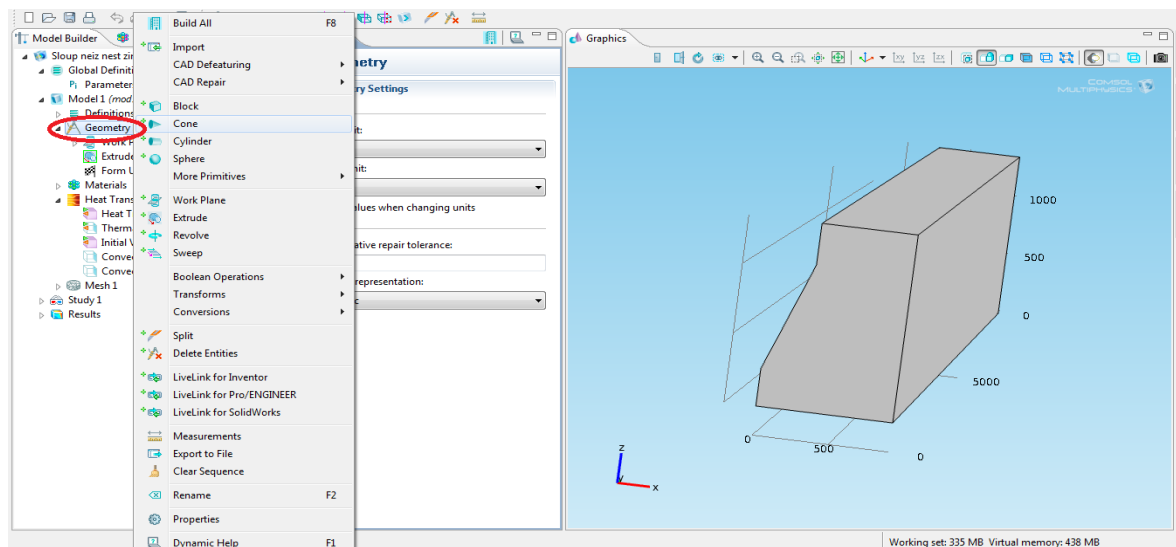
Obr. 21 Volba stacionárního či nestacionárního děje v prostředí Comsol Multiphysics

V nabídkovém stromu „Model Builder“ jsem zvolil „Global Definitions“, poté „Parameters“ a do tabulky k tomu určené jsem nadeřinoval potřebné parametry – teplotu a součinitele přestupu tepla na vnější i vnitřní straně podstavy (obr. 22).



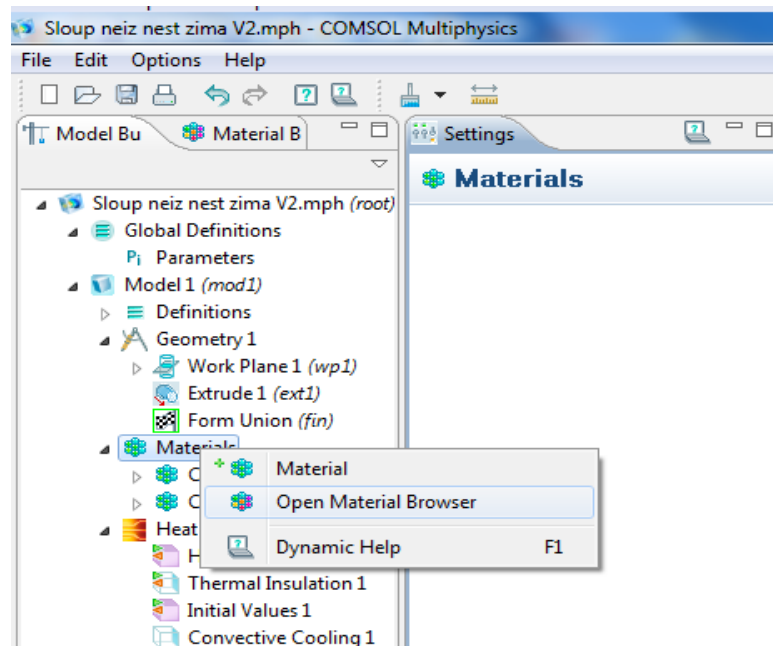
Obr. 22 Nadeřinování potřebných parametrů v prostředí Comsol Multiphysics

V nabídkovém stromu „Model Builder“ jsem zvolil „Geometry“, a pomocí příslušných grafických nástrojů jsem vytvořil náčrt podstavy (obr. 23).

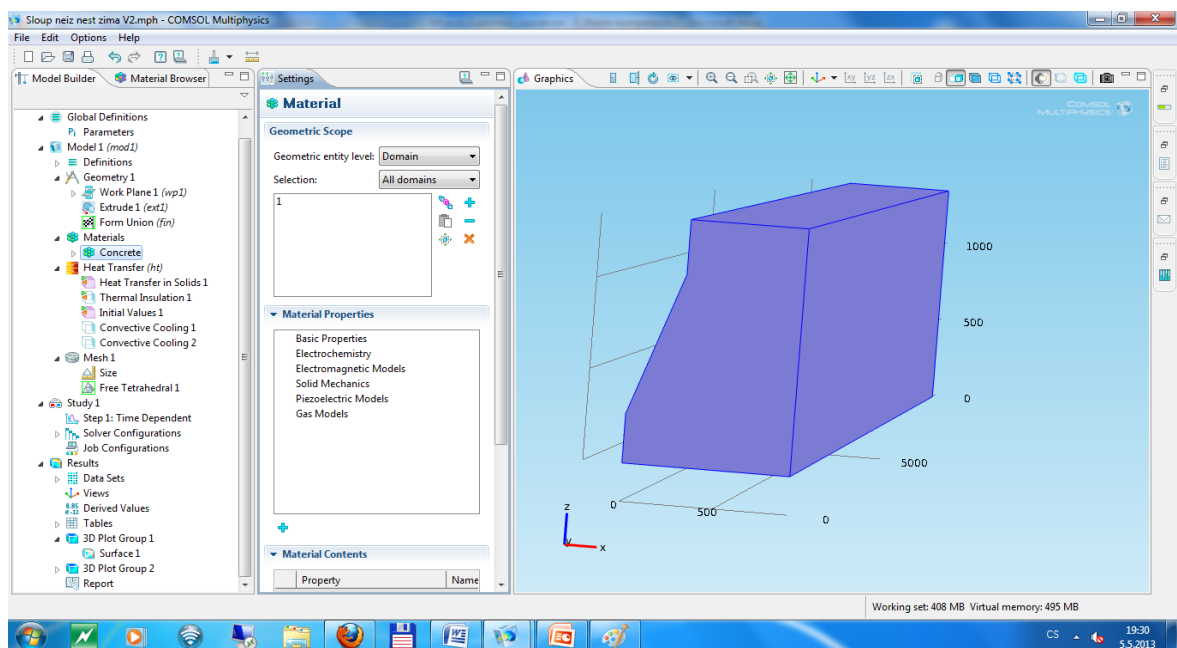


Obr. 23 Vytvoření grafiky modelu v prostředí Comsol Multiphysics

V nabídce „Materials“ jsem volbou „Open Material Browser“ spustil knihovnu materiálů a v ní jsem vyhledal beton a nadeřinoval jsem jej do modelu.(obr. 24 a 25).

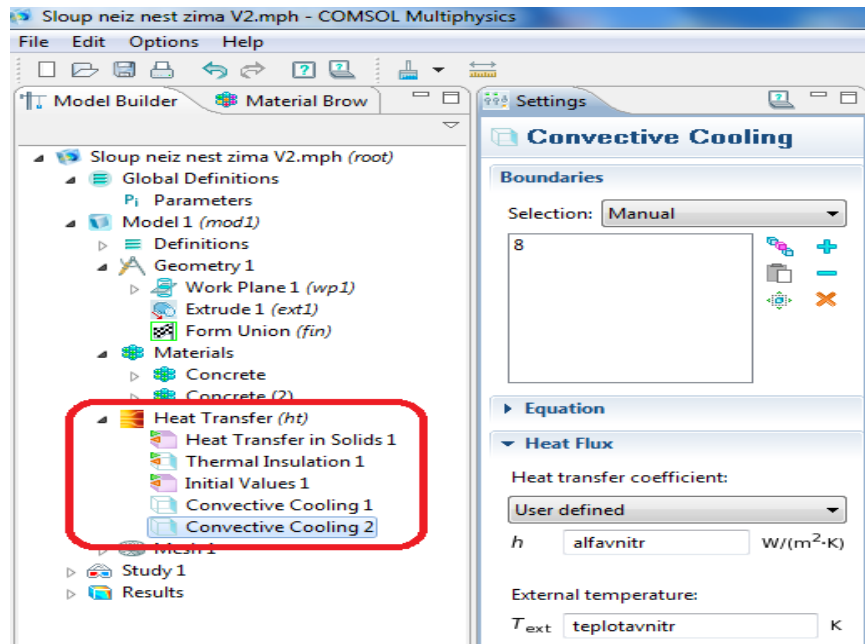


Obr. 24 Otevření knihovny materiálů v prostředí Comsol Multiphysics



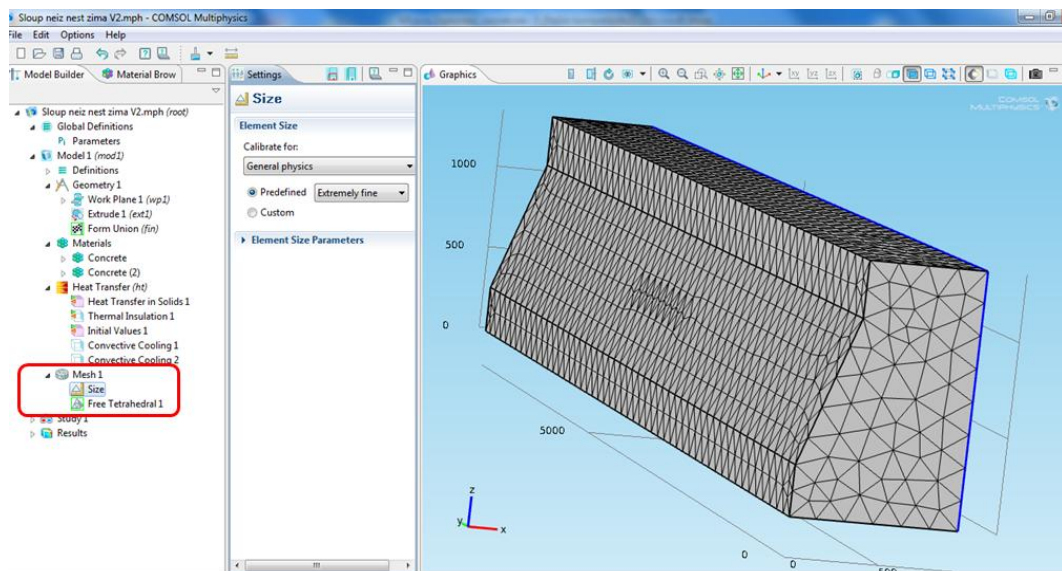
Obr. 25 Nadefinování materiálu do tělesa modelu v prostředí Comsol Multiphysics

V nabídce „Heat transfer“ jsem nadefinoval počáteční a okrajové podmínky – počáteční teplotu stěny, součinitele přestupu tepla a teploty uvnitř a vně podstavy (obr. 26).



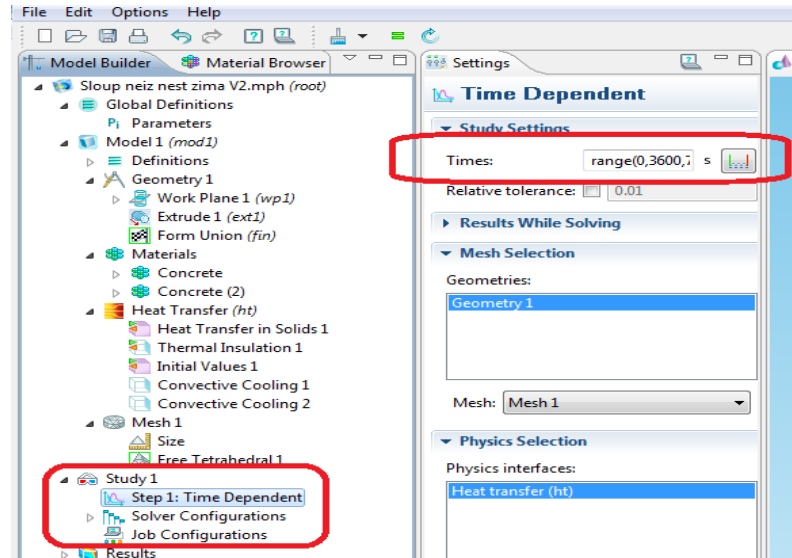
Obr. 26 Nadefinování počátečních a okrajových podmínek modelu v prostředí Comsol Multiphysics

V nabídce „Mesh 1“ jsem navolil velikost a geometrický tvar mřížky pro numerický výpočet (obr. 27).

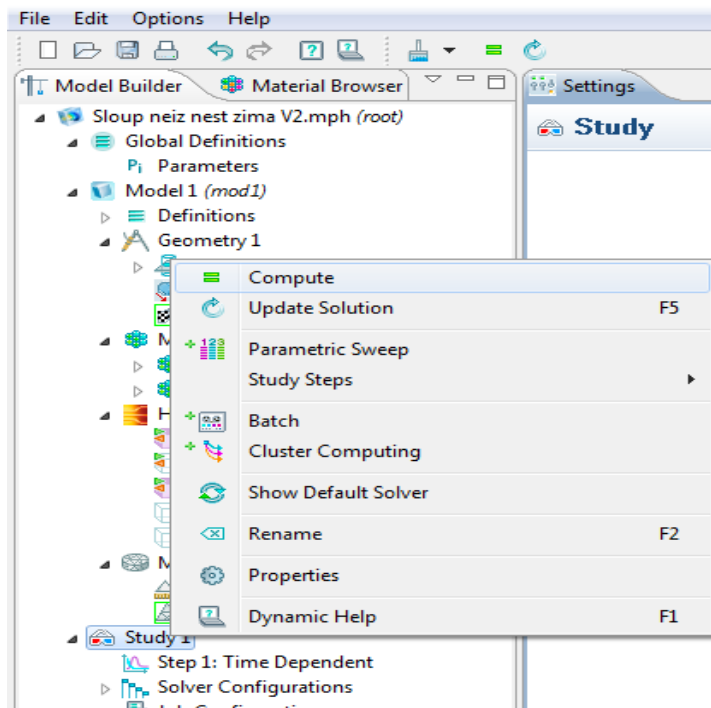


Obr. 27 Nadefinování geometrického tvaru a velikosti mřížky pro numerický výpočet modelu v prostředí Comsol Multiphysics

V nabídce „Study“ jsem zvolil položku „Step 1: Time Dependent“ a v políčku „Times“ jsem navolil časový krok a dobu trvání ohřevu podstavy (obr. 28). Volbou „Compute“ jsem spustil výpočet rozložení teploty v podstavě obráběcího zařízení (obr. 29).

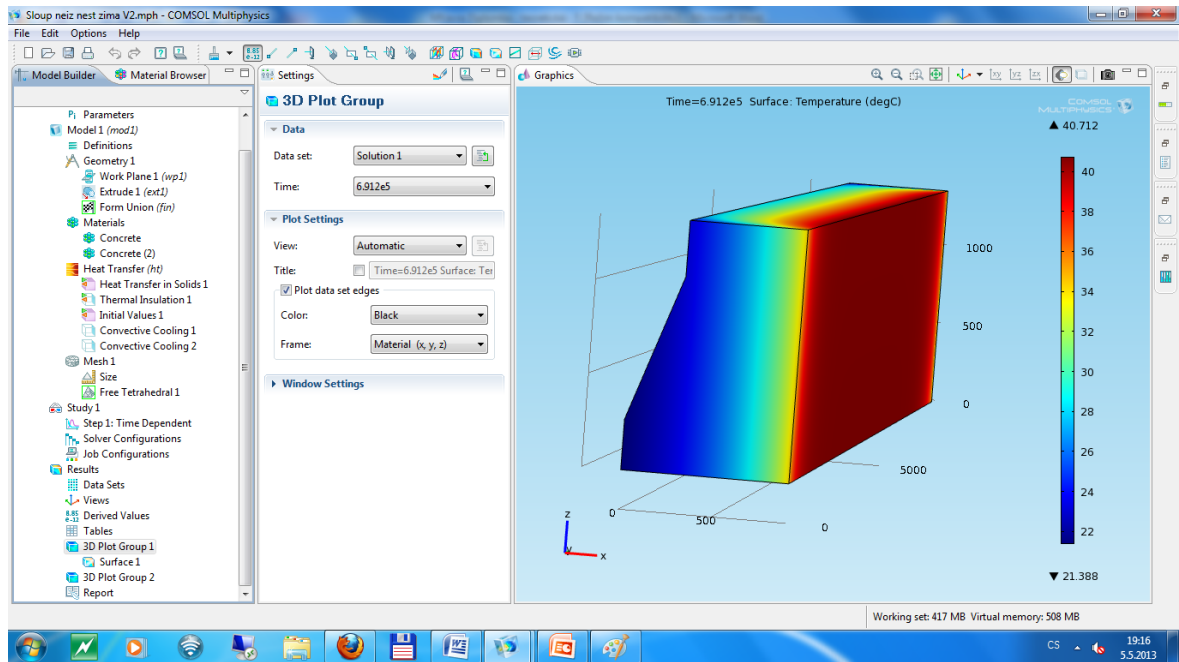


Obr. 28 Nadefinování délky trvání procesu a časového kroku v prostředí Comsol Multiphysics



Obr. 29 Spuštění numerického výpočtu v prostředí Comsol Multiphysics

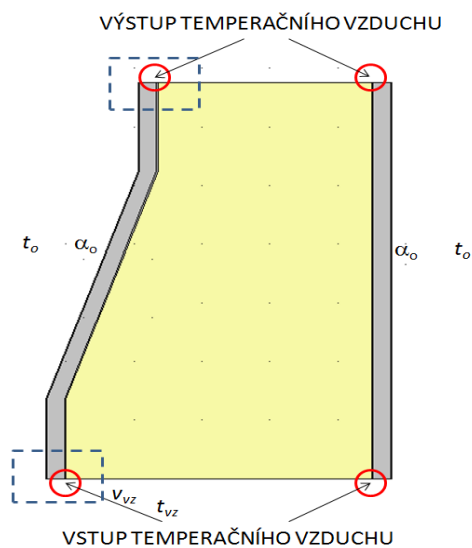
Po ukončení výpočtu se v grafickém okně zobrazí výsledný model (obr. 30), který lze pomocí nabídky „Results“ zobrazit v podobě řezů, grafů či exportovat vypočtená data apod.



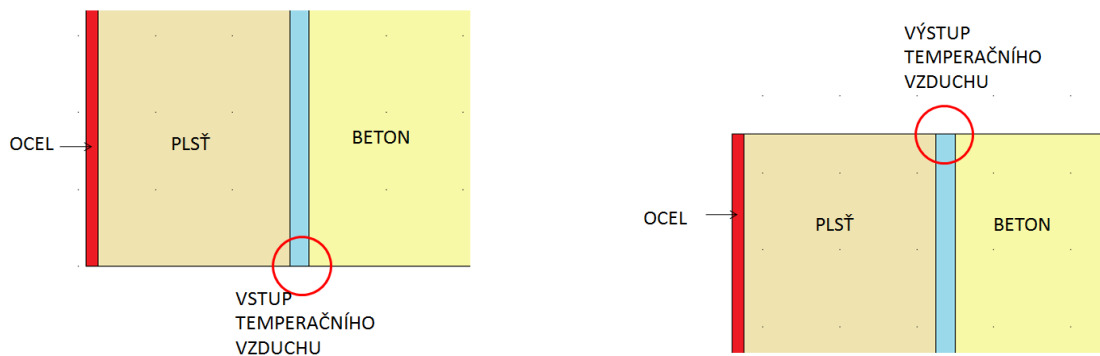
Obr. 30 Okno s vypočteným rozložením teploty neizolované podstavě obráběcího stroje při zimním provozu v prostředí Comsol Multiphysics

3.1 Simulace rozložení teploty při temperaci podstavy obráběcího stroje

Pro dosažení požadované teploty stěn podstavy obráběcího boxu jsem navrhl temperaci tak, že sloupy podstavy budou od okolního prostředí v hale i od prostředí v obráběcím boxu izolovány vrstvou plsti a budou z vnější strany oplechovány. Temperační vzduch bude vháněn ze spodní strany podstavy do štěrbinu betonovou stěnou a izolační vrstvou. V horní části sloupu bude vzduch ze štěrbinu odcházet. Schéma návrhu izolace podstavy s detailem místa vstupu a výstupu temperačního vzduchu jsou znázorněny na následujících obrázcích (obr.31 a obr.32).



Obr. 31 Schéma návrhu temperace izolovaného sloupu podstavy obráběcího stroje



Obr. 32 Detail místa přívodu temperačního vzduchu (vlevo) a odvodu temperačního vzduchu (vpravo) do sloupu podstavy obráběcího stroje

Simulace v zimním provozním režimu

Simulaci rozložení teploty při teplotě podstavý obráběcího stroje jsem provedl za těchto podmínek:

Počáteční teplota stěny: 15 °C

Teplota okolí při zimním provozu 18 °C

Teplota uvnitř obráběcího boxu: 50 °C

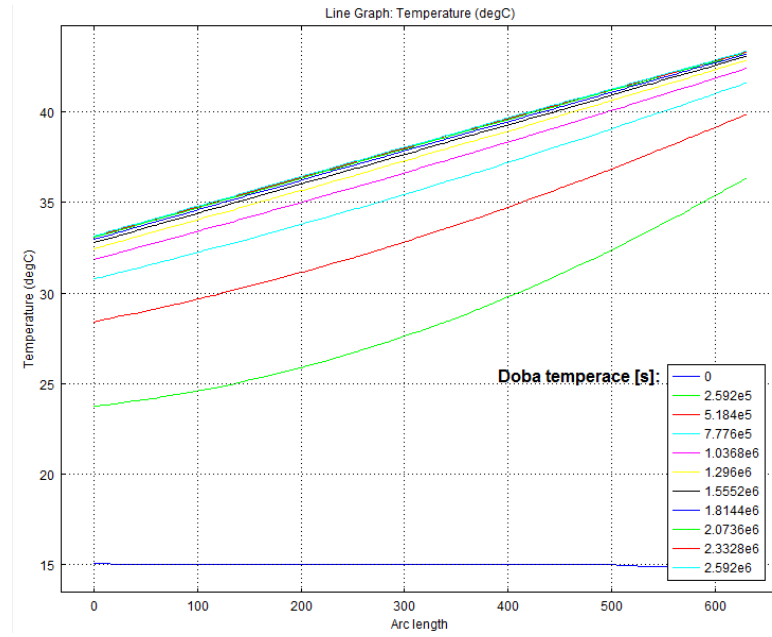
Součinitel přestupu tepla na vnější stěně při zimním provozu: 3,12 W.m⁻².K⁻¹

Součinitel přestupu tepla na straně obráběcího boxu: 4,31 W.m⁻².K⁻¹

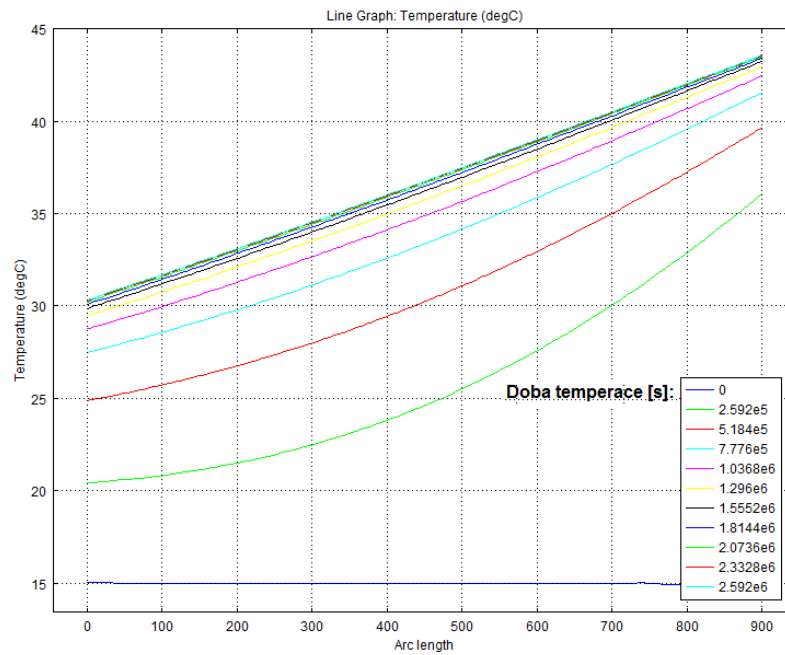
Rychlost proudění vzduchu na vnitřní stěně podstavý: 5,58 m.s⁻¹

Rychlost proudění vzduchu na vnitřní stěně podstavý: 4,85 m.s⁻¹

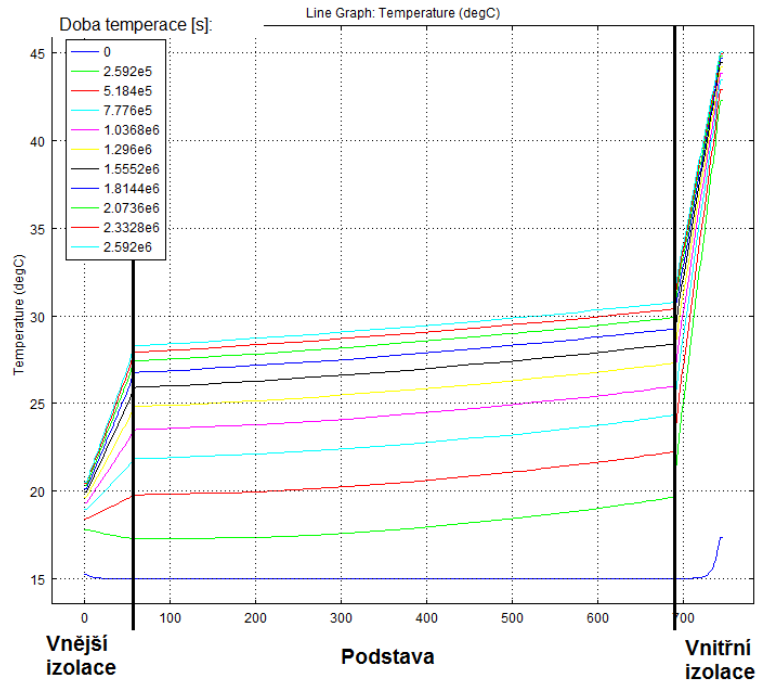
Grafické průběhy na obr. 33 - 36 znázorňují rozložení teploty ve stěně neizolované a izolované podstavý po dobu 30 dní při zimním provozu, kdy se předpokládá teplota prostředí v hale 18 °C. Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavý v časech teploty 1 hodina, 1 den, 3 dny, 8 dní zachycují obr. 37 - 41. Je zřejmé, že teplota v izolovaném sloupu se zvyšuje s narůstající dobou teploty pomaleji. Zároveň je patrné, že rozložení teploty po celé šířce izolovaném sloupu se v daném čase příliš nemění. Naproti tomu u neizolované stěny se v příslušném čase teplota vždy prudce snižuje ve směru od obráběcího prostoru do okolí.



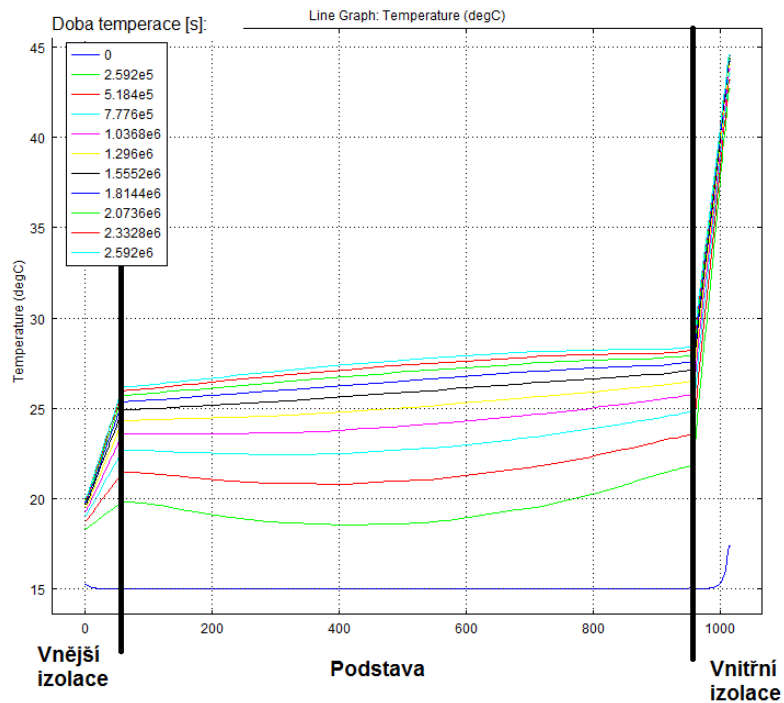
Obr. 33 Průběh teplot při temperaci ve zúžené (horní) části neizolované podstavky po dobu 30 dní - zimní režim provozu



Obr. 34 Průběh teplot při temperaci rozšířené (dolní) části neizolované podstavky po dobu 30 dní - zimní režim provozu

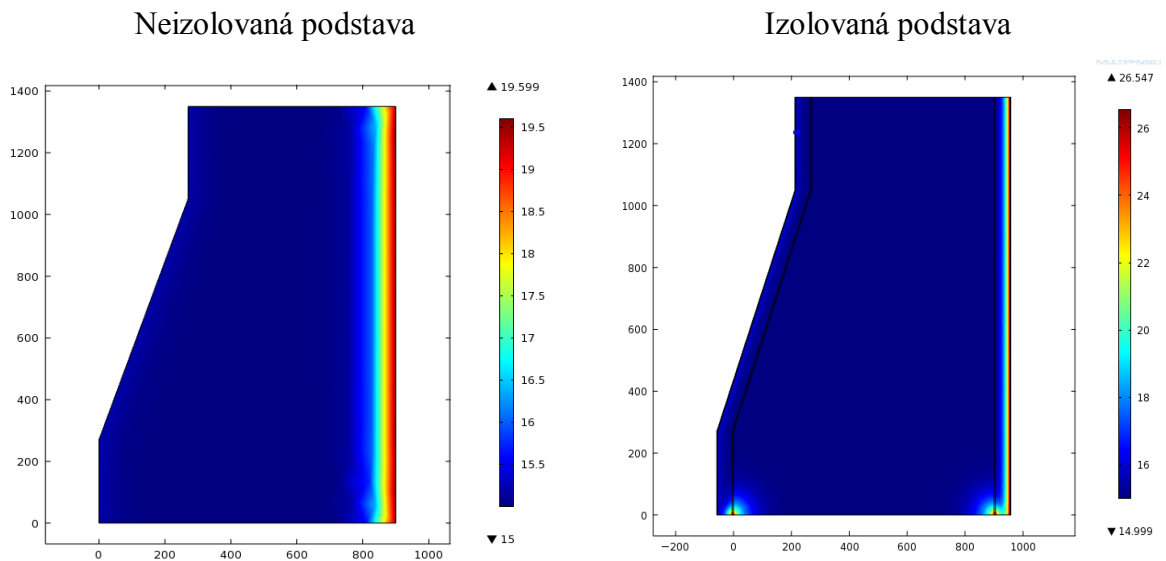


Obr. 35 Průběh teplot při temperaci zúžené (horní) části izolované podstavy po dobu 30 dní - zimní režim provozu



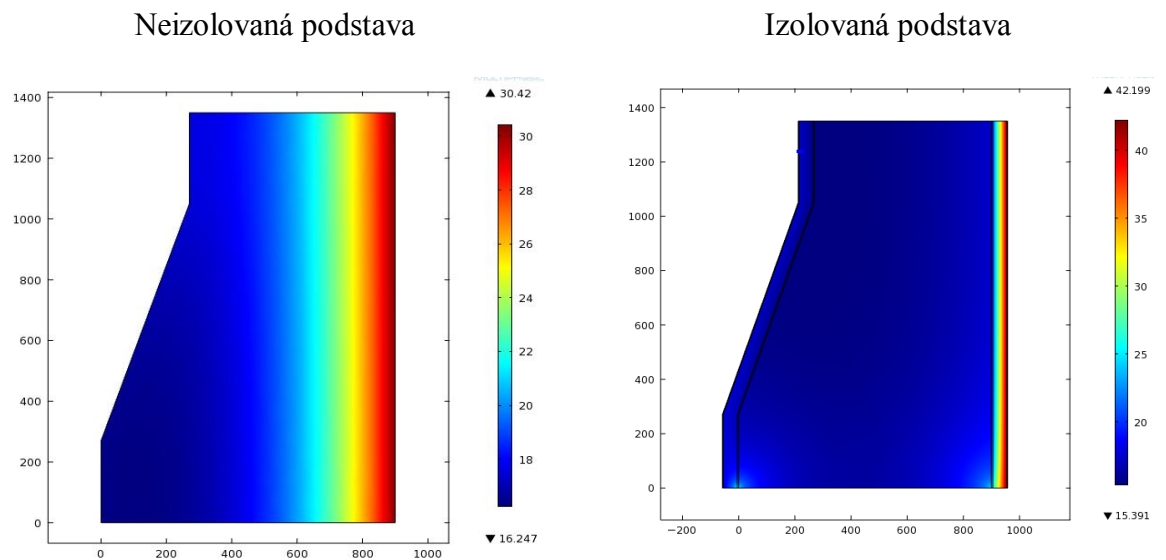
Obr. 36 Průběh teplot při temperaci v rozšířené (dolní) části izolované podstavy po dobu 30 dní - zimní režim provozu

Doba temperace: 1 hodina



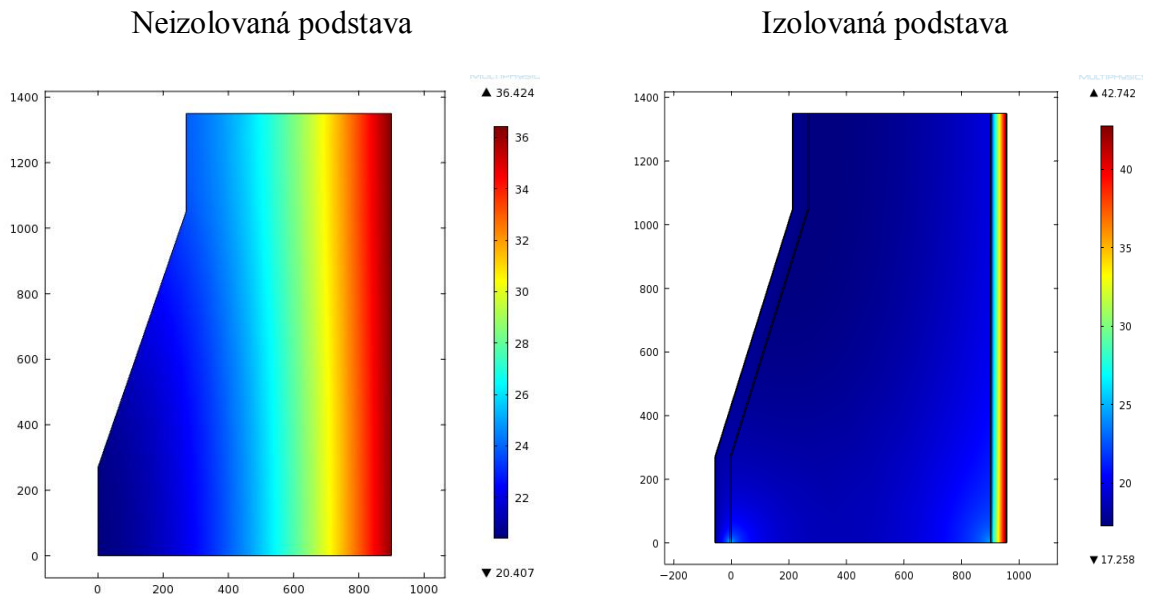
Obr. 37 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 1 hodina - zimní režim provozu

Doba temperace: 1 den



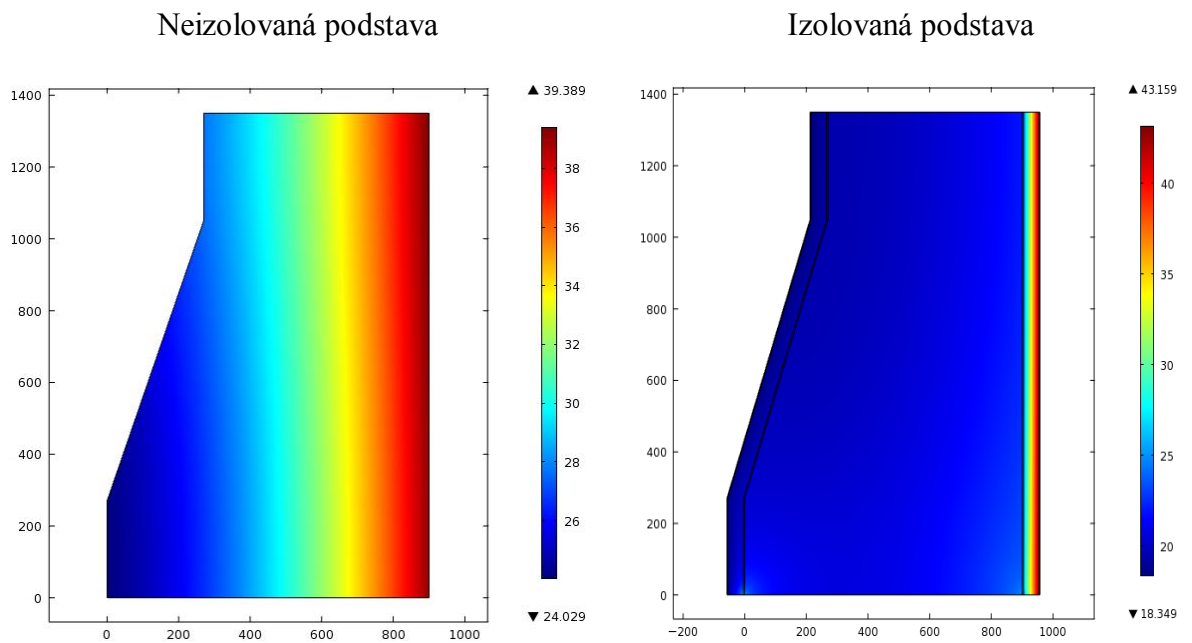
Obr. 38 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 1 den - zimní režim provozu

Doba temperace: 3 dny



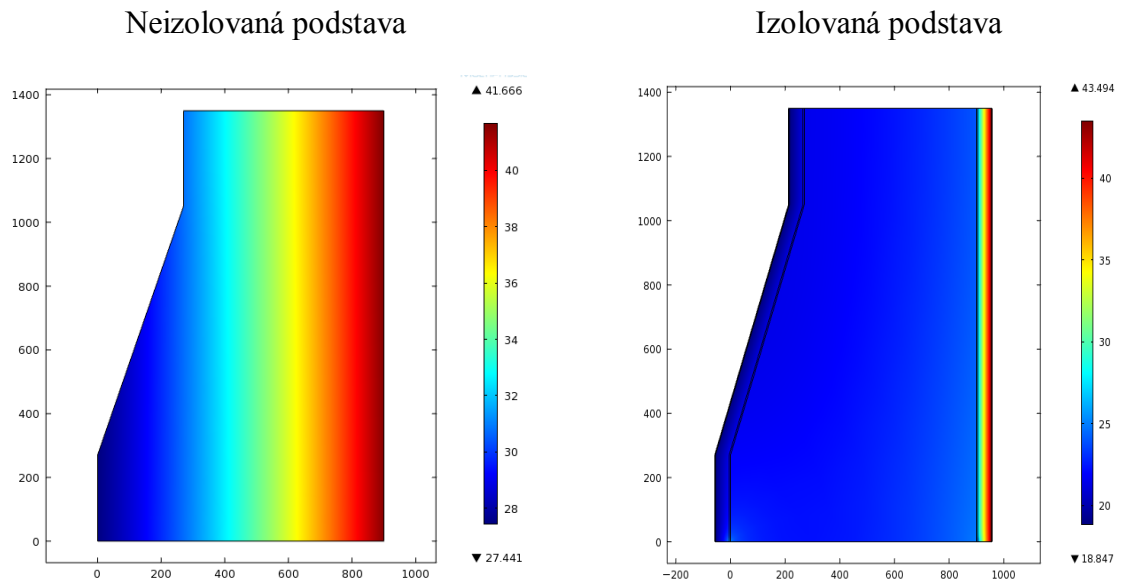
Obr. 39 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavky při v čase temperace 3 dny - zimní režim provozu

Doba temperace: 5 dní



Obr. 40 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavky při v čase temperace 5 dní - zimní režim provozu

Doba temperace: 8 dní



Obr. 41 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 8 dní - zimní režim provozu

Simulace v letním provozním režimu

Simulaci rozložení teploty při temperaci podstavy obráběcího stroje jsem provedl za těchto podmínek:

Počáteční teplota stěny: 15 °C

Teplota okolí při letním provozu 30 °C

Teplota uvnitř obráběcího boxu: 50 °C

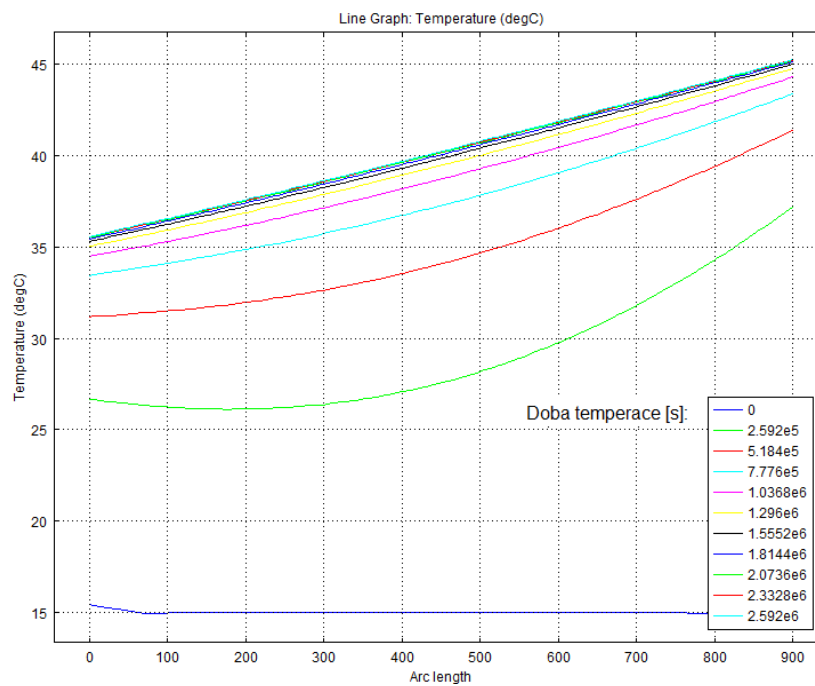
Součinitel přestupu tepla na vnější stěně při letním provozu: 2,43 W.m⁻².K⁻¹

Součinitel přestupu tepla na straně obráběcího boxu při letním i zimním provozu: 4,31 W.m⁻².K⁻¹

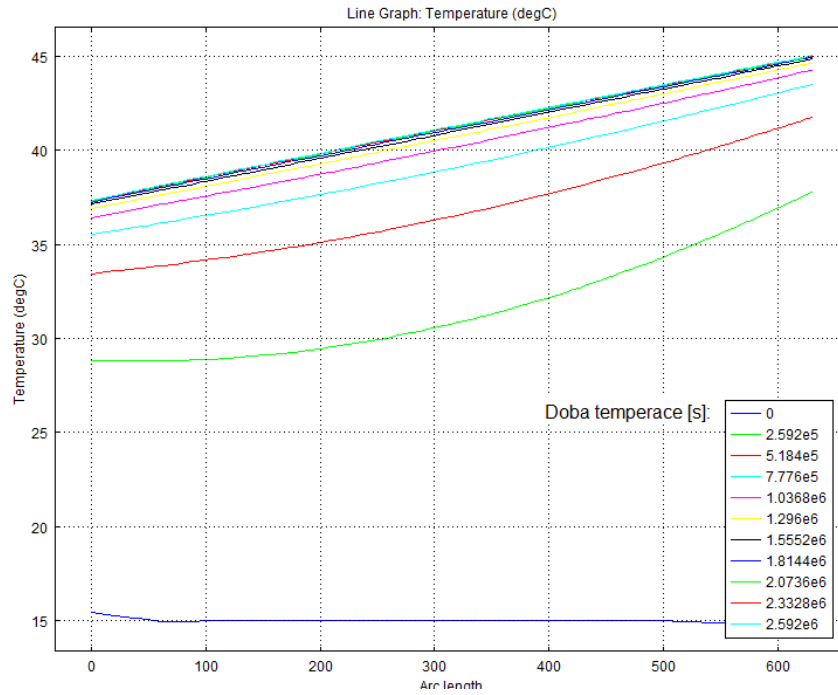
Rychlost proudění vzduchu na vnitřní stěně podstavy 5,58 m.s⁻¹

Rychlost proudění vzduchu na vnitřní stěně podstavy 4,85 m.s⁻¹

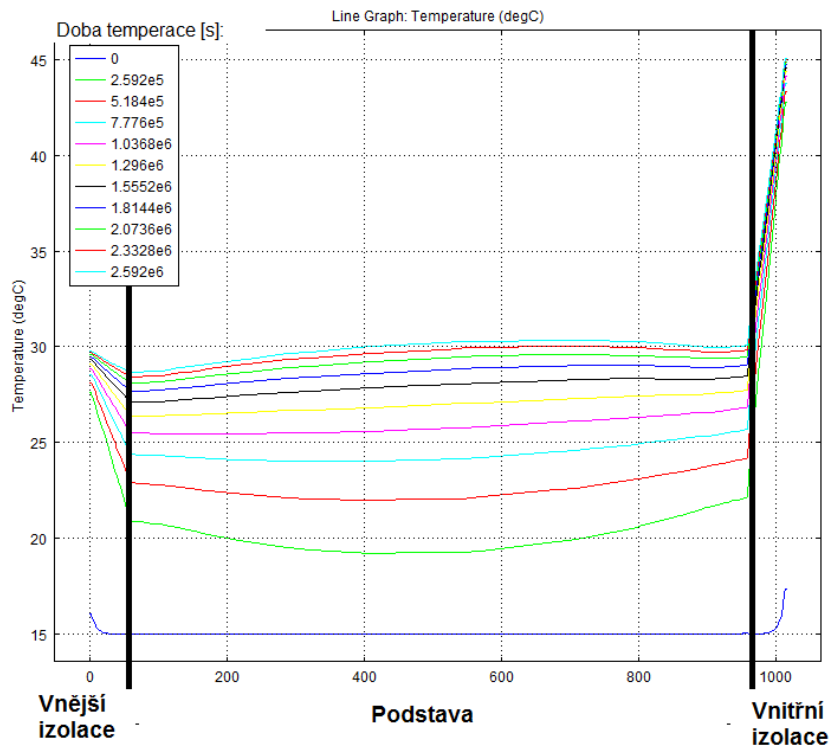
Grafické průběhy na obr. 42 - 45 znázorňují rozložení teploty ve stěně neizolované a izolované podstavy po dobu 30 dní při letním provozu, kdy se předpokládá teplota vzduchu v hale cca 30 °C. Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy v časech teploty 1 hodina, 1 den, 3 dny, 8 dní zachycují obr. 46 - 50. Grafické průběhy v neizolované i v izolované podstavě mají stejný trend jako při zimním provozu s tím, že je teplota stěny podstavy vyšší vlivem vyšší teploty v hale oproti zimnímu období.



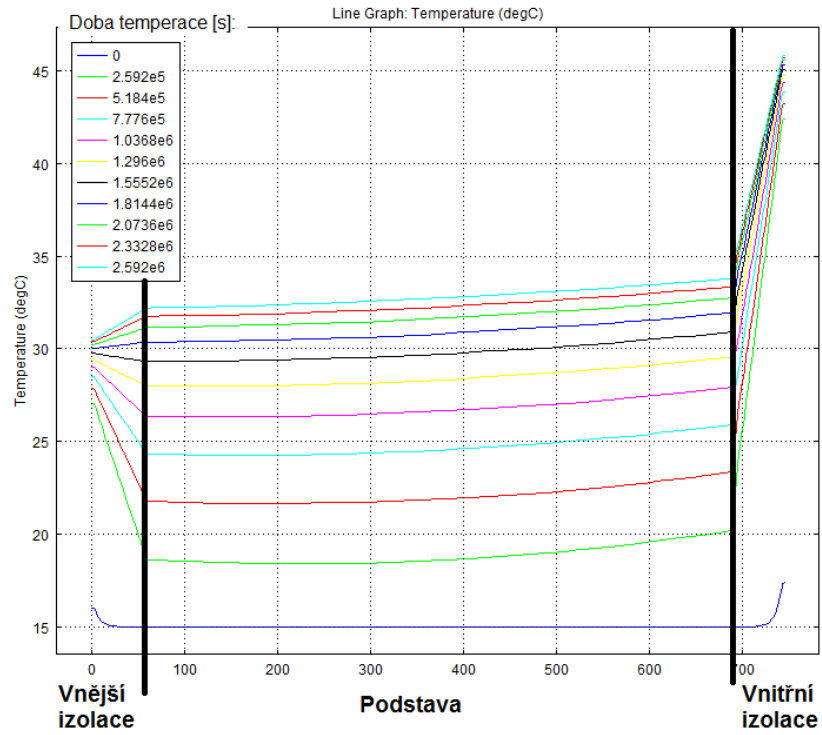
Obr. 42 Průběh teplot při temperaci rozšířené (dolní) části neizolované podstavy po dobu 30 dní - letní režim provozu



Obr. 43 Průběh teplot při temperaci ve zúžené (horní) části neizolované podstavy po dobu 30 dní - letní režim provozu



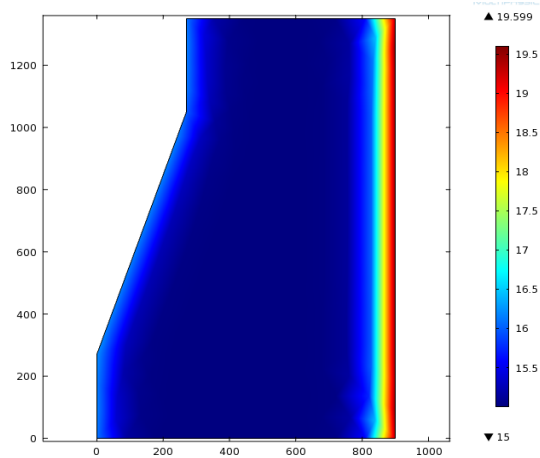
Obr. 44 Průběh teplot při temperaci v rozšířené (dolní) části izolované podstavy po dobu 30 dní - letní režim provozu



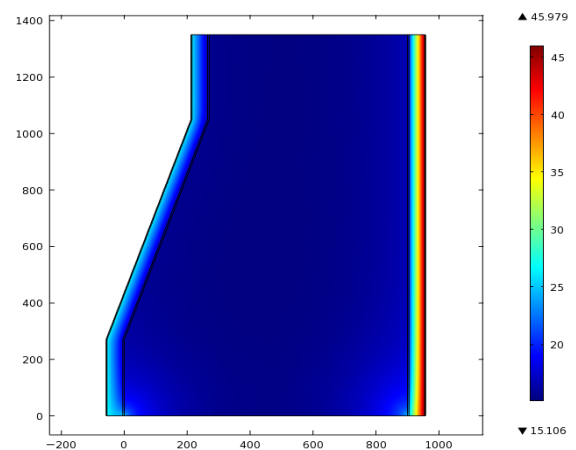
Obr. 45 Průběh teplot při temperaci ve zúžené (horní) části izolované podstavy po dobu 30 dní - letní režim provozu

Doba temperace: 1 hodina

Neizolovaná podstava



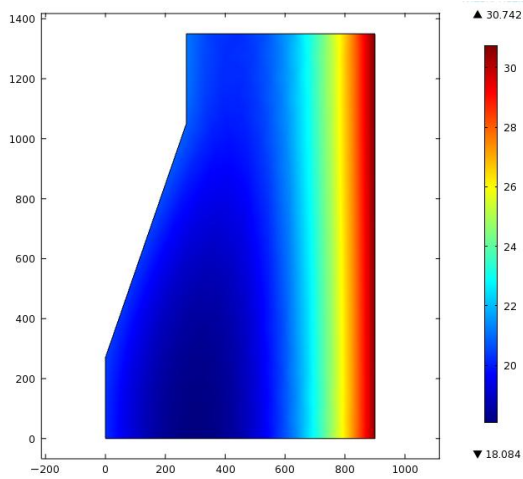
Izolovaná podstava



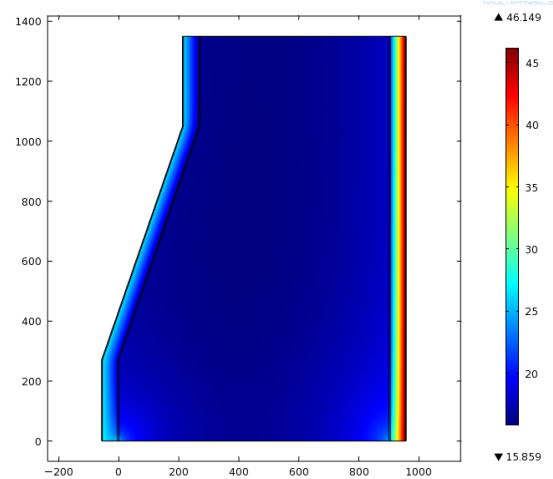
Obr. 46 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 1 hodina - letní režim provozu

Doba temperace: 1 den

Neizolovaná podstava



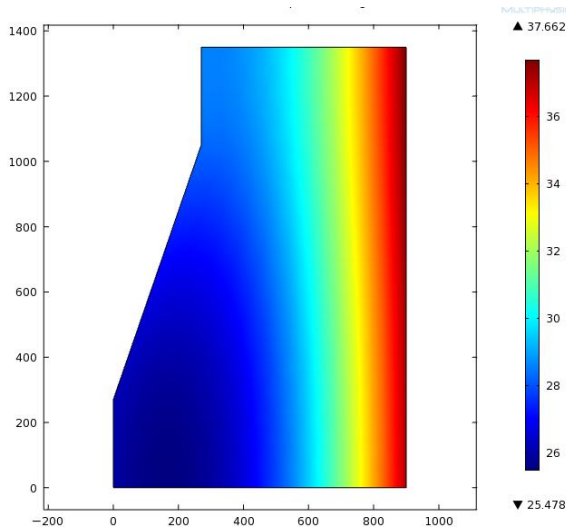
Izolovaná podstava



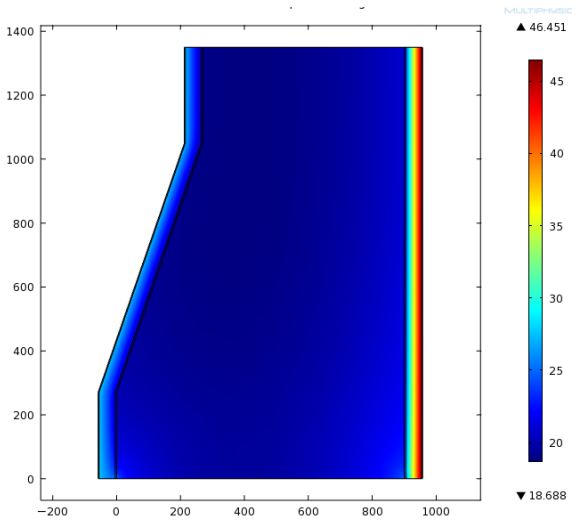
Obr. 47 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 1 den - letní režim provozu

Doba temperace: 3 dny

Neizolovaná podstava



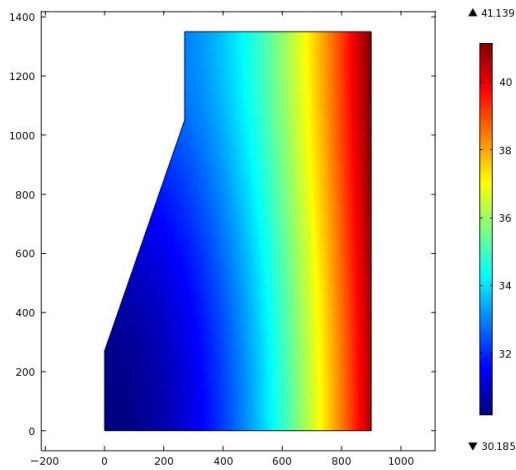
Izolovaná podstava



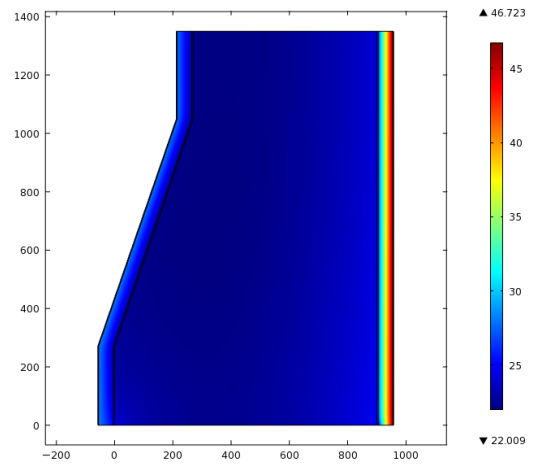
Obr. 48 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 3 dny - letní režim provozu

Doba temperace: 5 dní

Neizolovaná podstava



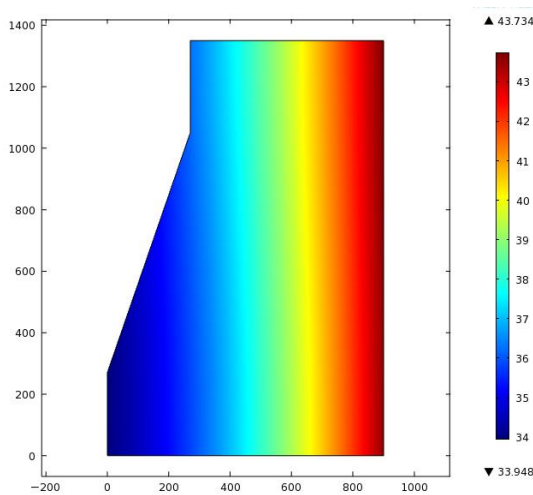
Izolovaná podstava



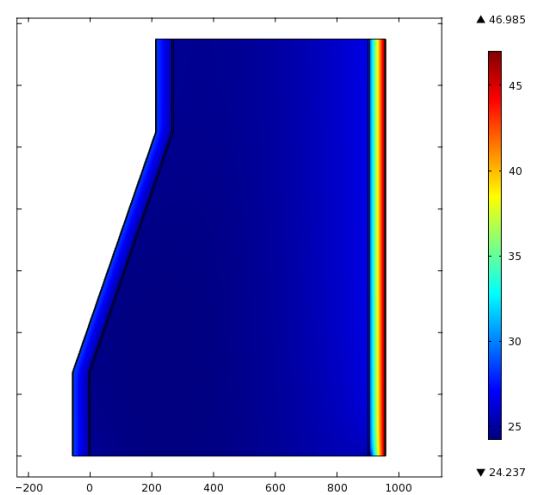
Obr. 49 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 5 dní - letní režim provozu

Doba temperace: 8 dní

Neizolovaná podstava



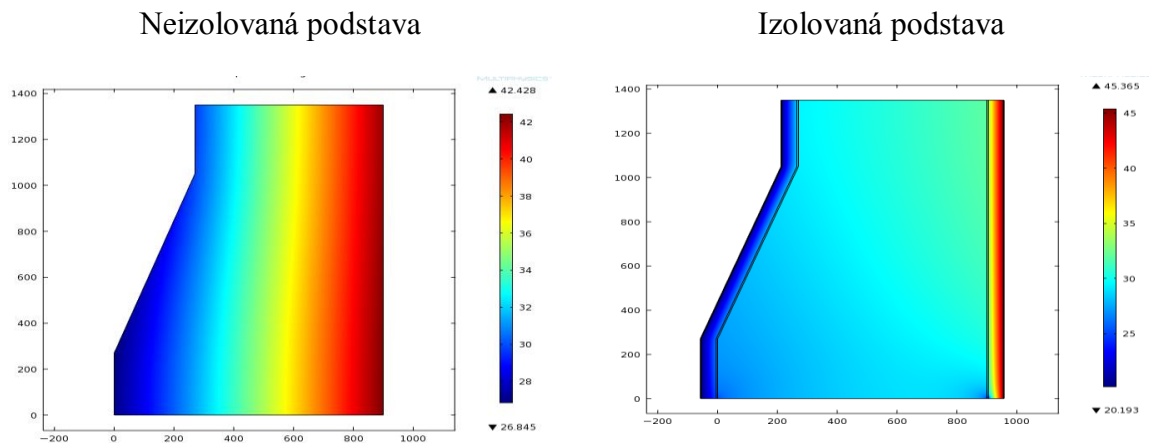
Izolovaná podstava



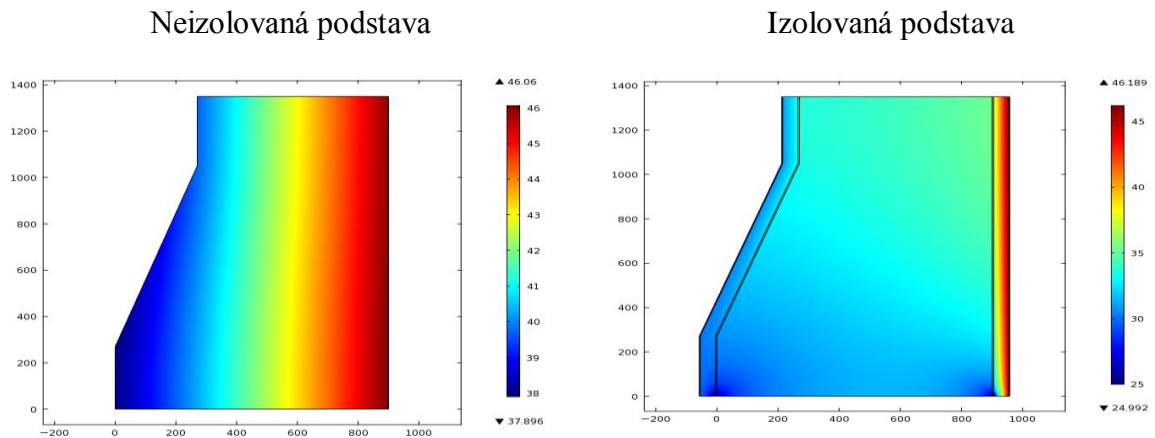
Obr. 50 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 8 dní - letní režim provozu

Rozložení teploty v podstavě obráběcího stroje při stacionárním sdílení tepla

Po dostatečně dlouhé době temperace dojde k tomu, že rozložení teploty v podstavě bude za daných podmínek pouze funkcí polohy. Simulaci jsem provedl za stejných podmínek, jako tomu bylo v předchozích odstavcích při temperaci podstavu. Vypočtené rozložení teploty v podstavě obráběcího zařízení při zimním režimu provozu je zachycen na obr. 51. Rozložení teploty v podstavě obráběcího zařízení při letním provozu je znázorněn na obr. 52. Výsledky simulací ukazují vliv izolace a temperace sloupu podstavu obráběcího stroje. Zatímco v neizolované podstavě se teplota pohybovala cca v rozmezí 26 °C až 42 °C při zimním režimu a v rozmezí 37°C až 46 °C při letním provozu, rozložení teploty v izolované podstavě nebylo příliš variabilní a pohybovalo se v rozmezí cca 27 °C až 32 °C při zimním provozu a v letním provozu byla teplota podstavu v rozmezí cca 30 °C až 36 °C.



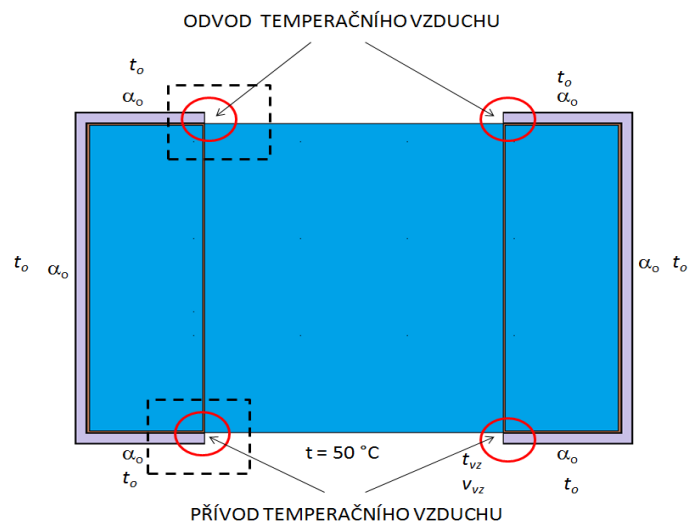
Obr. 51 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavu při stacionárním sdílení tepla – zimní režim



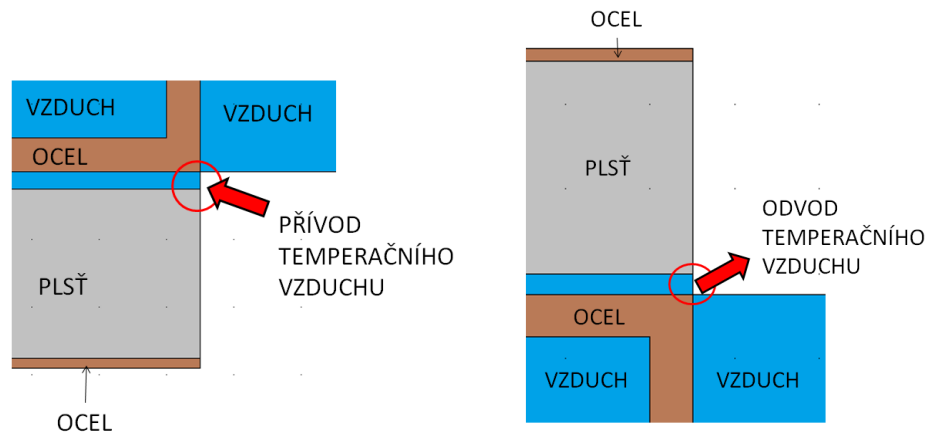
Obr. 52 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při stacionárním sdílení tepla – letní režim

3.2 Simulace rozložení teploty v příčnicku obráběcího stroje

Pro dosažení požadované teploty stěn příčnicku jsem navrhl temperaci tak, že jeho bočnice budou z vnější strany zaizolovány vrstvou plsti, která bude z vnější strany oplechována ocelovou stěnou. Temperační vzduch bude vháněn ze spodní strany příčnicku do štěrbin mezi stěnou izolační vrstvou a bočnicí příčnicku, která jim bude ofukována. Schéma návrhu temperace izolovaného příčnicku v řezu s detailem vstupu a výstupu temperačního vzduchu znázorňují následující obr. 53 a obr. 54.



Obr. 53 Schéma návrhu temperace izolovaného příčnicku



Obr. 54 Detail místa přívodu temperačního vzduchu (vlevo) a odvodu temperačního vzduchu (vpravo)

Simulace v zimním provozním režimu

Výpočet rozložení teploty v příčniku při stacionárním sdílení tepla při zimním provozním režimu jsem provedl za těchto podmínek:

Počáteční teplota příčniku: 15 °C

Teplota okolí při zimním provozu: 18 °C

Teplota uvnitř obráběcího boxu: 50 °C

Součinitel přestupu tepla na vnějších bočních stěnách neizolovaného příčniku:

3,12 W.m⁻².K⁻¹

Součinitel přestupu tepla na vnější horní stěně u neizolovaného příčniku: 1,9 W.m⁻².K⁻¹

Součinitel přestupu tepla na dolní stěně u neizolovaného příčniku: 4,79 W.m⁻².K⁻¹

Součinitel přestupu tepla na vnějších bočních stěnách u izolovaného příčniku:

3,09 W.m⁻².K⁻¹

Součinitel přestupu tepla na vnější horní stěně izolovaného příčniku: 2,56 W.m⁻².K⁻¹

Součinitel přestupu tepla na dolní stěně u izolovaného příčniku: 4,79 W.m⁻².K⁻¹

Tloušťka izolační vrstvy: 5 cm

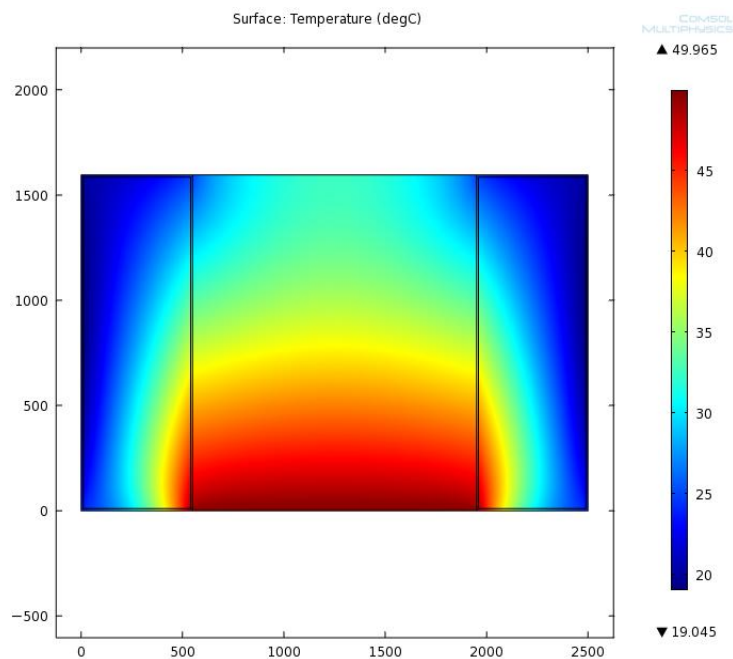
Tloušťka štěrby: 5 mm

Teplota vzduchu proudícího ve štěrbině: 25 °C

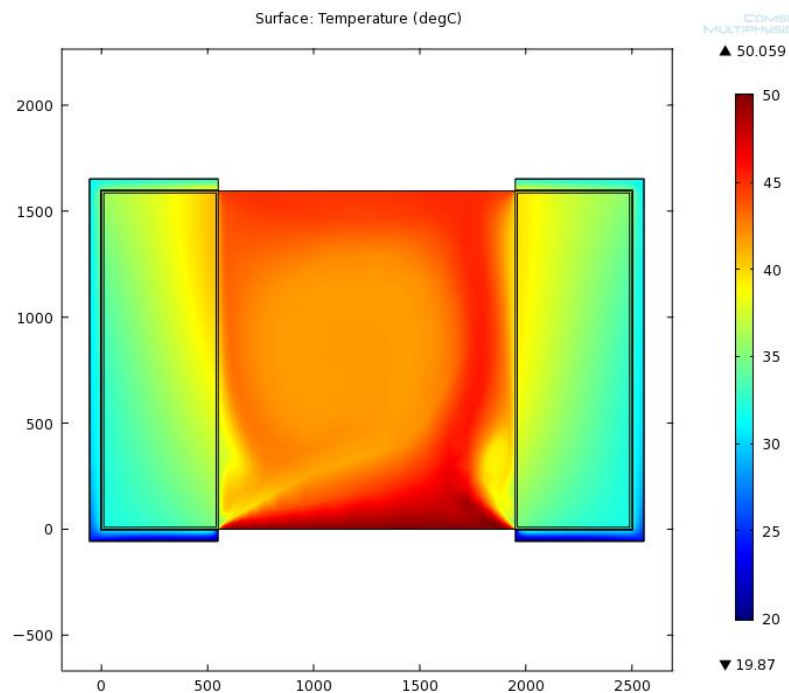
Rychlost proudění vzduchu ve štěrbině: 4,89 m.s⁻¹

Výsledky simulace rozložení teploty v neizolovaném a izolovaném příčniku jsou znázorněny na obr.55 – obr. 56. Při zimním provozu se za uvažovaných podmínek ustálila teplota v horních částech bočnic neizolovaného příčniku na teplotě přibližně 20 °C v dolní části v blízkosti obráběcího prostoru byla teplota vyšší cca mezi 30 – 40 °C v závislosti na vzdálenosti od obráběcího prostoru a vnější stěny bočnice. Teplota uvnitř příčniku se pohybovala v rozmezí cca 49 °C v dolní části až cca 30 °C v horní části vnitřního prostoru (obr. 55).

V izolovaném příčniku se teplota v dolní části bočnic při zimním provozu ustálila na cca 30 °C. V horní části bočnic se teplota pohybovala kolem 37 °C. Teplota uvnitř izolovaného příčniku se při zimním provozu pohybovala přibližně mezi 42 °C až 50 °C (obr. 56).



Obr. 55 Rozložení teploty v neizolovaném příčniku při stacionárním sdílení tepla - zimní provoz



Obr. 56 Rozložení teploty v izolovaném příčnicku při stacionárním sdílení tepla – zimní provoz

Simulace v letním provozním režimu

Výpočet rozložení teploty v příčnicku při stacionárním sdílení tepla při letním provozním režimu jsem provedl za těchto podmínek:

Počáteční teplota příčnicku: 15 °C

Teplota okolí při letním provozu: 30 °C

Teplota uvnitř obráběcího boxu: 50 °C

Součinitel přestupu tepla na vnějších bočních stěnách neizolovaného příčnicku:

$1,48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Součinitel přestupu tepla na vnější horní stěně u neizolovaného příčnicku: $1,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Součinitel přestupu tepla na dolní stěně u neizolovaného příčnicku: $4,79 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Součinitel přestupu tepla na vnějších bočních stěnách u izolovaného příčnicku:

$3,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Součinitel přestupu tepla na vnější horní stěně u izolovaného příčnicku: $2,51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Součinitel přestupu tepla na dolní stěně u izolovaného příčnicku: $4,79 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Tloušťka izolační vrstvy: 5 cm

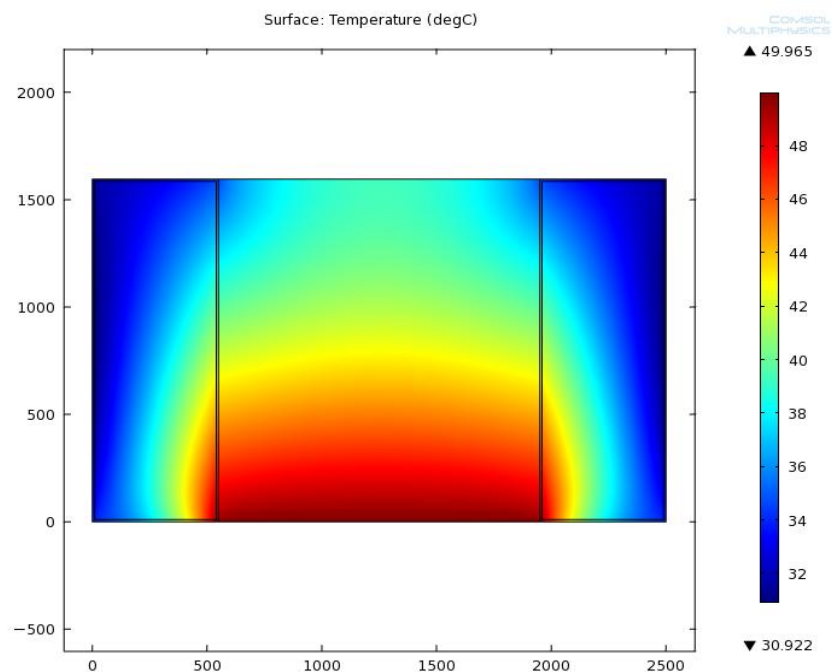
Tloušťka štěrbin: 5 mm

Teplota vzduchu proudícího ve štěrbině: $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Rychlost proudění vzduchu ve štěrbině: $4,89 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

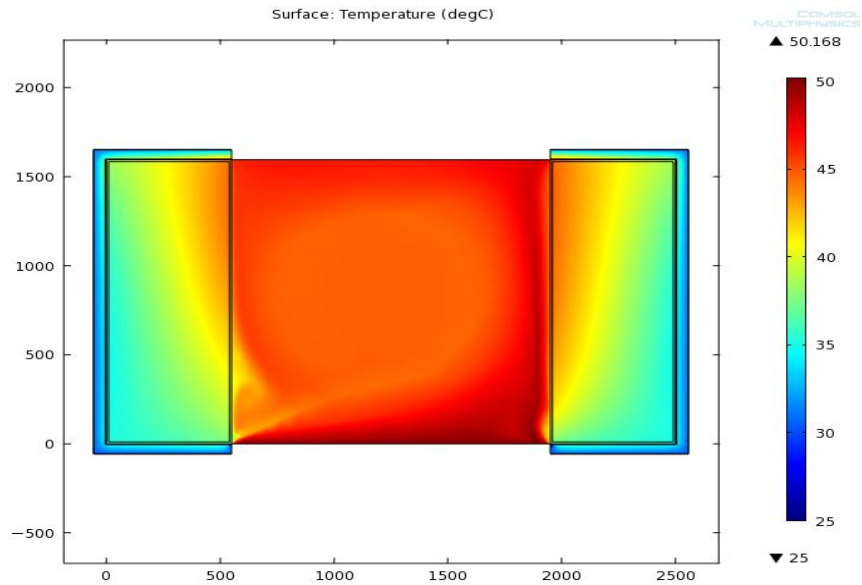
Při letním provozu se za uvažovaných podmínek ustálila teplota v horních částech bočnic neizolovaného příčnicku na teplotě kolem $30 \text{ }^\circ\text{C}$ v dolní části v blízkosti obráběcího prostoru nabývala hodnoty až cca $48 \text{ }^\circ\text{C}$. Oproti tomu v blízkosti vnější stěny byla teplota dolní části bočnice se teplota pohybovala kolem $32 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota uvnitř příčnicku se pohybovala v rozmezí cca $49 \text{ }^\circ\text{C}$ v dolní části až cca $36 \text{ }^\circ\text{C}$ v horní části vnitřního prostoru (obr. 57).

V izolovaném příčnicku se v dolní části bočnic při letním provozu ustálila teplota na cca $35 \text{ }^\circ\text{C}$. V horní části bočnic se teplota pohybovala kolem $42 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota uvnitř izolovaného příčnicku se při letním provozu pohybovala přibližně mezi $45 \text{ }^\circ\text{C}$ až $49 \text{ }^\circ\text{C}$ (obr. 58).



Obr. 57 Rozložení teploty v neizolovaném příčnicku při stacionárním sdílení

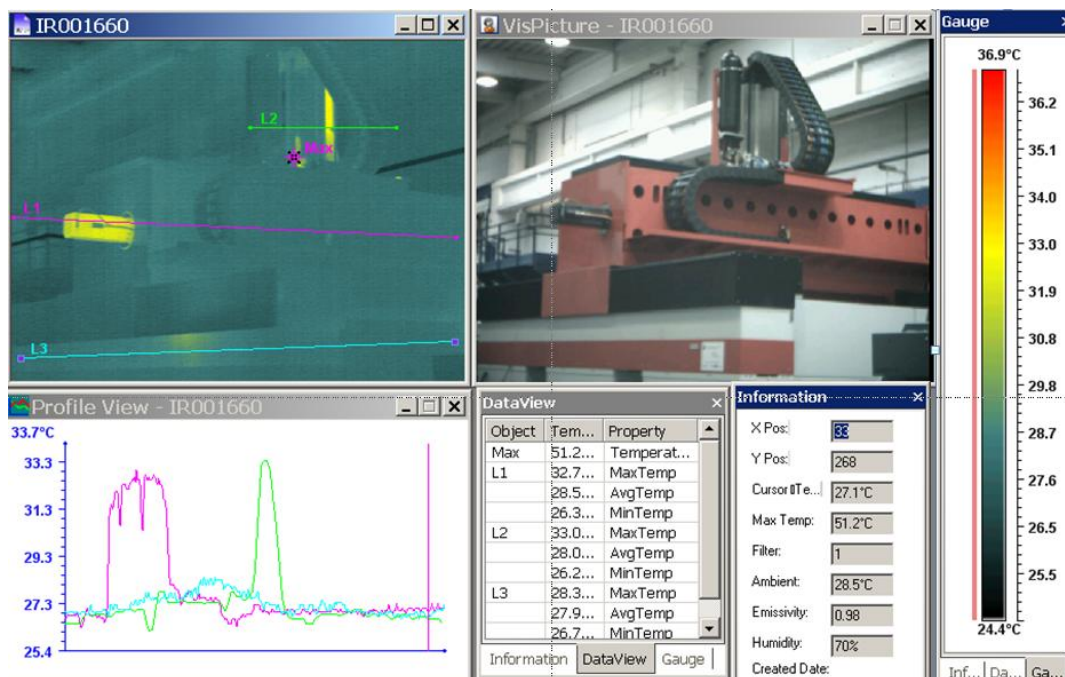
tepla – letní provoz



Obr. 58 Rozložení teploty v izolovaném příčniku při stacionárním sdílení tepla - letní provoz

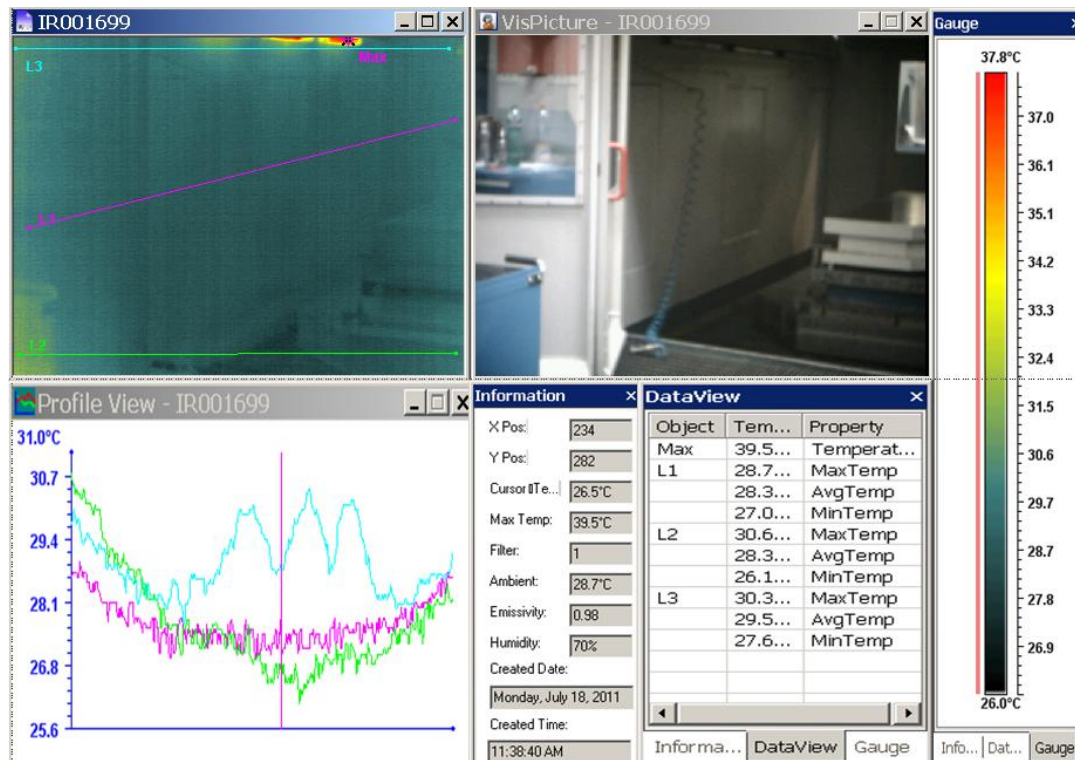
3.3 Termografické měření povrchových teplot stroje infракamerou

Pro ověření správnosti vypočtených součinitelů přestupu tepla bylo důležité naměřit povrchové teploty neizolované stroje. Měření byla provedena termovizní kamerou Flir BHS-X v letním režimu a byla 5 krát opakována.



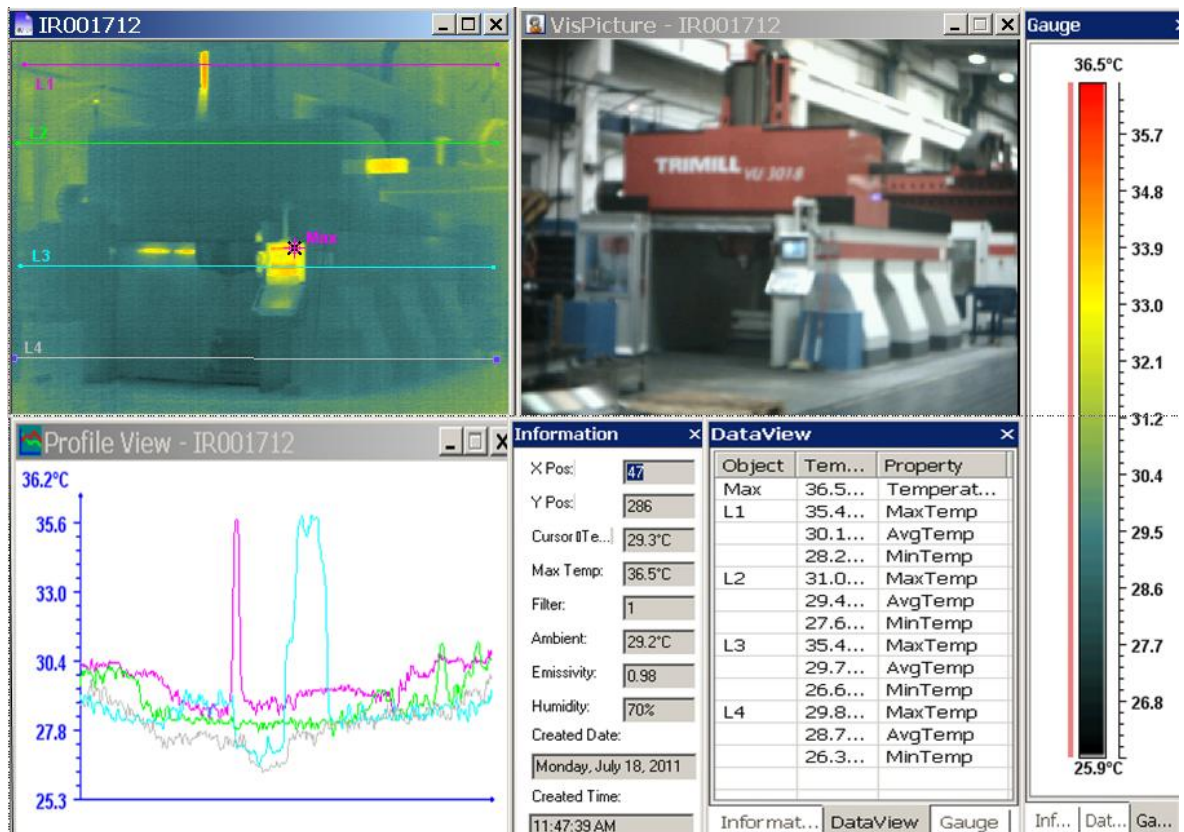
Obr. 59 Měření povrchové teploty příčniku

Z provedeného měření vyplývá, že povrchová teplota příčnicku v letním režimu je přibližně 27 °C.



Obr. 60 Měření povrchové teploty na vnitřní stěně obráběcího prostoru

Z obrázku je patrné, že teplota povrchu je přibližně 28,5 °C. Na vnitřní stěně dochází ke kolísání teploty, způsobené různým typem obrábění pracovními přestávkami. Měření bylo provedeno, když stroj nepracoval a dveře obráběcího prostoru byly otevřeny.



Obr. 61 Měření povrchové teploty na vnější stěně podstavy obráběcího stroje

Z obrázku je patrné, že teplota povrch podstavy obráběcího stroje je za letního režimu přibližně 28°C.

Z provedených měření vyplývá, že uvažované teploty pro výpočet součinitele přestupu tepla jsou správné a tudíž vypočtené tepelné toky přibližně odpovídají skutečnosti.

3.4 Výpočet tepelného toku mezi neizolovanou a izolovanou podstavou frézovacího stroje (karuselu)

Tepelný tok skrz izolaci podstavy do okolního prostředí při

$$\text{zimním režimu (18°C)} \quad \dot{Q}_{izol1} = 55,91 \text{ W}$$

$$\text{letním režimu (30°C)} \quad \dot{Q}_{izol2} = 27,60 \text{ W}$$

uvnitř boxu (50°C) $\dot{Q}_{izol3} = 135,72 \text{ W}$

Tepelný tok z okolí skrz izolaci příčnicku při

zimním režimu (18°C) $\dot{Q}_{izol4} = 152,09 \text{ W}$

letním režimu (30°C) $\dot{Q}_{izol5} = 75,72 \text{ W}$

Celkový tepelný tok izolovaného podstavce a příčného unášče \dot{Q}_{cizol} v zimním režimu

$$\dot{Q}_{cizol} = \dot{Q}_{izol1} + \dot{Q}_{izol3} + \dot{Q}_{izol4} \quad (47)$$

$$\dot{Q}_{cizol} = 55,91 + 135,72 + 152,09 = \underline{343,72 \text{ W}}$$

Celkový tepelný tok izolovaného podstavce a příčného unášče \dot{Q}_{cizol} v letním režimu

$$\dot{Q}_{cizol} = \dot{Q}_{izol2} + \dot{Q}_{izol3} + \dot{Q}_{izol5} \quad (48)$$

$$\dot{Q}_{cizol} = 27,60 + 135,72 + 75,72 = \underline{239,04 \text{ W}}$$

Tepelný tok ze svislých stěn podstavce a do okolního prostředí při

zimním režimu (18°C) $\dot{Q}_{o1} = 338,50 \text{ W}$

letním režimu (30°C) $\dot{Q}_{o2} = 131,67 \text{ W}$

uvnitř boxu (50°C) $\dot{Q}_{o3} = 1150,65 \text{ W}$

Tepelný tok z povrchu litinového unášče do okolního prostředí při

zimním režimu (18°C) $\dot{Q}_{o4} = 766,13 \text{ W}$

letním režimu (30°C) $\dot{Q}_{o5} = 27,60 \text{ W}$

Celkový tepelný tok neizolovaného podstavce a příčného unášče \dot{Q}_c v zimním režimu

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{o1} + \dot{Q}_{o3} + \dot{Q}_{o4} \quad (49)$$

$$\dot{Q}_c = 338,50 + 1150,65 + 766,13 = \underline{2255,28 \text{ W}}$$

Celkový tepelný tok neizolovaného podstavce a příčného unášeče \dot{Q}_c v letním režimu

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{o2} + \dot{Q}_{o3} + \dot{Q}_{o5} \quad (50)$$

$$\dot{Q}_c = 131,67 + 1150,65 + 27,60 = \underline{1309,92 \text{ W}}$$

$$\text{Porovnání tepelných toků v zimním režimu} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{cizol}} \quad (51)$$

$$\text{Porovnání tepelných toků v zimním režimu} = \frac{2255,28}{343,72} = \underline{6,56}$$

$$\text{Porovnání tepelných toků v letním režimu} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{cizol}} \quad (52)$$

$$\text{Porovnání tepelných toků v zimním režimu} = \frac{1309,92}{239,04} = \underline{5,47}$$

Na základě vypočítaných tepelných toků mezi neizolovanou a izolovanou podstavou a příčným unášečem frézovací hlavy je zřejmé, že tepelné ztráty do okolí jsou u neizolovaného podstavce a příčnicku při zimním režimu 6,6 krát vyšší a při letním režimu 5,5 krát vyšší.

3.5 Návrh výkonu klimatizační jednotky pro temperování podstavce a příčného unášeče vzduchem

Výpočet výkonu klimatizační jednotky

$$\dot{Q}_{k \text{ lim}} = \dot{Q}_{cizol} \text{ (v zimním režimu)}$$

$$\dot{Q}_{k\lim} = 1,2 \cdot \dot{Q}_{cizol} \quad (53)$$

$$\dot{Q}_{k\lim} = 1,2 \cdot 343,72 = \underline{412,46 \text{ W}}$$

Výkon klimatizační jednotky pro temperování izolované podstavy a příčného unašeče frézovací hlavy je nejméně 344 W, který navrhuji zvýšit o 20% tj. 413 W.

Výpočet finančních nákladů na temperaci stroje

Náklady na temperaci stroje závisí na tepelném toku, ceně elektrické energie a době temperance.

$$\dot{Q}_{k\lim} = 412,46 \text{ W}$$

$$K_E = 1,80 \text{ Kč/KWh}$$

$$\tau = 720 \text{ hod (uvažovaná doba 1 měsíc)}$$

$$N_e = \dot{Q}_{k\lim} K_E \tau \quad (54)$$

$$N_e = 412,46 \cdot 1,80 \cdot 720 = \underline{536 \text{ Kč}}$$

kde K_E je velkoobchodní cena elektrické energie, τ je uvažovaná doba 1 měsíc, N_e je finanční náklad na elektrickou energii

Finanční propočet nákladů na elektrickou energii za dobu 1 měsíc činí 536 Kč.

4 ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabýval problematikou tepelné bilance a stabilizace rozměrově velkého frézovacího stroje – karuselu. Konkrétně se jednalo o stabilizaci betonové podstavy (monolitu) a litinového příčného unášeče frézovací hlavy. Na základě teoretického studia tepelných procesů a výkresové dokumentace jsem provedl rozbor a teoretický výpočet tepelného toku mezi povrchem stroje a okolním prostředím pro zimní a letní provoz, tak i pro provoz uvnitř obráběcího boxu.

Na základě výpočtu tepelných ztrát nezaizolovanou stěnou podstavy a příčnicku jsem provedl návrh izolace a způsob temperace ofukováním stěn sloupů podstavy a bočnic příčnicku přiváděným vzduchem a provedl jsem srovnání tepelných ztrát s původně vypočítanými hodnotami pro nezaizolované stěny frézovacího stroje.

V prostředí Microsoft Excel jsem poté provedl konkrétní výpočty součinitele přestupu tepla a tepelného toku v neizolované i izolované podstavě a příčnicku (unášeči). Aplikace umožňuje rychlé srovnání tepelných ztrát při změně podmínek jako je teplota vnějšího prostředí, teplota uvnitř obráběcího boxu, teplota či rychlost proudění vzduchu použitého pro ofukování stěn, materiál či tloušťka izolační vrstvy. Rovněž je možno změnit podle potřeby rozměry stěn podstavy a příčnicku, a tudíž lze aplikaci univerzálně použít pro posouzení tepelných ztrát i u jiných obdobných zařízení jako byl v této práci uvažovaný frézovací stroj.

Vypočítané hodnoty součinitelů přestupu tepla jsem následně použil pro simulaci průběhů teplot v modelu podstavě i příčnicku v programovém prostředí Comsol Multiphysics. Provedl jsem srovnání rozložení teploty při temperaci neizolované i izolované podstavy. Poté jsem porovnal rozložení teploty v neizolovaném a izolovaném příčnicku při stacionárním sdílení tepla. Výsledky simulace potvrdily, že při použití vhodného izolačního materiálu v kombinaci s temperací stěn ofukováním vzduchem o vhodně zvolené teplotě a rychlosti proudění lze dosáhnout požadovaného rozložení teploty v příčnicku i ve stěně podstavy.

Na základě vypočtených tepelných toků neizolovaného a izolovaného příčného unášeče a podstavy obráběcího stroje jsem porovnal vypočtené výsledky a zjistil jsem, že po izolování podstavy a unášeče a jejich temperaci, dochází ke snížení tepelných ztrát asi 6,6 krát. Na základě tohoto zjištění jsem provedl návrh klimatizační jednotky, jejíž výkon jsem o 20% navýšil. Na závěr jsem provedl finanční propočet nákladů elektrické energie při uvažované době temperace příčného unášeče a podstavy na dobu 30-ti dnů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Hasal, P., Schreiber, I., Šnita, D.: Chemické inženýrství, VŠCHT Praha, 2007, ISBN 978-80-7080-002-7
- [2] Hejzlar, R.: Sdílení tepla, ČVUT Praha, 1999, ISBN 80-01-01982-9
- [3] Teplotní pole [online]. [cit. 2013- 01-01]. Dostupný z WWW: <<http://web.fel.zcu.cz/kte/predmety/jine/EDS/COUP4.pdf/>>
- [4] Výpočet tepelného odporu | NOBASIL [online]. [cit. 2013- 01-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.nobasil.cz/vypocet-tepelneho-odporu/>>
- [5] Fourierův zákon - AmaPro [online]. [cit. 2013- 01-03]. Dostupný z WWW: <<http://amapro.cz/encyklopedie/skola/fourieruv%20zakon.php/>>
- [6] Tepelný vodič - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 01-11]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelný_vodič/>
- [7] Tepelný izolant - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 01-11]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelný_izolant/>
- [8] Šubrt, R.: Tepelné izolace v otázkách a odpovědích, BEN - technická literatura, 2008, ISBN 978-80-7300-2
- [9] Holiday, D., Resnick, R., Walker, J.: Mechanika – Termodynamika, VUTIUM Brno, 2000, ISBN 978-0-471-3
- [10] Kapitola 11 - sdílení tepla - VŠCHT [online]. [cit. 2013- 01-10]. Dostupný z WWW: <<http://vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.ulohy.k11.sdileni.tepla./>>
- [11] Klečková, M.: Nestacionární teplotní pole a napjatost ve strojních částech, SNTL Praha, 1979
- [12] Konvekce - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 01-11]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Konvekce/>>
- [13] Ježek, J., Váradiová, B., Adamec, J.: Mechanika tekutin, ČVUT Praha, 2000, ISBN 80-01-01615-3
- [14] Tesař, V.: Mezní vrstvy a turbulence, ČVUT Praha, 1984 ISBN 80-01-0675-1
- [15] Sdílení tepla prouděním [online]. [cit. 2013-01-16]. Dostupný z WWW: <<http://vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k16.sdileni.tepla.pdf/>>
- [16] Laminární proudění - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 01-16]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laminární_proudění/>

- [17] Turbulentní proudění – WikiSkripta [online]. [2013] [cit. 2013- 01-15]. Dostupný z WWW: <http://wikiskripta.eu/index.php/Turbulentní_proudění/>javascript:void(0)
- [18] Proudění - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 01-15]. Dostupný z WWW:<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Proudění/>>
- [19] Súpup,T.: Využití změny skupenství při akumulaci tepla v solárních vzduchových systémech (diplomová práce), FSI, VUT Brno, 2012, vedoucí Ing. Pavel Charvát, Ph.D.
- [20] Var - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 01-15]. Dostupný z WWW:<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Var/>>
- [21] Určování součinitele přestupu tepla při samovolné [online]. [2013] [cit. 2013-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.powerwiki.cz/attach/ET1/konvekce2.doc/>>
- [22] Janáčková, D.: Kurz Proesního inženýrství II, Výuka UTB Zlín, FT [online].[cit. 2013- 01-20]. Dostupný z WWW: <<http://vyuka.fai.utb.cz/course/view.php?id=84>>
- [23] 1-4 Sálání tepla – radiace [online]. [cit. 2013- 01-20]. Dostupný z WWW: <http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni.../1-4_Salani_tepla.pdf/>
- [24] Energie záření - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 01-20]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Energie_záření/>
- [25] Záření dokonale černého tělesa [cit. 2013- 01-20]. Dostupný z WWW:<[http:// artemis.osu.cz/mmfiz/qm/qm_1_1.htm/](http://artemis.osu.cz/mmfiz/qm/qm_1_1.htm/)>
- [26] Jahoda, M.:Sdílení tepla, VŠCHT Praha, 2003
- [27] Kolomazník, K.: Teorie technologických procesů III, VUT Brno, FT Zlín, 1978
- [28] Dvořák, Z. : Sdílení tepla a výměníky, ČVUT Praha, FS, 1992
- [29] Kolat, P.: Přenos tepla a hmoty, VŠB-TU Ostrava, FS, 2001. ISBN 80-24-8000-39
- [30] Dvořák, Z. : Procesní inženýrství III, UTB Zlín, FT, 2008
- [31] Tepelný výměník - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 01-20]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelný_výměník/>
- [32] Výměníky.cz [online]. [cit. 2013- 01-20]. Dostupný z WWW: <<http://vymeniky.cz/>>
- [33] Vrána, J.: Technická zařízení budov v praxi; GRADA 2007; ISBN 978-80-247-15889
- [34] Chyský, J., Hemzal, K.: Větrání a klimatizace, Bolit - B press 1993; ISBN 80-901574-0-8

- [35] Klimatizace - Wikipedie [online]. [cit. 2013- 02-01]. Dostupný z WWW:<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Klimatizace/>>javascript:void(0)
- [36] COMSOL Multiphysics - modelování multifyzikálních dějů [online]. [cit. 2013- 02-010]. Dostupný z WWW: <[http:// humusoft.cz/](http://humusoft.cz/)> javascript:void(0)
- [37] Potůček, J.:Modelování a simulace[online], ČVUT, FE, Dostupný z WWW: http://cw.felk.cvut.cz/lib/exe/fetch.php/courses/a6m33mos/mos_p1_../
- [38] Míka, V. a kol.:Chemickoinženýrské propočty I, VŠCHT Praha, III. vydání, 1996

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Název	Jednotky
A	Teplosměnná plocha	m^2
a	Součinitel teplotní vodivosti	$m\ s^{-1}$
$A_{celkové}$	Celková plocha	m^2
c	Nusseltova konstanta	1
c_p	Měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	$J\ kg^{-1}K^{-1}$
d	Průměr válce	m
g	Gravitační zrychlení	ms^{-2}
Gr	Grashofovo kritérium	1
k	Součinitel prostupu tepla	1
K_E	Velkoobchodní cena el. energie	$Kč\ k^{-1}Wh^{-1}$
l	Charakteristický rozměr	m
l_{ξ}	Délka mezery	m
n	Nusseltova konstanta	1
N_e	Finanční náklady na el. energii	$Kč$
Nu	Nusseltovo kritérium	1
Pe	Pecletovo kritérium	1
Pr	Prandtlovo kritérium	1
Q	Tepelný tok	W
Q	Množství tepla	J
q_p	Hustota tepelného toku na povrchu tělesa	$kg\ m^{-3}$
r	Poloměr válce	m
Re	Reynolsovo kritérium	1
s	Tloušťka stěny	m
ξ	Šířka mezery	m
t	Teplota užité plochy	$^{\circ}C$
t_{in}	Naměřená teplota	$^{\circ}C$
t_{izol}	Teplota iolace	$^{\circ}C$
t_o	Teplota okolí	$^{\circ}C$
$t_{oc\ plechu}$	Teplota ocelového plechu	$^{\circ}C$
t_p	Počáteční teplota tělesa	$^{\circ}C$

t_w	Temperační teplota	°C
α	Součinitel teplotní vodivosti	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
β	Koeficient objemové roztažnosti	K^{-1}
Δt	Rozdíl teplot	°C
η	Dynamická viskozita	Pas
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
τ	Doba	s
ν	Kinematická viskozita	m^2s^{-1}

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Znázornění teplotního pole a izotermy [1]	14
<i>Obr. 2</i> Znázornění vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou [1]	16
<i>Obr. 3</i> Vedení tepla složenou rovinnou stěnou [1]	16
<i>Obr. 4</i> Vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou [1]	17
<i>Obr. 5</i> Vedení tepla složenou válcovou stěnou [1]	18
<i>Obr. 6</i> Vybrané hodnoty součinitelů tepelné vodivosti [24]	18
<i>Obr. 7</i> Průběh teplotního pole ve stěně při ohřevu [22]	19
<i>Obr. 8</i> Průběh teplotního pole ve stěně při chlazení [22]	19
<i>Obr. 9</i> Schéma rozdělení sdílení tepla [12]	23
<i>Obr. 10</i> Nákres deskového výměníku tepla [33]	27
<i>Obr. 11</i> Schéma deskového výměníku tepla [34]	27
<i>Obr. 12</i> Schéma klimatizační jednotky [34]	28
<i>Obr. 13</i> Souprůdý výměník tepla [34]	29
<i>Obr. 14</i> Protiprůdý výměník tepla [34]	29
<i>Obr. 15</i> Schématický nákres podstavy obráběcího stroje	34
<i>Obr. 16</i> Nákres podstavy obráběcího stroje pro výpočet volné konvekce z vnější strany	40
<i>Obr. 17</i> Tabulka výpočtu tepelného toku neizolované podstavy pro volnou konvekci	42
<i>Obr. 18</i> Tabulka výpočtu tepelného toku neizolované podstavy pro volnou konvekci	44
<i>Obr. 19</i> Volba 2D či 3D zobrazení modelu v prostředí Comsol Multiphysics	45
<i>Obr. 20</i> Volba požadovaného modulu a jeho specifikace v prostředí Comsol Multiphysics	46
<i>Obr. 21</i> Volba stacionárního či nestacionárního děje v prostředí Comsol Multiphysics	46
<i>Obr. 22</i> Nadefinování potřebných parametrů v prostředí Comsol Multiphysics	47
<i>Obr. 23</i> Vytvoření grafiky modelu v prostředí Comsol Multiphysics	47
<i>Obr. 24</i> Otevření knihovny materiálů v prostředí Comsol Multiphysics	48
<i>Obr. 25</i> Nadefinování materiálu do tělesa modelu v prostředí Comsol Multiphysics	48
<i>Obr. 26</i> Nadefinování počátečních a okrajových podmínek modelu v prostředí Comsol Multiphysics	49
<i>Obr. 27</i> Nadefinování geometrického tvaru a velikosti mřížky pro numerický	49

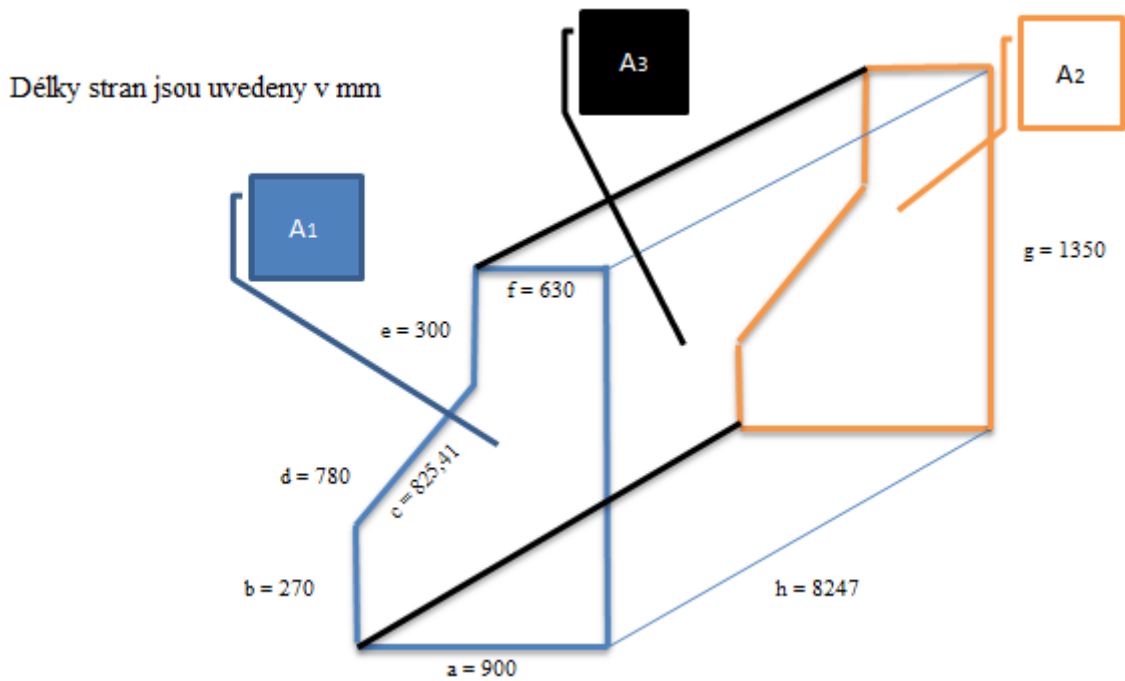
<i>Obr. 28</i>	<i>Nadefinování délky trvání procesu a časového kroku v prostředí Comsol</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 29</i>	<i>Spuštění numerického výpočtu v prostředí Comsol Multiphysics</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 30</i>	<i>Okno s vypočteným rozložením teploty neizolované podstavě obráběcího stroje při zimním provozu v prostředí Comsol Multiphysics</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 31</i>	<i>Schéma návrhu temperace izolovaného sloupu podstavy obráběcího</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 32</i>	<i>Detail místa přívodu temperačního vzduchu (vlevo) a odvodu</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 33</i>	<i>Průběh teplot při temperaci ve zúžené (horní) části neizolované podstavy po dobu 30 dní - zimní režim provozu.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 34</i>	<i>Průběh teplot při temperaci rozšířené (dolní) části neizolované podstavy po dobu 30 dní - zimní režim provozu.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 35</i>	<i>Průběh teplot při temperaci zúžené (horní) části izolované podstavy po dobu 30 dní - zimní režim provozu</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 36</i>	<i>Průběh teplot při temperaci v rozšířené (dolní) části izolované podstavy po dobu 30 dní - zimní režim provozu.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 37</i>	<i>Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 1 hodina - zimní režim provozu.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38</i>	<i>Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 39</i>	<i>Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 3 dny - zimní režim provozu.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 40</i>	<i>Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 5 dní - zimní režim provozu</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 41</i>	<i>Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 8 dní - zimní režim provozu</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 42</i>	<i>Průběh teplot při temperaci rozšířené (dolní) části neizolované podstavy po dobu 30 dní - letní režim provozu</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 43</i>	<i>Průběh teplot při temperaci ve zúžené (horní) části neizolované podstavy po dobu 30 dní - letní režim provozu</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 44</i>	<i>Průběh teplot při temperaci v rozšířené (dolní) části izolované podstavy po dobu 30 dní - letní režim provozu</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 45</i>	<i>Průběh teplot při temperaci ve zúžené (horní) části izolované podstavy po dobu 30 dní - letní režim provozu</i>	<i>61</i>

<i>Obr. 46 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 1 hodina - letní režim provozu</i>	61
<i>Obr. 47 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 1 den - letní režim provozu.....</i>	62
<i>Obr. 48 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 3 dny - letní režim provozu</i>	62
<i>Obr. 49 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 5 dní - letní režim provozu</i>	63
<i>Obr. 50 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při v čase temperace 8 dní - letní režim provozu</i>	63
<i>Obr. 51 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při</i>	64
<i>Obr. 52 Rozložení teploty v řezu neizolované a izolované podstavy při stacionárním sdílení tepla – letní režim</i>	65
<i>Obr. 53 Schéma návrhu temperace izolovaného příčnicku.....</i>	65
<i>Obr. 54 Detail místa přívodu temperačního vzduchu (vlevo) a odvodu</i>	66
<i>Obr. 55 Rozložení teploty v neizolovaném příčnicku při stacionárním sdílení tepla - zimní provoz</i>	67
<i>Obr. 56 Rozložení teploty v izolovaném příčnicku při stacionárním sdílení</i>	68
<i>Obr. 57 Rozložení teploty v neizolovaném příčnicku při stacionárním sdílení.....</i>	69
<i>Obr. 58 Rozložení teploty v izolovaném příčnicku při stacionárním sdílení</i>	70
<i>Obr. 59 Měření povrchové teploty příčnicku</i>	70
<i>Obr. 60 Měření povrchové teploty na vnitřní stěně obráběcího prostoru.....</i>	71
<i>Obr. 61 Měření povrchové teploty na vnější stěně podstavy obráběcího stroje.....</i>	72

SEZNAM PŘÍLOH

<i>P I Nákres podstavy neizolovaného obráběcího stroje pro výpočet volné konvekce z vnější strany.....</i>	86
<i>P II Tabulka výpočtu tepelného toku neizolované podstavy pro volnou konvekci.....</i>	86
<i>P III Nákres podstavy obráběcího stroje ze strany obráběcího prostoru.....</i>	88
<i>P IV Tabulka výpočtu tepelného toku neizolované podstavy pro volnou konvekci.....</i>	88
<i>P V Nákres podstavy obráběcího stroje s naznačenou dolní tryskou na temperování prostoru mezi podstavou a izolací.....</i>	90
<i>P VI Tabulka výpočtu tepelného toku izolované podstavy pro nucenou konvekci.....</i>	90
<i>P VII Tabulka výpočtu tepelného toku izolované podstavy pro nucenou konvekci</i>	93
<i>P VIII Nákres podstavy neizolovaného obráběcího stroje pro výpočet volné konvekce ze strany obráběcího prostoru</i>	95
<i>P IX Tabulka výpočtu tepelného toku izolované podstavy pro nucenou konvekci.....</i>	96
<i>P X Nákres neizolovaného příčnicku obráběcího stroje z vnější strany</i>	98
<i>P XI Tabulka výpočtu tepelného toku neizolovaného příčnicku pro volnou konvekci.....</i>	98
<i>P XII Tabulka výpočtu tepelného toku neizolovaného příčnicku pro volnou konvekci</i>	100
<i>P XIII Nákres neizolovaného příčnicku obráběcího stroje ze strany prostoru</i>	102
<i>P XIV Tabulka výpočtu tepelného toku neizolovaného příčnicku pro volnou konvekci</i>	102
<i>P XV Nákres příčnicku obráběcího stroje</i>	104
<i>P XVI Tabulka výpočtu tepelného toku izolovaného příčnicku pro nucenou konvekci</i>	104
<i>P XVII Tabulka výpočtu tepelného toku izolovaného příčnicku pro nucenou konvekci</i>	107

P I Nákres podstavy neizolovaného obráběcího stroje pro výpočet volné konvekce z vnější strany



P II Tabulka výpočtu tepelného toku neizolované podstavy pro volnou konvekci při letním režimu

Postup výpočtu přestupu tepla pro volnou konvekci (letní provoz - teplota okolí 30 °C)

Materiál podstavy - beton

Poznámka
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty

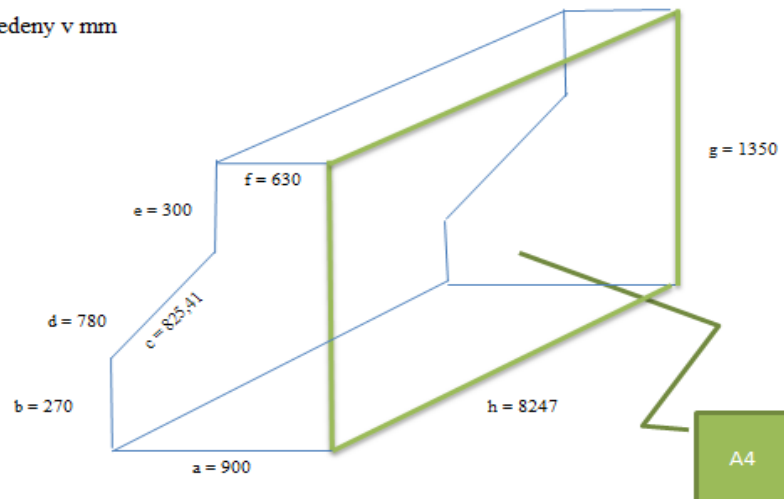
Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	a	0,9000	m	Zadané dle výkresu

Strana	b	0,2700	m	Zadané dle výkresu
Strana	c	0,8254	m	Zadané dle výkresu
Strana	d	0,7800	m	Zadané dle výkresu
Strana	e	0,3000	m	Zadané dle výkresu
Strana	f	0,6300	m	Zadané dle výkresu
Strana	g	1,3500	m	Zadané dle výkresu
Strana	h	8,2470	m	Zadané dle výkresu
Charakteristický rozměr	l	1,3954	m	Kratší strana
Plocha	A_1	1,0287	m ²	Dle obrázku
Plocha	A_2	1,0287	m ²	Dle obrázku
Plocha	A_3	11,5079	m ²	Dle obrázku
Celková plocha	$A_{vnější}$	13,5653	m ²	Teplosměnná plocha obvodu ($A_1+A_2+A_3$)
Teplota povrchu	t_w	26	°C	Požadovaná teplota povrchu a uvnitř podstavy
Teplota okolí	t_{in}	30	°C	Naměřená teplota okolí
Přepoččet teploty ve °C na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	Δt	4,00	°C	$\Delta t = (t_w - t_{in})$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Rozdíl teplot	ΔT	4,00	K	$\Delta T = (T_w - T_{in})$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Střední teplota	t_s	28	°C	$t_s = (t_w + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	m s ⁻²	Konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,66E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	kJ kg ⁻¹ *K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,58E-02	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,32E-03	K ⁻¹	$\beta = 1/(t_s + 273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	1,28E+09	-	$Gr = g l^3 \beta \Delta t \nu^{-2}$
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$Gr Pr$	9,38E+08	-	$Gr Pr$
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,31E+02	-	$Nu = c (Gr Pr)^n$
Součinitel přestupu tepla do svislých stěn podstavy	α_0	2,43E+00	W m ⁻² K ⁻¹	$\alpha_0 = (Nu \lambda)/l$
Tepelný tok	Q_0	1,32E+02	W	Celkový tepelný tok z okolního prostředí do svislých stěn podstavy $Q_0 = \alpha_0 A_0 (t_w - t_{in})$

$Gr Pr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

P III Nákres podstavy obráběcího stroje ze strany obráběcího prostoru

Délky stran jsou uvedeny v mm



P IV Tabulka výpočtu tepelného toku neizolované podstavy pro volnou konvekci ze strany obráběcího prostoru

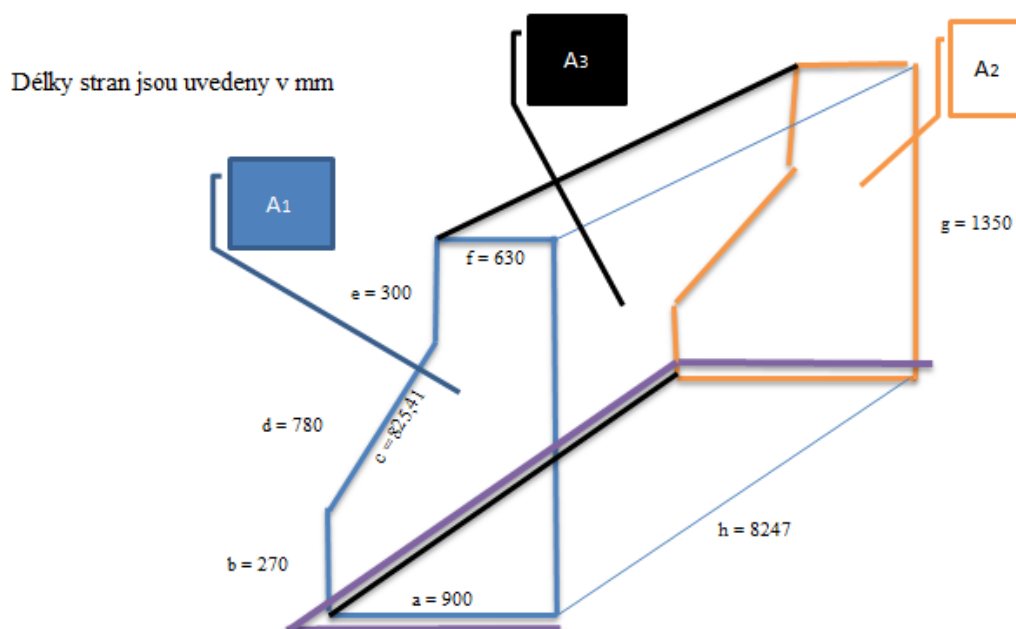
Přestup tepla - volná konvekce (zimní - letní provoz - teplota uvnitř obráběcího stroje 50 °C)
Materiál podstavy - beton

Poznámka
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	<i>a</i>	0,9000	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>b</i>	0,2700	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>c</i>	0,8254	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>d</i>	0,7800	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>e</i>	0,3000	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>f</i>	0,6300	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>g</i>	1,3500	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>h</i>	8,2470	m	Zadané dle výkresu
Charakteristický rozměr	<i>l</i>	1,3500	m	Kratší strana
Plocha	<i>A_s</i>	11,1335	m ²	Dle obrázku
Celková plocha	<i>A_{vnější}</i>	11,1335	m ²	Teplosměnná plocha obvodu (<i>A_s</i>)
Teplota povrchu	<i>t_w</i>	26	°C	Požadovaná teplota povrchu a uvnitř podstavy
Teplota okolí	<i>t_{in}</i>	50	°C	Naměřená teplota uvnitř stroje
Přepočet teploty ve °C na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	Δt	24,00	°C	$\Delta t = (t_w - t_{in})$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Rozdíl teplot	ΔT	24,00	K	$\Delta T = (T_w - T_i)$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Střední teplota	<i>t_s</i>	38	°C	$t_s = (t_w + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	<i>g</i>	9,81E+00	m s ⁻²	Konstanta
Kinematická viskozita	<i>ν</i>	1,76E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	<i>c_p</i>	1,01E+00	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	<i>Pr</i>	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,65E-02	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,21E-03	K ⁻¹	$\beta = 1/(t_s + 273,15)$
Grashofovo kritérium	<i>Gr</i>	6,01E+09	-	$Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	<i>Gr Pr</i>	4,39E+09	-	<i>Gr Pr</i>
Konstanta Nusseltova kritéria	<i>c</i>	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	<i>n</i>	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	<i>Nu</i>	2,19E+02	-	$Nu = c (Gr Pr)^n$
Součinitel přestupu tepla	<i>α_o</i>	4,31E+00	W m ⁻² K ⁻¹	$\alpha_o = (Nu \lambda) / l$
Tepelný tok	<i>Q_o</i>	1,15E+03	W	Tepelný tok z obráběcího prostoru do stěny podstavy $Q_o = \alpha_o A_o (t_{in} - t_w)$

$Gr Pr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

P V Nákres podstavy obráběcího stroje s naznačenou dolní tryskou na temperování prostoru mezi podstavou a izolací



P VI Tabulka výpočtu tepelného toku izolované podstavy pro nucenou konvekci

při zimním režimu

Přestup a prostup tepla - nucená konvekce (zimní provoz - teplota okolí 18 °C)

Materiál podstavy - beton

Materiál navržené izolace - ocelový plech a plst'

Poznámka :

Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty
Platí pro nucenou konvekci

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	a	0,9000	m	Zadané dle výkresu
Strana	b	0,2700	m	Zadané dle výkresu
Strana	c	0,8254	m	Zadané dle výkresu
Strana	d	0,7800	m	Zadané dle výkresu
Strana	e	0,3000	m	Zadané dle výkresu
Strana	f	0,6300	m	Zadané dle výkresu
Strana	g	1,3500	m	Zadané dle výkresu
Strana	h	8,2470	m	Zadané dle výkresu
Šířka štěrbin	δ	0,0050	m	
Délka štěrbin	l_s	10,0470	m	
Tloušťka Oc plechu	$\delta_{Oc\ plechu}$	0,0030	m	
Tloušťka izolace	$\delta_{izolace}$	0,0500	m	
Charakteristický rozměr	l	1,3954	m	Kratší strana
Plocha	A_1	1,0287	m ²	Dle obrázku
Plocha	A_2	1,0287	m ²	Dle obrázku
Plocha	A_3	11,5079	m ²	Dle obrázku
Celková plocha	$A_{vnější}$	13,5653	m ²	Teplosměnná plocha obvodu ($A_1+A_2+A_3$)
Teplota povrchu	t_w	26	°C	Požadovaná teplota povrchu a uvnitř podstavy
Teplota Ocelového plechu	$t_{Oc\ plechu}$	20	°C	
Teplota okolí	t_{in}	18	°C	Naměřená teplota okolí
Přepočtení teploty ve °C na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	Δt	2,00	K	$\Delta t = (t_{oc} - t_{in})$ - rozdíl teplot povrchu ocelového plechu a okolního prostředí
Rozdíl teplot	ΔT	2,00	°C	$\Delta T = (T_{oc} - T_{in})$ - rozdíl teplot povrchu ocelového plechu a okolního prostředí
Rozdíl teplot	$\Delta t_{izolace}$	8,00	°C	$\Delta t = (t_w - t_{in})$ - rozdíl teplot vzduchu ve štěrbině a okolního prostředí
Rozdíl teplot	$\Delta T_{izolace}$	8,00	K	$\Delta T = (T_w - T_{in})$ - rozdíl teplot vzduchu ve štěrbině a okolního prostředí
Střední teplota	t_s	26,00	°C	$t_s = t_w$
Střední teplota	t_s	19,00	°C	$t_s = (t_{oc} + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	m s ⁻²	Tabulková hodnota
Kinematická viskozita	ν	1,62E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Kinematická viskozita	ν	1,57E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota

Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,55E-02	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,52E-02	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Hustota	ρ	1,15E+00	kg m ⁻³	
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Oc\ plech}$	4,70E+01	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota (Ocel měkká tl. 3 mm)
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Izolace}$	3,60E-02	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota (Plst' tl. 50 mm)
Reynoldsovo kritérium	Re	3,00E+03	-	Zvolená hodnota
Ekvivalentní průměr	d_{ek}	1,00E-02		$d_{ek}=4 (\delta l)/(2 (\delta+l))$
Rychlost proudění	v	4,85E+00	m s ⁻¹	$v=Re v/d_{ek}$
Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,42E-03	K ⁻¹	$\beta=1/(ts+273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	7,40E+08	-	$Gr=g l^3 \beta \Delta t/v^2$
Součin Grashofova a Prandtlůva kritéria	$Gr Pr$	5,40E+08	-	$Gr Pr$
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,09E+02	-	$Nu=c (Gr Pr)^n$
Pecletovo kritérium	Pe	2,20E+03	-	$Pe=v d_{ek}/a$
Teplotní vodivost	a	2,20E-05	m ² s ⁻¹	$a=\lambda/(\rho c_p)$
Nusseltovo kritérium	Nu	8,67E+00	-	$Nu=0,116 (Re^{2/3}-125) Pr^{1/3} (1+(d_{ek}/l)^{2/3}) (h/h_w)^{0,14}$
Součinitel přestupu tepla	a_{nuc}	2,21E+01	W m ⁻² K ⁻¹	$a_0=(Nu \lambda)/d_{ek}$
Součinitel přestupu tepla	a_0	1,97E+00	W m ⁻² K ⁻¹	$a_0=(Nu \lambda)/l$
Tepelný tok	Q_0	5,35E+01	W	Tepelný tok mezi povrchem ocelového plechu a okolním prostředím $Q_0=a_0 A_0(t_{oc}-t_{in})$
Součinitel prostupu tepla	k	5,15E-01	W m ⁻² K ⁻¹	$k=1/(1/a_{nuc}+1/a_0+\delta_{Oc\ plechu}/\lambda_{Oc\ plechu}+\delta_{Izolace}/\lambda_{Izolace})$
Tepelný tok	Q_{nuc}	5,59E+01	W	Tepelný tok skrz izolaci podstavu do okolního prostředí $Q_{nuc}=k A_{yn\epsilon}(t_w-t_{in}^n)$

$Gr Pr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

°C /normální tlak	η (Pa s)
18	1,2090E-06
20	1,2010E-06
24	1,1850E-06
26	1,1770E-06

P VII Tabulka výpočtu tepelného toku izolované podstavy pro nucenou konvekci

při letním režimu

Přestup a prostup tepla - nucená konvekce (letní provoz - teplota okolí 30 °C)

Materiál podstavy - beton

Materiál navržené izolace - ocelový plech a plst'

Poznámka :

Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty
Platí pro nucenou konvekci

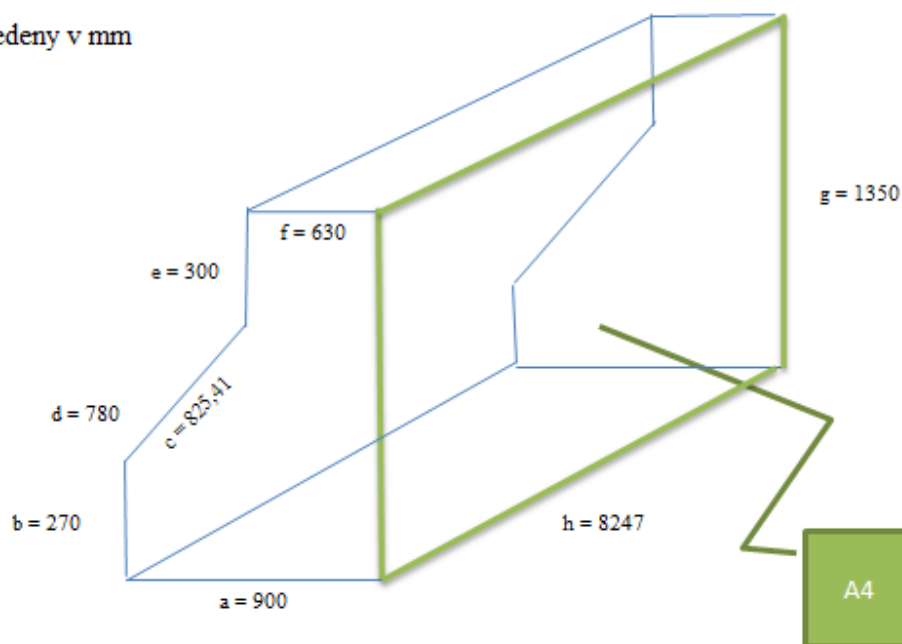
Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	<i>a</i>	0,9000	<i>m</i>	Zadané dle výkresu
Strana	<i>b</i>	0,2700	<i>m</i>	Zadané dle výkresu
Strana	<i>c</i>	0,8254	<i>m</i>	Zadané dle výkresu
Strana	<i>d</i>	0,7800	<i>m</i>	Zadané dle výkresu
Strana	<i>e</i>	0,3000	<i>m</i>	Zadané dle výkresu
Strana	<i>f</i>	0,6300	<i>m</i>	Zadané dle výkresu
Strana	<i>g</i>	1,3500	<i>m</i>	Zadané dle výkresu
Strana	<i>h</i>	8,2470	<i>m</i>	Zadané dle výkresu
Šířka šterbiny	<i>š</i>	0,0050	<i>m</i>	
Délka šterbiny	<i>l_š</i>	10,0470	<i>m</i>	
Tloušťka Oc plechu	<i>δ_{Oc plehu}</i>	0,0030	<i>m</i>	
Tloušťka izolace	<i>δ_{Izolace}</i>	0,0500	<i>m</i>	
Charakteristický rozměr	<i>l</i>	1,3954	<i>m</i>	Kratší strana
Plocha	<i>A₁</i>	1,0287	<i>m²</i>	Dle obrázku
Plocha	<i>A₂</i>	1,0287	<i>m²</i>	Dle obrázku
Plocha	<i>A₃</i>	11,5079	<i>m²</i>	Dle obrázku
Celková plocha	<i>A_{vnoři}</i>	13,5653	<i>m²</i>	Teplosměnná plocha obvodu (<i>A₁+A₂+A₃</i>)
Teplota povrchu	<i>t_w</i>	26	°C	Požadovaná teplota povrchu a uvnitř podstavy
Teplota Oc plechu	<i>t_{Oc plehu}</i>	28	°C	
Teplota okolí	<i>t_{in}</i>	30	°C	Naměřená teplota okolí
Přepočet teploty ve °C na K	<i>T = t + 273,15</i>	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	<i>Δt</i>	2,00	K	<i>Δt = (t_{in} - t_{oc})</i> - rozdíl teplot okolního prostředí povrchu ocelového plechu

Rozdíl teplot	ΔT	2,00	°C	$\Delta T = (T_{in} - T_{oc})$ - rozdíl teplot okolního prostředí povrchu ocelového plechu
Rozdíl teplot	$\Delta T_{izolace}$	4,00	°C	$\Delta T = (T_{in} - T_w)$ - rozdíl teplot vzduchu v okolním prostředí a ve štěrbině
Rozdíl teplot	$\Delta T_{izolace}$	4,00	K	$\Delta t = (t_m - t_w)$ - rozdíl teplot vzduchu v okolním prostředí a ve štěrbině
Střední teplota	t_s	26,00	°C	$t_s = t_w$
Střední teplota	t_s	29,00	°C	$t_s = (t_{oc} + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	m s ⁻²	Konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,66E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Kinematická viskozita	ν	1,66E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,58E-02		Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,52E-02	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Hustota	ρ	1,15E+00	kg m ⁻³	
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{oc\ plech}$	4,70E+01	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota (Ocel měkká tl. 3 mm)
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{izolace}$	3,60E-02	W m ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota (PLSŤ tl. 50 mm)
Reynoldsovo kritérium	Re	3,00E+03	-	Zvolená hodnota
Ekvivalentní průměr	d_{ek}	1,00E-02		$d_{ek} = 4 (\xi l) / (2 (\xi + l))$
Rychlost proudění	v	4,98E+00	m s ⁻¹	$v = Re \nu / d_{ek}$
Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,31E-03	K ⁻¹	$\beta = 1 / (t_s + 273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	6,40E+08	-	$Gr = W m^{-1} K^{-1} g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$Gr * Pr$	4,67E+08	-	$Gr Pr$
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,04E+02	-	$Nu = c (Gr Pr)^n$
Pecletovo kritérium	Pe	2,23E+03	-	$Pe = v d_{ek} / a$
Teplotní vodivost	a	2,23E-05	m ² s ⁻¹	$a = \lambda / (\rho c_p)$
Nusseltovo kritérium	Nu	8,67E+00	-	$Nu = 0,116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} (1 + (d_{ek} \sqrt{l})^{2/3}) (h/h_w)^{0,14}$
Součinitel přestupu tepla	a_{nuc}	2,24E+01	-	$a_0 = (Nu \lambda) / d_{ek}$
Součinitel přestupu tepla	a_0	1,88E+00	W m ⁻² K ⁻¹	$a_0 = (Nu \lambda) / l$
Tepelný tok	Q_0	5,10E+01	W	Tepelný tok mezi okolním prostředím a povrchem ocelového plechu $Q_0 = a_0 A (t_{in} - t_{oc})$
Součinitel prostupu tepla	k	5,09E-01	W m ⁻² K ⁻¹	$k = 1 / (1/a_{nuc} + 1/a_0 + \delta_{oc\ plechu} / \lambda_{oc\ plechu} + \delta_{izolace} / \lambda_{izolace})$
Tepelný tok	Q_{nuc}	2,76E+01	W	Tepelný tok skrz izolaci podstavy z okolního prostředí $Q_{nuc} = k A_{vně} (t_{in} - t_w)$

$Gr Pr$	c	n	$^{\circ}C$ /normální tlak	η (Pa s)
<10000>	0,6	0,000	18	1,2090E-06
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125	20	1,2010E-06
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250	24	1,1850E-06
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333	26	1,1770E-06

P VIII Nákres podstavy neizolovaného obráběcího stroje pro výpočet volné konvekce ze strany obráběcího prostoru

Délky stran jsou uvedeny v mm



P IX Tabulka výpočtu tepelného toku izolované podstavy pro nucenou konvekci

ze strany obráběcího prostoru

Přestup tepla - nucená konvekce (teplota uvnitř obráběcího stroje 50 °C)

Materiál podstavy - beton

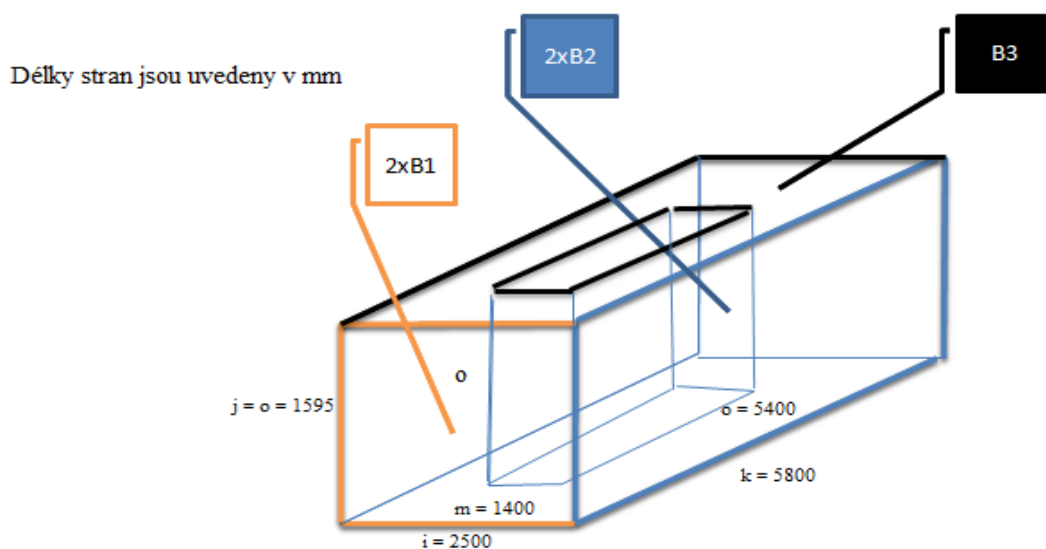
Poznámka
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty
Platí pro nucenou konvekci

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	<i>a</i>	0,9000	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>b</i>	0,2700	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>c</i>	0,8254	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>d</i>	0,7800	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>e</i>	0,3000	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>f</i>	0,6300	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>g</i>	1,3500	m	Zadané dle výkresu
Strana	<i>h</i>	8,2470	m	Zadané dle výkresu
Šířka štěrbin	<i>š</i>	0,0050	m	
Délka štěrbin	<i>l_š</i>	8,2470	m	
Tloušťka Oc plechu	<i>δ_{Oc plechu}</i>	0,0030	m	
Tloušťka izolace	<i>δ_{Izolace}</i>	0,0500	m	
Charakteristický rozměr	<i>l</i>	1,3500	m	Kratší strana
Celková plocha	<i>A_{vnější}</i>	11,1335	m ²	Teplosměnná plocha obvodu (<i>A_d</i>)
Teplota povrchu	<i>t_w</i>	26	°C	Požadovaná teplota povrchu a uvnitř podstavy
Teplota Oc plechu	<i>t_{Oc plechu}</i>	48	°C	
Teplota okolí	<i>t_{in}</i>	50	°C	Naměřená teplota vzduchu v obráběcím boxu
Přepočet teploty ve °C na K	<i>T = t + 273,15</i>	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	<i>Δt</i>	2,00	K	<i>Δt = (t_{in} - t_{oc})</i> - rozdíl teplot povrchu ocelového plechu a vzduchu v obráběcím boxu
Rozdíl teplot	<i>ΔT</i>	2,00	°C	<i>ΔT = (T_{in} - T_{oc})</i> - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Rozdíl teplot	<i>Δt_{izolace}</i>	24,00	°C	<i>Δt = (t_{in} - t_w)</i> - rozdíl teplot vzduchu v obráběcím prostoru a ve štěrbině
Rozdíl teplot	<i>ΔT_{izolace}</i>	24,00	K	<i>ΔT = (T_{in} - T_w)</i> - rozdíl teplot vzduchu v obráběcím prostoru a ve štěrbině

Střední teplota	t_s	26,00	°C	$t_s = t_{in}$
Střední teplota	t_s	49	°C	$t_s = (t_{oc} + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	m s ⁻²	Konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,86E-05	m s ⁻¹	Tabulková hodnota
Kinematická viskozita	ν	1,76E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,72E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,65E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Hustota	ρ	1,06E+00	kgm ⁻³	
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Oc\ plech}$	4,70E+01	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota (Ocel měkká tl. 3 mm)
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Izolace}$	3,60E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota (Plst' tl. 50 mm)
Reynoldsovo kritérium	Re	3,00E+03	-	Zvolená hodnota
Ekvivalentní průměr	d_{ekv}	9,99E-03		$d_{ekv} = 4(\delta l) / (2(\delta + l))$
Rychlost proudění	v	5,58E+00	ms ⁻¹	$v = Re\nu / d_{ekv}$
Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,10E-03	K ⁻¹	$\beta = 1 / (t_s + 273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	4,84E+08	-	$Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$Gr Pr$	3,53E+08	-	GrPr
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	9,48E+01	-	$Nu = c (GrPr)^n$
Pecletovo kritérium	Pe	2,19E+03	-	$Pe = v d_{ekv} / a$
Tepelná vodivost	a	2,55E-05	m ² s ⁻¹	$a = \lambda / (\rho c_p)$
Nusseltovo kritérium	Nu	8,67E+00	-	$Nu = 0,116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} (1 + (d_{ekv}/l)^{2/3}) (h/h_w)^{0,14}$
Součinitel přestupu tepla	α_{nuc}	2,36E+01	Wm ⁻² K ⁻¹	$\alpha_0 = (Nu\lambda) / d_{ekv}$
Součinitel přestupu tepla	α_0	1,86E+00	Wm ⁻² K ⁻¹	$\alpha_0 = (Nu\lambda) / l$
Tepelný tok	Q_0	4,14E+01	W	Tepelný tok z prostoru v obráběcím boxu do povrchu ocelového plechu $Q_0 = \alpha_0 A_0 (t_{in} - t_{oc})$
Součinitel prostupu tepla	k	5,08E-01	Wm ⁻² K ⁻¹	$k = 1 / (1/\alpha_{nuc} + 1/\alpha_0 + \delta_{Oc\ plechu} / \lambda_{Oc\ plechu} + \delta_{Izolace} / \lambda_{Izolace})$
Tepelný tok	Q_{nuc}	1,36E+02	W	Tepelný tok z prostoru v obráběcím boxu skrz izolaci podstavy $Q_{nuc} = k A_{vně} (t_{in} - t_w)$

$GrPr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

P X Nákres neizolovaného příčnicku obráběcího stroje z vnější strany



P XI Tabulka výpočtu tepelného toku neizolovaného příčnicku pro volnou konvekci

při zimním režimu

Přestup tepla - volná konvekce (zimní provoz - teplota okolí 18 °C)

Materiál nosníku - litina

Poznámka
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	i	2,5000	m	Zadané dle výkresu
Strana	j	1,5950	m	Zadané dle výkresu
Strana	k	5,8000	m	Zadané dle výkresu
Strana	m	1,4000	m	Zadané dle výkresu
Strana	o	5,4000	m	Zadané dle výkresu
Charakteristický rozměr	l	1,5950	m	Kratší strana (charakteristický rozměr pro svislou stěnu)
Charakteristický rozměr	l	2,5000	m	Kratší strana (charakteristický rozměr pro horní stěnu)
Plocha	$2 B_1$	7,9750	m ²	Dle obrázku (2500.1595).2
Plocha	$2 B_2$	18,5020	m ²	Dle obrázku (1595.5800).2
Plocha	B_3	6,9400	m ²	Dle obrázku (2500.5800)-(1400.5400)
Celková plocha	$B_{vnější}$	33,4170	m ²	Teplosměnná plocha obvodu ($B_1+B_2+B_3$)
Teplota povrchu	t_w	26	°C	Požadovaná teplota povrchu stěn příčnicku
Teplota okolí	t_{in}	18	°C	Naměřená teplota okolí
Přepočet teploty ve °C na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	Δt	8,00	°C	$\Delta t = (t_w - t_{in})$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Rozdíl teplot	ΔT	8,00	K	$\Delta T = (T_w - T_{in})$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Střední teplota	t_s	22	°C	$t_s = (t_w + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	ms ⁻²	Konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,57E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	kJkg ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,52E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Koeficient objemové roztažnosti	β	3,39E-03	K ⁻¹	$\beta = 1/(t_s + 273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	4,38E+09	-	$Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$Gr Pr$	3,20E+09	-	$Gr Pr$
Grashofovo kritérium	Gr	1,74E+09	-	$Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$ (pro svislou stranu j)
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$Gr Pr$	1,27E+09	-	$Gr Pr$ (pro svislou stranu j)
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,97E+02	-	$Nu = c (Gr Pr)^n$
Nusseltovo kritérium	Nu	1,45E+02	-	$Nu = c (Gr Pr)^n$ (pro horní stranu i)
Součinitel přestupu tepla mezi svislými stěnami a okolím	α_o	3,12E+00	Wm ⁻² K ⁻¹	$\alpha_o = (Nu \lambda) / l$

Součinitel přestupu tepla mezi horní stěnou a okolím	α_{oh}	1,90E+00	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	$\alpha_{oh}=1,3\alpha_0$
Tepelný tok	Q_0	7,66E+02	-	Celkový tepelný tok z horní stěny a z bočních stěn příčnicku do okolního prostředí $Q_0=\alpha_0 (B_1+B_2)(t_w-t_m)+\alpha_{oh} (B_3)(t_w-t_m)$

$GrPr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

P XII Tabulka výpočtu tepelného toku neizolovaného příčnicku pro volnou konvekci při letním režimu

Přestup tepla - volná konvekce (letní provoz - teplota okolí 30 °C)

Materiál nosníku - litina

Poznámka

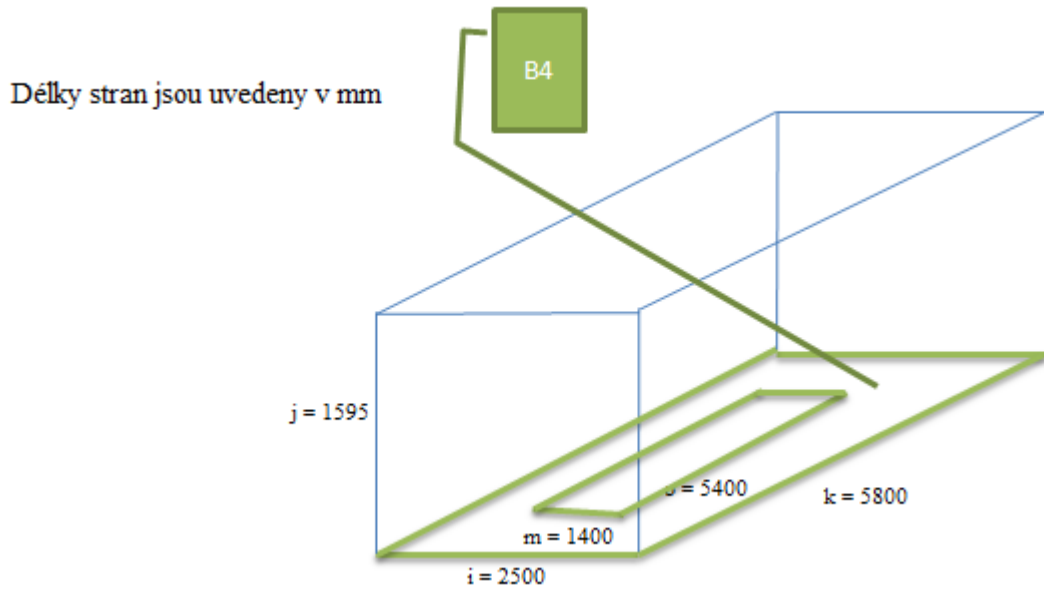
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	i	2,5000	m	Zadané dle výkresu
Strana	j	1,5950	m	Zadané dle výkresu
Strana	k	5,8000	m	Zadané dle výkresu
Strana	m	1,4000	m	Zadané dle výkresu
Strana	o	5,4000	m	Zadané dle výkresu
Charakteristický rozměr	l	1,5950	m	Kratší strana (charakteristický rozměr pro svislou stěnu)
Charakteristický rozměr	l	2,5000	m	Kratší strana (charakteristický rozměr pro horní stěnu)
Plocha	$2*B_1$	7,9750	m^2	Dle obrázku (2500.1595).2
Plocha	$2*B_2$	18,5020	m^2	Dle obrázku (1595.5800).2
Plocha	B_3	6,9400	m^2	Dle obrázku (2500*.5800)-(1400.5400)
Celková plocha	$B_{vnější}$	33,4170	m^2	Teplosměnná plocha obvodu ($B_1+B_2+B_3$)
Teplota povrchu	t_w	26	°C	Požadovaná teplota povrchu příčnicku

Teplota okolí	t_{in}	30	°C	Naměřená teplota okolí
Přepočet teploty ve °C na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	Δt	4,00	°C	$\Delta t = (t_w - t_{in})$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Rozdíl teplot	ΔT	4,00	K	$\Delta T = (T_{in} - T_w)$ - rozdíl teplot povrchu a okolního vzduchu
Střední teplota	t_s	28	°C	$t_s = (t_w + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	ms ⁻²	Konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,66E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	kJkg ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,58E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Koeficient objemové roztažnosti	β	3,32E-03	K ⁻¹	$\beta = 1/(t_s + 273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	1,92E+09	-	$Gr = g\beta\Delta t\nu^2$
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$Gr Pr$	1,40E+09	-	GrPr
Grashofovo kritérium	Gr	7,61E+08	-	$Gr = g\beta\Delta t\nu^2$ (pro svislou stranu j)
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$Gr Pr$	5,55E+08	-	GrPr (pro svislou stranu j)
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,50E+02	-	$Nu = c (GrPr)^n$
Nusseltovo kritérium	Nu	1,10E+02	-	$Nu = c (GrPr)^n$ (pro horní stranu i)
Součinitel přestupu tepla mezi svislými stěnami a okolím	α_o	2,43E+00	Wm ⁻² K ⁻¹	$\alpha_o = (Nu\lambda)/l$
Součinitel přestupu tepla mezi horní stěnou a okolím	α_{oh}	1,48E+00	Wm ⁻² K ⁻¹	$\alpha_{oh} = 1,3 \cdot \alpha_o$
Tepelný tok	Q_o	2,98E+02	-	Celkový tepelný tok z horní stěny a z bočních stěn příčnicku do okolního prostředí $Q_o = \alpha_o (B_1 + B_2)(t_w - t_{in}) + \alpha_{oh} (B_3)(t_w - t_{in})$

$GrPr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

P XIII Nákres neizolovaného příčnicku obráběcího stroje ze strany prostoru



P XIV Tabulka výpočtu tepelného toku neizolovaného příčnicku pro volnou konvekci ze strany obráběcího prostoru

Přestup tepla - volná konvekce (teplota uvnitř obráběcího stroje okolí 50 °C)

Materiál nosníku - litina

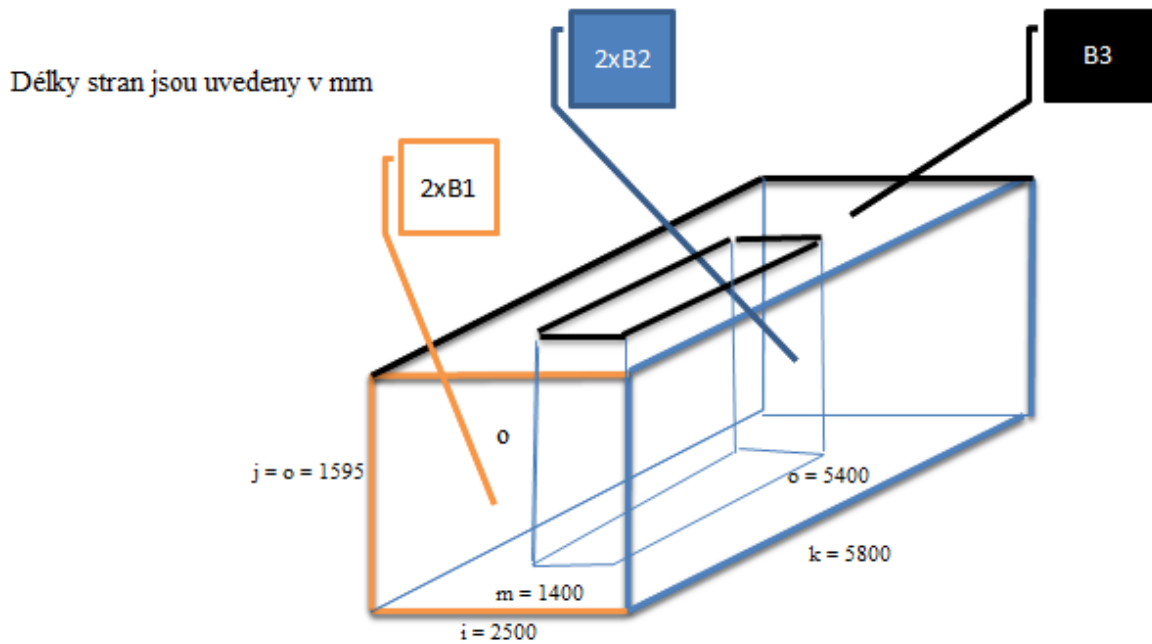
Poznámka
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	i	2,5000	m	Zadané dle výkresu
Strana	j	1,5950	m	Zadané dle výkresu
Strana	k	5,8000	m	Zadané dle výkresu
Strana	m	1,4000	m	Zadané dle výkresu
Strana	o	5,4000	m	Zadané dle výkresu
Charakteristický rozměr	l	2,5000	m	Kratší strana

Plocha	B_3	14,5000	m ²	Dle obrázku (2500.5800)
Celková plocha	$B_{vnější}$	6,9400	m ²	Teplotměnná plocha obvodu (B_4) Dle obrázku (2500.5800)- (1400.5400)
Teplota povrchu	t_w	18,0000	°C	Požadovaná teplota spodní strany příčnicku
Teplota okolí	t_{in}	50,0000	°C	Naměřená teplota uvnitř stroje
Přepočít teploty ve °C na K	$T = t + 273,15$	273,1500	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	Δt	32,0000	°C	$\Delta t = (t_{in} - t_w)$ - rozdíl teplot vzduchu v obráběcím prostoru a povrchu spodní stěnou podstavy
Rozdíl teplot	ΔT	32,0000	K	$\Delta T = (T_{in} - T_w)$ - rozdíl teplot vzduchu v obráběcím prostoru a povrchu spodní stěnou podstavy
Střední teplota	t_s	34,0000	°C	$t_s = (t_w + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	ms ⁻²	konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,71E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	kJkg ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,62E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,26E-03	K ⁻¹	$\beta = 1/(t_s + 273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	5,46E+10	-	$Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$GrPr$	3,99E+10	-	$GrPr$
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	4,57E+02	-	$Nu = c (GrPr)^n$
Součinitel přestupu tepla	α_0	4,79E+00	Wm ⁻² K ⁻¹	$\alpha_0 = (Nu \lambda) / l$
Tepelný tok	Q_0	1,06E+03	W	Tepelný tok do spodní strany příčnicku z obráběcího prostoru $Q_0 = \alpha_0 B_0 (t_{in} - t_w)$

$GrPr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

P XV Nákres příčnicku obráběcího stroje



P XVI Tabulka výpočtu tepelného toku izolovaného příčnicku pro nucenou konvekci

při zimním režimu

Přestup tepla - nucená konvekce (zimní provoz - teplota okolí 18 °C)

Materiál nosníku - litina

Poznámka
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty
Platí pro nucenou konvekci

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	i	2,5000	m	Zadané dle výkresu
Strana	j	1,5950	m	Zadané dle výkresu
Strana	k	5,8000	m	Zadané dle výkresu
Strana	m	1,4000	m	Zadané dle výkresu
Strana	o	5,4000	m	Zadané dle výkresu
Šířka štěrbin	$š$	0,0050	m	
Délka štěrbin	l_s	16,6000	m	

Tloušťka Oc plechu	$\delta_{Oc\ plechu}$	0,0030	m	
Tloušťka izolace	$\delta_{Izolace}$	0,0500	m	
Charakteristický rozměr	l	1,5950	m	Kratší strana (charakteristický rozměr pro svislou stěnu)
Charakteristický rozměr	l	2,5000	m	Kratší strana (charakteristický rozměr pro horní stěnu)
Plocha	$2*B_1$	7,9750	m ²	Dle obrázku (2500.1595).2
Plocha	$2*B_2$	18,5020	m ²	Dle obrázku (1595.5800).2
Plocha	B_3	6,9400	m ²	Dle obrázku (2500.5800)
Celková plocha	$B_{vnější}$	33,4170	m ²	Teplosměnná plocha obvodu ($B_1+B_2+B_3$)
Teplota povrchu	t_w	26	°C	Požadovaná teplota povrchu příčnicku
Teplota Oc plechu	$t_{Oc\ plechu}$	20	°C	
Teplota okolí	t_{in}	18	°C	Naměřená teplota m mimo stroje
Přepočet teploty ve °C na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	Δt	8,00	°C	$\Delta t = (t_w - t_{in})$ - rozdíl teplot vzduchu ve šterbině a okolního prostředí
Rozdíl teplot	ΔT	8,00	K	$\Delta T = (T_w - T_{in})$ - rozdíl teplot vzduchu ve šterbině a okolního prostředí
Rozdíl teplot	Δt_{oc}	2,00	°C	$\Delta t = (t_{oc} - t_{in})$ - rozdíl teplot povrchu plechu a okolního prostředí
Rozdíl teplot	ΔT_{oc}	2,00	K	$\Delta T = (T_{oc} - T_{in})$ - rozdíl teplot povrchu plechu a okolního prostředí
Střední teplota	t_s	26,00	°C	$t_s = t_w$
Střední teplota	t_s	19	°C	$t_s = (t_{oc} + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	ms ⁻²	konstanta
Kinematická viskozita	ν	1,62E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Kinematická viskozita	ν	1,57E-05	m ² s ⁻¹	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	kJkg ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,55E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,52E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota
Hustota	ρ	1,15E+00	kgm ⁻³	
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Oc\ plech}$	4,70E+01	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota (Ocel měkká tl. 3 mm)
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Izolace}$	3,60E-02	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tabulková hodnota (PLST tl. 50 mm)
Reynoldsovo kritérium	Re	3,00E+03	-	Zvolená hodnota
Ekvivalentní průměr	d_{ekv}	1,00E-02	m	$d_{ek} = 4(\delta l) / (2(\delta + l))$
Rychlost proudění	v	4,85E+00	ms ⁻¹	$v = Rev / d_{ek}$
Koeficient objemové roztažnosti	β	3,42E-03	K ⁻¹	$\beta = 1 / (t_s + 273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	4,26E+09	-	$Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$GrPr$	3,11E+09	-	$GrPr$

Grashofovo kritérium	Gr	4,26E+09	-	$Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$ (pro svislou stranu j)
Součin Grashofova a Prandtlova kritéria	$GrPr$	3,11E+09	-	$GrPr$ (pro svislou stranu j)
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,96E+02	-	$Nu = c (GrPr)^n$
Nusseltovo kritérium	Nu	1,96E+02	-	$Nu = c (GrPr)^n$ (pro horní stranu i)
Pecletovo kritérium	Pe	1,57E-02	-	$Pe = v d_{ekv} / a$
Teplotní vodivost	a	2,20E-05	$m^2 s^{-1}$	$a = \lambda / (\rho c_p)$
Nusseltovo kritérium	Nu	8,67E+00	-	$Nu = 0,116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} (1 + (d_{ekv}/l)^{2/3}) (h/h_w)^{0,14}$
Součinitel přestupu tepla	α_{nuc}	2,21E+01	$W m^{-2} K^{-1}$	$\alpha_0 = (Nu \lambda) / d_{ekv}$
Součinitel přestupu tepla mezi svislými stěnami a okolím	α_0	3,09E+00	$W m^{-2} K^{-1}$	$\alpha_0 = (Nu \lambda) / l$
Součinitel přestupu tepla mezi horní stěnou a okolím	α_{0h}	2,56E+00	$W m^{-2} K^{-1}$	$\alpha_{0h} = 1,3 \alpha_0$
Tepelný tok	Q_0	1,99E+02	W	tepelný tok z povrchu ocelového plech do okolního prostředí $Q_0 = \alpha_0 (B_1 + B_2) + \alpha_{0h} B_3 (t_{oc} - t_{in})$
Součinitel prostupu tepla	k	5,69E-01	$W m^{-2} K^{-1}$	$k = 1 / (1/\alpha_{nuc} + 1/\alpha_0 + \delta_{Oc} / \lambda_{Oc} + \delta_{Izolace} / \lambda_{Izolace})$
Tepelný tok	Q_{nuc}	1,52E+02	W	Tepelný tok z okolí skrz izolaci příčnicku $Q_{nuc} = k A_{ve} (t_{in} - t_w)$

$GrPr$	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333

P XVII Tabulka výpočtu tepelného toku izolovaného příčnicku pro nucenou konvekci

pro letní režim

Přestup tepla - nucená konvekce (letní provoz - teplota okolí 30 °C)

Materiál nosníku - litina

Poznámka
Zadané dle výkresu
Dle obrázku
Teplotní hodnoty vzduchu
Vybrané tepelné vlastnosti suchého vzduchu
Výpočtové hodnoty
Platí pro nucenou konvekci

Název	Značení	Rozměr	Jednotky	Poznámky
Strana	i	2,5000	m	Zadané dle výkresu
Strana	j	1,5950	m	Zadané dle výkresu
Strana	k	5,8000	m	Zadané dle výkresu
Strana	m	1,4000	m	Zadané dle výkresu
Strana	o	5,4000	m	Zadané dle výkresu
Šířka štěrbin	\check{s}	0,0050	m	
Délka štěrbin	$l\check{s}$	16,6000	m	
Tloušťka Oc plechu	$\delta_{Oc\ plechu}$	0,0030	m	
Tloušťka izolace	$\delta_{Izolace}$	0,0500	m	
Charakteristický rozměr	l	1,5950	m	Kratší strana (charakteristický rozměr pro svislou stěnu)
Charakteristický rozměr	l	2,5000	m	Kratší strana (charakteristický rozměr pro horní stěnu)
Plocha	$2 B_1$	7,9750	m ²	Dle obrázku (2500.1595).2
Plocha	$2 B_2$	18,5020	m ²	Dle obrázku (1595.5800).2
Plocha	B_3	6,9400	m ²	Dle obrázku (2500.5800)
Celková plocha	$B_{vnějši}$	33,4170	m ²	Teplosměnná plocha obvodu ($B_1+B_2+B_3$)
Teplota povrchu	t_w	26	°C	Požadovaná teplota povrchu příčnicku
Teplota Oc plechu	$t_{Oc\ plechu}$	28	°C	
Teplota okolí	t_{in}	30	°C	Naměřená teplota m mimo stroje
Přepoččet teploty ve °C na K	$T = t + 273,15$	273,15	K	0°C ≈ 273,15 K
Rozdíl teplot	Δt	4,00	°C	$\Delta t = (t_w - t_{in})$ - rozdíl teplot vzduchu ve štěrbině a okolního prostředí
Rozdíl teplot	ΔT	4,00	K	$\Delta T = (T_w - T_{in})$ - rozdíl teplot vzduchu ve štěrbině a okolního prostředí
Rozdíl teplot	Δt_{oc}	2,00	°C	$\Delta t = (t_{oc} - t_{in})$ - rozdíl teplot povrchu plechu a okolního prostředí
Rozdíl teplot	ΔT_{oc}	2,00	K	$\Delta T = (T_{oc} - T_{in})$ - rozdíl teplot povrchu plechu a okolního prostředí
Střední teplota	t_s	26,00	°C	$t_s = t_w$
Střední teplota	t_s	29	°C	$t_s = (t_{oc} + t_{in})/2 \Rightarrow \lambda$
Gravitační zrychlení	g	9,81E+00	m s ⁻²	Konstanta

Kinematická viskozita	ν	1,66E-05	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Tabulková hodnota
Kinematická viskozita	ν	1,66E-05	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Tabulková hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,01E+00	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Tabulková hodnota
Prandtlovo kritérium	Pr	7,30E-01	-	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,58E-02	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Tabulková hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	λ	2,58E-02	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Tabulková hodnota
Hustota	ρ	1,15E+00	kg m^{-3}	
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{oc\ plech}$	4,70E+01	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Tabulková hodnota (Ocel měkká tl. 3 mm)
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{izolace}$	3,60E-02	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Tabulková hodnota (PLSŤ tl. 50 mm)
Reynoldsovo kritérium	Re	3,00E+03	-	Zvolená hodnota
Ekvivalentní průměr	d_{ek}	1,00E-02	m	$d_{ek}=4 (\xi l)/(2 (\xi+l))$
Rychlost proudění	v	4,98E+00	m s^{-1}	$v=Re \nu/d_{ek}$
Koeficient teplotní objemové roztažnosti	β	3,31E-03	K^{-1}	$\beta=1/(t_s+273,15)$
Grashofovo kritérium	Gr	3,68E+09	-	$Gr=g^3 \beta \Delta t / \nu^2$
Součin Grashofova a Prandtl-ova kritéria	$Gr Pr$	2,69E+09	-	Gr Pr
Grashofovo kritérium	Gr	3,68E+09	-	$Gr= g^3 \beta \Delta t / \nu^2$ (pro svislou stranu j)
Součin Grashofova a Prandtl-ova kritéria	$Gr Pr$	2,69E+09	-	$Gr Pr$ (pro svislou stranu j)
Konstanta Nusseltova kritéria	c	0,135	-	Tabulková hodnota
Konstanta Nusseltova kritéria	n	0,333	-	Tabulková hodnota
Nusseltovo kritérium	Nu	1,86E+02	-	$Nu=c (Gr Pr)^n$
Nusseltovo kritérium	Nu	1,86E+02	-	$Nu=c (Gr Pr)^n$ (pro horní stranu i)
Pecletovo kritérium	Pe	1,65E-02	-	$Pe=v d_{ek}/a$
Tepelná vodivost	a	2,23E-05	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$a=\lambda /(\rho c_p)$
Nusseltovo kritérium	Nu	8,67E+00	-	$Nu=0,116(Re^{2/3}-125) Pr^{1/3}(1+(d_{ek}/l)^{2/3}(\eta/\eta_w)^{0,14})$
Součinitel přestupu tepla	a_{nuc}	2,24E+01	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	$a_0=(Nu^* \lambda)/d_{ek}$
Součinitel přestupu tepla	a_0	3,01E+00	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	$a_0=(Nu^* \lambda)/l$
Součinitel přestupu tepla mezi horní stěnou a okolím	a_{0h}	2,50E+00	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	$a_{0h}=1,30$
Tepelný tok	Q_0	2,01E+02	W	tepelný tok z povrchu ocelového plech do okolního prostředí $Q_0=a_0 (B_1+B_2) +a_{0h} B_3 (t_{oc}-t_{in})$

Součinitel prostupu tepla	<i>k</i>	5,66E-01	W m ⁻² K ⁻¹	$k=1/(1/\alpha_{nuc}+1/\alpha_0+\delta_{oc\ plechu}/\lambda_{oc\ plechu}+\delta_{izolace}/\lambda_{izolace})$
Tepelný tok	<i>Q_{nuc}</i>	7,57E+01	W	Tepelný tok z okolí skrz izolaci příčniku $Q_{nuc}=k A_{vm}(t_{in}-t_w)$

<i>Gr Pr</i>	c	n
<10000>	0,6	0,000
<10E3 - 5E2>	1,18	0,125
<5E2 - 2E7>	0,54	0,250
<2E7 - 10E13>	0,135	0,333