

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

VÝPOČTOVÁ ANALÝZA NAMÁHÁNÍ POVRCHOVÝCH VRSTEV PRACOVNÍHO VÁLCE PŘI VÁLCOVÁNÍ ZA TEPLA

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF WORKING ROLL SURFACE LAYERS IN HOT ROLLING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ LUKS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL POHANKA, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Luks

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výpočtová analýza namáhání povrchových vrstev pracovního válce při válcování za tepla

v anglickém jazyce:

Computational analysis of working roll surface layers in hot rolling

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma souvisí s řešením několika projektů Laboratoře vedení tepla a proudění (LPTP) a je vhodné k dalšímu rozvíjení pro zájemce o navazující doktorské studium. Jeho podstatou je výpočtové stanovení cyklické napěťové a deformační odezvy povrchových vrstev pracovního válce během jeho otáčení pomocí MKP - systém ANSYS. Uvažuje se přitom teplotní a silové zatěžování válce, teplota provalu 800-1000 st.C, chlazení vodními tryskami a kontakt s opěrným válcem. Jako okrajové podmínky pro popis chlazení budou použity údaje získané experimentálně v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Podrobnější údaje včetně podmínek navazujícího doktorského studia poskytne vědecký pracovník LPTP doc.Raudenský.

Cíle diplomové práce:

Analýza napjatosti povrchových vrstev válce od teplotních a mechanických účinků při definovaných provozních režimech válcování.

Seznam odborné literatury:

Janíček,P., Ondráček,E.: Mechanika těles – Pružnost a pevnost I, II, Skripta VUT v Brně, CERM, 2004, 2006

Elfmark J., a kol.: Tváření kovů, SNTL Praha, 1992

Pešina, E.: Základy užité teorie plasticity, SNTL Praha, 1966

Hajduk,M., Konvičný,J.: Silové podmínky při válcování oceli za tepla, SNTL Praha, 1983

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Pohanka, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 10.11.2008

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou teplotního a mechanického zatížení pracovních válců při válcování za tepla. Na začátku práce je obecně popsána problematika válcování se zaměřením na pracovní válec. Je zde uveden teoretický rozbor zatížení válce a mechanismy ovlivňující jeho životnost. Vlastní práce se zabývá vytvořením výpočtového modelu MKP v programu ANSYS.

Vytvořený model je zatěžován různými schématy válcování a je sledována napjatost v povrchové vrstvě. Jako zatěžující okrajové podmínky jsou na model aplikovány hodnoty získané z měření na válcovací trati.

Klíčová slova: válcování za tepla, pracovní válec, namáhání povrchových vrstev, MKP

Abstract

This thesis is dealing with an analysis of thermal and mechanical loads on a work-roll. First, hot rolling focused on work-roll is described in general. A theoretical analysis of roll loads and the mechanisms affecting roll durability are presented here. The thesis is concentrated on creation of a model in FEM program ANSYS. The final model is loaded with different rolling schemes and monitored stresses in a surface layer. The parameters obtained from the measurements performed in a rolling mill are applied as boundary conditions within the model.

Keywords: Hot Rolling, Work Roll, Stress of Rolls, Surface Layer, FEM

LUKS, T. *Výpočtová analýza namáhání povrchových vrstev pracovního válce při válcování za tepla.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Pohanka, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci “Výpočtová analýza namáhání povrchových vrstev pracovního válce při válcování za tepla” jsem vypracoval samostatně s použitím literatury uvedené v seznamu pod vedením vedoucího diplomové práce

V Brně dne 25. května 2009

.....
Tomáš Luks

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Pohankovi, PhD. vedoucímu diplomové práce za jeho připomínky, návrhy a cenné rady při vypracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Miroslavu Raudenskému, CSc. a prof. Ing. Jindřichu Petruškovi, CSc za rady a připomínky k práci.

Obsah

1	Úvod	4
2	Přehled problematiky válcování	5
2.1	Technologie válcování	5
2.1.1	Poměry při podélném válcování	5
2.1.2	Válcovací stolice	6
2.2	Pracovní válce	8
2.2.1	Konstrukce pracovního válce	8
2.2.2	Opotřebení válců	9
2.3	Rozbor zatížení na válci při válcování za tepla	11
2.3.1	Mechanické zatížení	12
2.3.2	Teplotní zatížení	17
3	Metodika řešení	19
3.1	Vytvoření výpočtového modelu modelu	19
3.1.1	Model geometrie	19
3.1.2	Konečnoprvkový model	20
3.1.3	Model materiálu	22
3.1.4	Model vazeb	23
3.1.5	Model zatížení	24
4	Experimentální zjištění okrajových podmínek	27
4.1	Měření zatížení při válcování	27
4.1.1	Konstrukce měřícího válce	28
4.1.2	Měření a výsledky	29
4.2	Měření chlazení válce	31
5	Výpočtová simulace	34
5.1	Popis výpočtů	34
5.1.1	S01 - Jeden úběr	34
5.1.2	S02 - Válcovací kampaň	35
5.1.3	S03 - Generované zatížení	37

6	Analýza výsledků	39
6.1	Metodika analýzy	39
6.2	Výsledky a vyhodnocení simulací	40
6.2.1	Schéma S01	40
6.2.2	Schéma S02	48
6.2.3	Schéma S03	51
6.2.4	Shrnutí výsledů	55
7	Závěr	56
8	Literatura a odkazy	57
A	Přílohy	58
A.1	Naměřené parametry při válcování pro první sochor	58
A.2	Parametry TRIOSTOLICE	59
A.3	Parametry materiálových modelů	59

1 Úvod

Technologie válcování za tepla patří k vysoce efektivním a důležitým technologiím výroby. V současné době se jedná, z hlediska objemu zpracovaného materiálu, o bezkonkurenčně nejpoužívanější technologii výroby polotovarů a hutních výrobků. Historicky se válcování kovů začalo rozvíjet před třemistý lety. Můžeme říci, že začátek průmyslové revoluce na konci 18. století je spojen s úspěšným zvládnutím hromadného zpracování kovů nutným pro masivní industrializaci. Právě technologie válcování nabídla velmi efektivní a levnou hromadnou výrobu kovových hutních výrobků. V průběhu let byla výroba válcováním vyvíjena do mnoha různých směrů. I přes velmi rozvinutou a technicky zvládnutou technologii jsou zde neustále snahy o zvyšování kvality výsledných výrobků, energetické úspory, životnost válců.

Mezi nejdůležitější součásti válcovací stolice, které z velké části ovlivňují kvalitu výrobku, patří pracovní válce stolice. Při návrhu se snaží konstruktér dosáhnout co nejdelší životnosti při zachování výstupní kvality. Nároky na válec jsou mnohdy v rozporu s požadavky na vysokou rychlost, nebo potřebu vysokých tvářecích tlaků pro vysoko-pevnostní oceli. Na opotřebení válce má vliv mnoho faktorů. Asi stěžejním parametrem určujícím opotřebení jsou materiálové vlastnosti válce, ale při válcování se také uplatňuje interakce cyklického mechanického a teplotního zatížení s otěrem, adhezí a korozí [9].

Tato práce se zabývá analýzou napjatosti povrchových vrstev při různých režimech válcování. Je zde studováno chování povrchových vrstev při různém způsobu teplotně mechanického zatížení. Při práci byl vytvořen základní konečno-prvkový model pro teplotní a napjatostně-deformační analýzu. Jako okrajové podmínky byly použity data z měření provedené Laboratoří přenosu tepla a proudění VUT v Brně na reálné válcovací stolici a laboratorním zařízení.

2 Přehled problematiky válcování

2.1 Technologie válcování

Jedná se o výrobní technologii objemového tváření, kdy mezi dvěma nebo více rotujícími válci dochází ke kontinuální plastické deformaci tvářeného materiálu. Při válcování je v tvářeném materiálu vyvozena trojosá, převážně tlaková napjatost, s největší složkou ve směru přetvářecí síly [8]. Tím se technologie válcování podobá kování mezi šikmými kovádky. S ní má i podobné kinematické podmínky deformace. Při válcování se předpokládá platnost zákona zachování stálého objemu tvářeného materiálu [1].

$$h_o \cdot b_o \cdot l_o = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1 = konst. \quad (2.1)$$

Při tváření dochází převážně k deformaci ve směru tloušťky materiálu h , menší ve směru délky l a šířky b při platnosti výše zmíněného zákona.

Základní dělení technologie válcování je z hlediska tvářecí teploty. Rozeznáváme válcování za tepla a za studena.

- **Válcování za studena** - k válcování dochází za teplot nižších než rekrytalizační teplota. Z hlediska toho, že rekrytalizace nastává v určitém rozmezí teplot, je hranice stanovena na $0.3 T_t$ (teplota tavení materiálu). Při válcování dochází k deformaci krystalů kovu, ke zjemňování struktury. Následkem plastického přetvoření dochází k zpevnění materiálu a vzniknu vnitřních napětí. Kromě zvýšení mez pevnosti může docházet také ke změně fyzikálních vlastností, např. magnetické nebo elektrické. S nárůstem pevností souvisí také zhoršování plastických vlastností kovů, proto při velkém úběru přes několik průchodů válci musí dojít k mezikroku žíhání [8].
- **Válcování za tepla** - k válcování dochází za teplot vyšší než rekrytalizační teplota. Jako hraniční je stanovena teplota $0.7 T_t$. Při deformaci krystalů vnějším tlakem za těchto teplot se krystalová mřížka rychle regeneruje [8]. Mechanické vlastnosti se proto nemění a vývalek má normální krystalickou strukturu. Při procesu dochází k odstranění trhlin, bublin, aj.. Při válcování ingotu dochází k vzniku vláknité struktury z hrubé dendritické struktury ingotu [5].

2.1.1 Poměry při podélném válcování

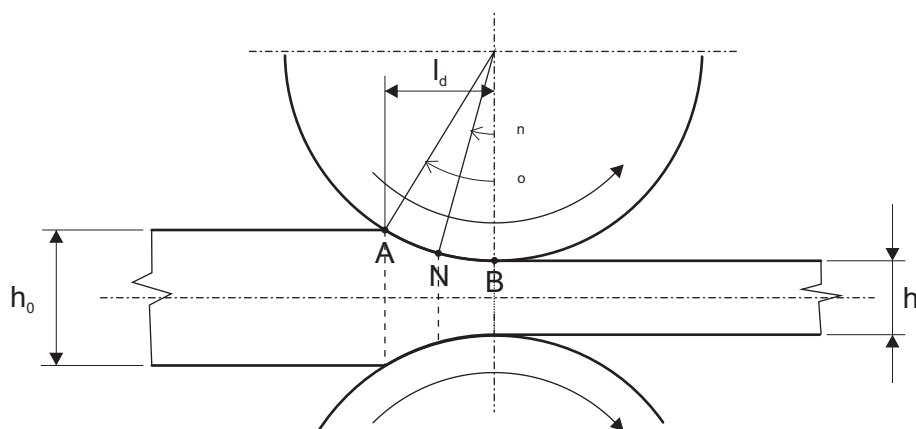
Při podélném válcování dochází ve válcovací mezeře (mezi body A-B na obr. 2.1) k tváření materiálu. Vstupující polotovár s tloušťkou h_0 a šířkou b_0 má po průchodu

válce tloušťku h_1 a šířkou b_1 . Rozdíl mezi výstupní a vstupní tloušťkou pak udává úběr.

Během válcování je materiál vtahován do válcovací mezery rychlostí v_0 a vystupuje rychlostí v_1 . Při platnosti zákona stálých objemů při plastické deformaci ve válcovací mezeře můžeme napsat:

$$v_1 = v_0 \cdot \frac{b_0 \cdot h_0}{b_1 \cdot h_1} \quad (2.2)$$

Jestliže je obvodová rychlost válce konstantní, pak je z rozdílných rychlostí na vstupu a výstupu zřejmé, že rychlost toku materiálu ve válcovací mezeře se mění. Tím vzniká vzájemný pohyb mezi válcem a válcovaným materiálem a dochází ke vzájemnému skluzu. Na začátku záběrového oblouku se materiál zpožďuje za válcem, na konci se naopak materiál předbíhá. Mezi těmito dvěma stavy se nachází teoretický bod - tzv. neutrální bod, který má stejnou rychlost na povrchu válce i na povrchu válcovaného materiálu. Tento bod rozděluje pásmo deformace na dvě oblasti (pásmo předstihu a pásmo opožďování) lišící se průběhem deformace a napětí.



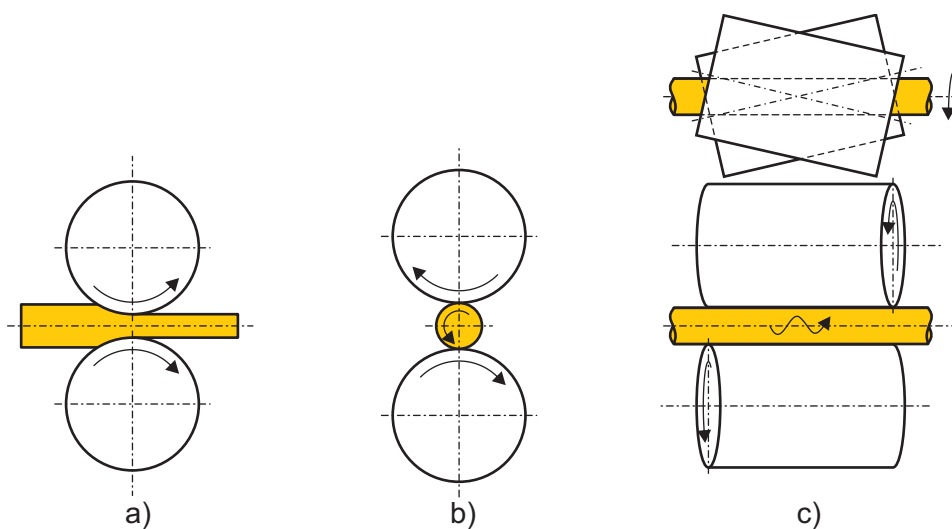
Obr. 2.1: Podélné válcování

Popis stavu deformace a napjatosti v jednotlivých pásmech válcovací mezery se podrobně zabývá B. Počta [8]. Pro naše účely je důležitý pouze popis tlaku materiálu na válce a bude popsán v kapitole pojednávající o zatížení pracovního válce 2.3.

2.1.2 Válcovací stolice

Válcování probíhá na válcovacích stolicích. Základ tvoří stojan, ve kterém jsou uloženy pracovní válce. Válce mohou být ploché nebo kalibrované, podle toho pak vyrábí profily (kolejnice, nosníky), nebo rovinné polotovary (pásky, plechy). Podle směru průchodu materiálu, podle vzájemné polohy válců a provalku a podle průběhu deformace rozeznáváme [8]:

- a) **Podélné válcování** - materiál je tvářen ve směru podélném - osy válců jsou rovnoběžné a kolmé na vektor rychlosti pohybu polotovaru. Válce se otáčejí proti sobě a vtahují válcovaný materiál do válcovací mezery kde je přetvářen. Základní působ válcování.
- b) **Příčné válcování** - osy pracovních válců a provalku jsou rovnoběžné a směr otáčení válců je shodný. Materiál se otáčí mezi válci a mění se jeho průřez. Používá se pro hromadnou výrobu hřídelí, nebo tváření závitů.
- c) **Kosé válcování** - obdoba příčného válcování jen osy válců jsou mimoběžné. Používá se pro výrobu bezešvých trubek, kdy ve středu provalku vzniká trhlina, která je následně zvětšována a kalibrována.



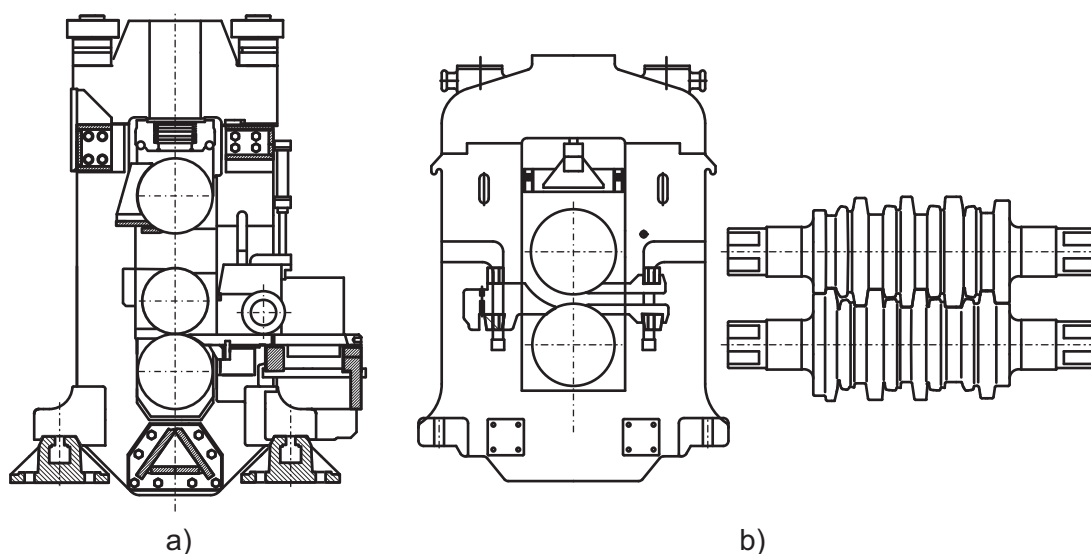
Obr. 2.2: Druhy válcování, a) Podélné válcování, b) Příčné válcování, c) kosé válcování

Válcovací stolice bychom mohli dále dělit do mnoha rozdílných kategorií, ať je to podle počtu válců na duo, trio, kvarto, mnoho-válcové; podle druhu a velikosti vývalku; podle způsobu otáčení pracovních válců atd..

Pro potřeby velkého přetvoření je třeba zajistit vícenásobný průchod provalku válcem. To jde realizovat několika způsoby.

- Jednosměrná stolice - je potřeba dopravit materiál z jedné strany stolice na druhou. Dochází k prodlevě ve válcování a stolice má menší výslednou kapacitu.
- Reverzní stolice - dokáže obrátit směr otáčení válců. Provalek je válcován z jedné strany stolice na druhý reverzační válců.

- Tříválcová stolice - obsahuje tři válce točící se po celou dobu válcování jedním směrem tak, že vzniknou dvě válcovací mezery. Jedna vtahuje provalek zprava doleva, druhá naopak. Provalek je potom směřován do správné válcovací mezery.
- Válcovací tratě - pro hromadnou výrobu se používá sada jednosměrných stolic řazených za sebou. Tento způsob je obvyklý pro dlouhé výrobky jako plechy, dráty nebo při výrobě z PLP (plynule litého polotovaru).



Obr. 2.3: Ukázky válcovacích stolic, a) Stolice TRIO se třemi válci, b) Stolice duo s kalibračním pracovními válci

2.2 Pracovní válce

2.2.1 Konstrukce pracovního válce

Pracovní válce jsou jednou z částí válcovací stolice, které mají zásadní význam na kvalitu výsledných produktů. Podle profilu a výsledných vývalků rozeznáváme válce ploché a kalibry. Kalibry jsou pro svou členitost náročnější na kvalitu materiálu, chlazení a mazání než válce ploché. Jsou zde také rozdíly mezi požadavky na válec pro teplé a studené válcování. Při tváření za studena vyvozují válce vyšší tvářecí síly, tepelné zatížení je malé. Při tváření za tepla je tlakové zatížení ve válcovací mezeře kombinováno s teplotním napětím způsobeným velkými teplotními gradienty v povrchové vrstvě válce.

Požadavkem na materiál válce je vysoká tvrdost na povrchu válce a odolnost proti cyklickému namáhání. Materiály, které nabízejí dobrou odolnost proti mechanicko-teplotnímu namáhání, a opotřebení, jsou různé odstředivě lité oceli. Pro válcování za tepla se hodí oceli z různě vysokým obsahem chromu, zvyšující odolnost proti teplotní únavě. Z hlediska vysoké ceny se používají u méně namáhaných stolic válce z litiny, případně uhlíkové oceli. Jejich povrchovou vrstvu lze lehce zakalit pro zvýšení tvrdosti.

Pro vysoce namáhané válce lze použít slinuté karbidy. Vynikají vysokou tvrdostí a odolností proti abrazi, oxidaci a jsou odolnější proti teplotním šokům. Obdobně jako slinuté karbidy lze použít keramické kompozity. Mají ještě vyšší odolnost proti abrazi, jejich velkým nedostatkem je náchylnost proti křehkému lomu.

Válce se vyrábějí z předkovaných nebo předlitých polotovarů, jsou soustruženy a broušeny na přesný tvar. Pro snížení ceny válce je možné vyrobit válec ze dvou materiálů, kdy pracovní část válce je z odlišného materiálu než jádro. Tento způsob se používá u keramického materiálu a slinutých karbidů. Je možné ho také použít pro oceli a litiny.

2.2.2 Opotřebení válců

I přes použití vysoce-jakostních materiálu dochází k postupnému opotřebení válců. Obzvláště u válcování za tepla při použití kalibrovaných válců dochází k velkému opotřebení. Mechanismy opotřebení válce jsou dle [9] následující:

- **Adheze** : při válcování může dojít k „nalepení“ zoxidovaných vrstev válcovaného materiálu na pracovní válec. Tím se zvětší průměr, vzroste tření a sníží se spojené zatížení válce. Kvalita vývalku se sníží.
- **Otěr** : patří mezi hlavní mechanismy opotřebení válce. Vzhledem k rozdílné rychlosti válce a provalku dochází k otěru. S vrůstajícím opotřebením válce a jeho stále vyšší drsností se otěr zvětšuje. Otěr také zvětšuje přítomnost tvrdých oxidů železa na válcovaném materiálu. Mechanismus otěru nezpůsobuje jen úbytek materiálu je také možnou příčinou vzniku trhlin. Snížit jeho vliv můžeme mazáním ve válcovací mezeře.
- **Teplotní cyklické zatížení** : povrch válce je střídavě v kontaktu s provalkem a chlazením. Tím je způsobena cyklická teplotní napjatost s frekvencí otáčení. Při delším kontaktu může teplotní napětí překročit mez plasticity materiálu a povrch válce se začne chovat plasticky. Vzhledem k cyklickému zatížení pak dochází k nukleaci poruch a vzniku trhliny.
- **Mechanické cyklické zatížení** : Vzniká jako reakce na tvářecí síly vyvozené válcem. Způsobuje napjetí v povrchové vrstvě. Je-li jako materiál válce vysokopevnostní ocel, která bude mít pravděpodobně lepší vlastnosti než tvářený

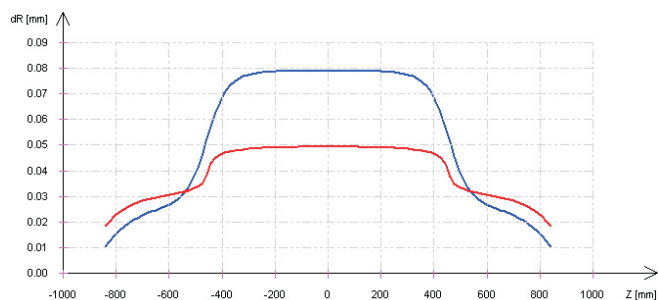
materiál, není mechanické zatížení při dominanci nebezpečné. Při kombinaci s teplotním zatížením přispívá k plastickému chování materiálu.



Obr. 2.4: Ukázky poškození válců

Povrchové vrstvy jsou při válcování za tepla značně teplotně zatíženy. Okamžitá povrchová teplota může dosáhnout až teplot 600 °C. Na povrchu vzniká vlivem velkého teplotního gradientu značné teplotní napětí a válec je celkově zahříván. Aby teplota válce nepřekročila úměrnou teplotu a napjatost nepřesáhla hraniční hodnoty, jsou válce aktivně chlazeny. Důležité je, aby teplota nepřekročila hodnotu, kdy zakalená povrchová vrstva ztrácí svou tvrdost, díky čemuž by následovalo zvýšené namáhání válce, zvýšení tření a případné poškození válce.

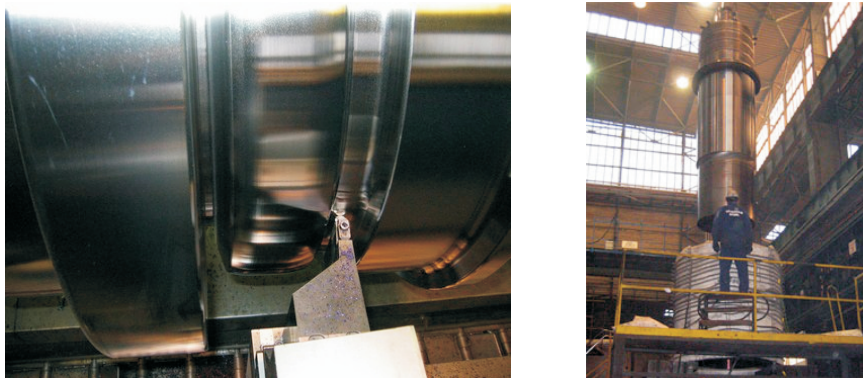
Další důvod pro chlazení válce je možnost řízení profilu válce a tím i výsledného provačku. Při válcování vzniká tzv. crown efekt - teplotní balicita, kdy je teplo nerovnoměrně odváděno z povrchu podél osy válce a způsobuje, že ve středu válce pod provačkem má válec větší průměr než na okrajích. Aktivním řízením trysek podél válce můžeme toto chování do značné míry eliminovat.



Obr. 2.5: Vypočtená balicita válce pro různé časy válcování bez aktivního řízení chlazení

Při použití mazání ve válcovací mezeře se snižuje přestup tepla mezi provačkem a válcem, dochází k menšímu ohřevu válce a tím i menšímu teplotnímu gradientu. Také se snižuje tření a záběrný moment válce. V současné době se používají různé minerální nebo organické oleje [9].

Všechny tyto aspekty ovlivňují trvanlivost válce. Typická životnost plochého válce při válcování za tepla udávána v kilogramech vyválcovaného materiálu na metr opotřebení válce je okolo $5 \cdot 10^3 \div 20 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ u kalibrovaného válce je to jen $700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ [9]. Při výměně válce a přerušení provozu dochází k zvyšování nákladů. Samotná renovace a výměna je započítána do výsledné ceny výrobku, dle [9] ji může tvořit z $5 \div 15\%$.



Obr. 2.6: *Renovace válců* [12][3]

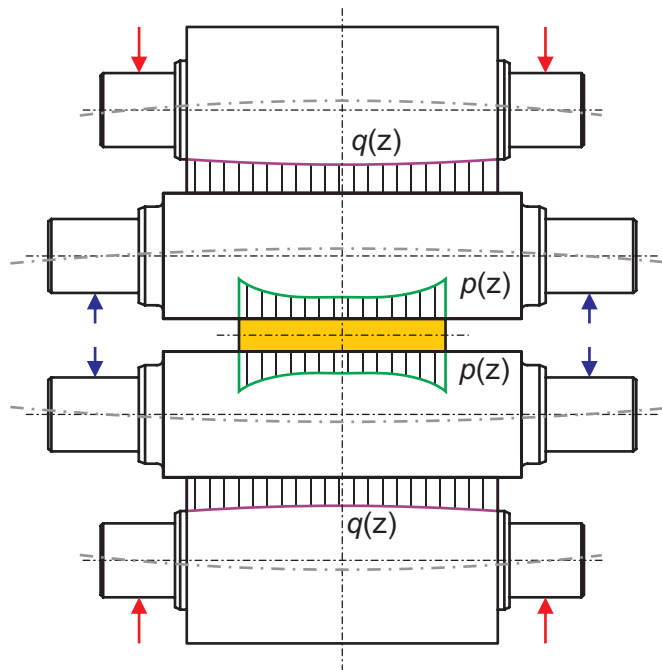
Válec je vyráběn tak, aby bylo možné několikrát v průběhu celé životnosti odstranit poškozenou vrstvu a válec tak renovovat. Pro kompenzování odebraného materiálu je možné navařit na povrch novou vrstvu. Další možností renovace je bandážování. Nový válec je vytvořen z původního válce osoustružením na menší průměr, na který je nalisována bandáž. Tato technologie vyniká nízkou cenou, možností mít kvalitnější materiál na bandáži než byl u válce. Nevýhodou je stálá přítomnost tahového napětí v bandáži a technologická náročnost renovace [3].

2.3 Rozbor zatížení na válci při válcování za tepla

Na válec působí při provozu kombinace zatěžujících prvků. Jejich vzájemnou interakcí je válec cyklicky zatěžován. Zatížení válce můžeme rozdělit podle fyzikální podstaty na zatížení mechanické a teplotní. U mechanického zatížení se jedná o reakční síly vyvozené válcovacím tlakem. Teplotní zatížení je způsobeno teplotními gradienty vniklými při ohřevu povrchu válce od provačku a ochlazení od chladících trysek.

2.3.1 Mechanické zatížení

Mechanické zatížení válce v rovině vymezené osami pracovních válců je znázorněno na obrázku 2.7. Pracovní válec je v kontaktu s válcovaným materiálem, případně také s opěrným válcem. Válec je uložen v ložiskách v rámu stolice.

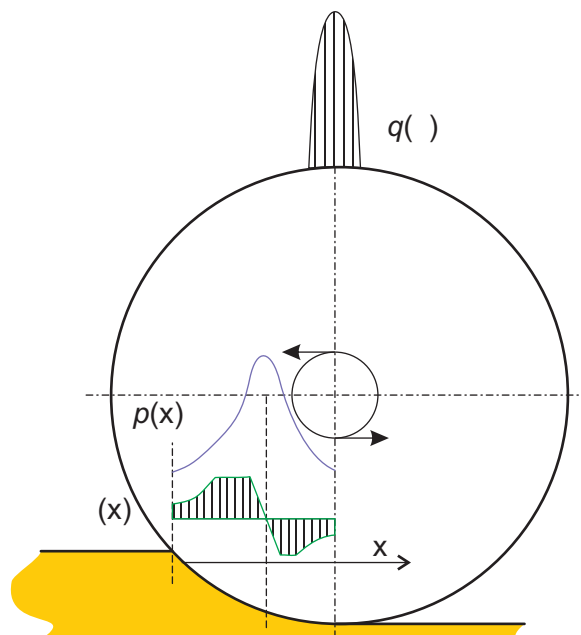


Obr. 2.7: Mechanické zatížení válců

Při válcování dochází k ohybu pracovního válce. Pro cylindrický profil válce dochází k ovlivnění rovinnosti vývalku – ve středu má větší tloušťku než na krajích, a rozložení tlaku podél osy je nerovnoměrné. Pro eliminaci tohoto jevu mohou být válce vyrobeny s konvexním profilem – parabola případně část sinusoidy. Tím se po prohnutí válce dosáhne lepší rovnosti válce, rovnoměrnějšího rozložení tlaku podél osy a menšího opotřebení. Pro malé pracovní válce může být ohyb od tvářecí síly neúnosný z hlediska pevnosti materiálu válce. Pak je možno použít opěrné válce, které zvýší tuhost válcování, aniž by se musel měnit poloměr pracovního válce.

Průběh naznačených tlaků na válci je pak závislý na konkrétních podmínkách válcování a může být dále ovlivněn přímým zásahem řízení profilu válce pomocí chladicích sekcí, případně řízením profilu opěrného válce.

Průběh reakčních sil v rovině kolmé na osu je zobrazen na obr. 2.8.



Obr. 2.8: Mechanické zatížení válců - rovina kolmá na osu válce[4]

Kontakt s opěrným válcem

Průběh tlaku v kontaktu mezi opěrným a pracovním válcem má "dome-shape" tvar. Velikost stykové plochy je podle Hertzovy teorie kontaktu [11] rovna $2b$.

$$b = 1.13 \sqrt{(F \cdot l) (\eta_1 + \eta_2) \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} \quad (2.3)$$

$$\eta_{1,2} = \frac{1 - \nu_{1,2}^2}{E_{1,2}} \quad (2.4)$$

Kde F zátěžná síla
 l délka kontaktu mezi válci
 $R_{1,2}$ Poloměr válců
 $E_{1,2}$ Youngův modul pružnosti materiálů válců
 $\nu_{1,2}$ Poissonův poměr materiálů válců

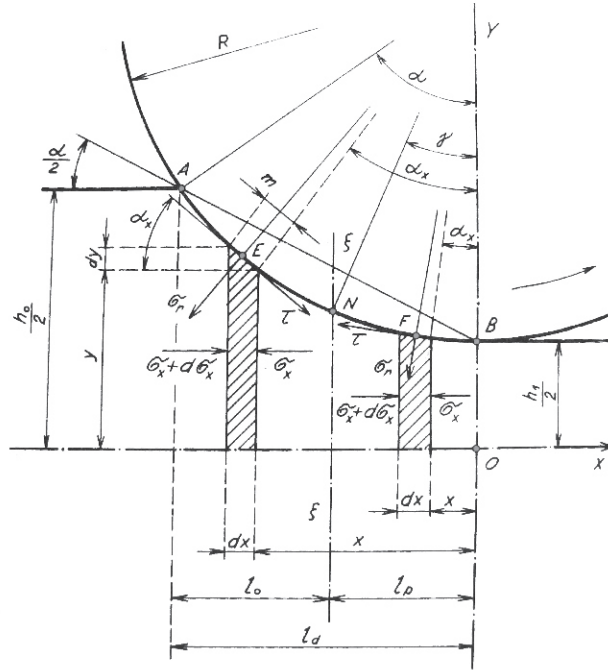
Maximální hodnota napětí má hodnotu

$$\sigma_{max} = -2 \frac{F}{\pi} b \cdot l \quad (2.5)$$

Kontakt s provalkem

Pro zjištění kontaktních tlaků mezi pracovním válcem a provalkem vycházíme z teorie tváření popsanou v literatuře [8]. Při řešení válcování na hladkých válkách

můžeme celý výpočet zjednodušit předpokladem rovinného stavu deformace s dvojím stavem napjatosti ($\sigma_z = 0$, $\epsilon_z = 0$). Rozbor sil a napětí v řezech v pásmu deformace je uveden na obr. 2.9.



Obr. 2.9: Elementární síly a napětí ve válcovací mezeře [8]

Při řešení je celá oblast válcovací mezery rozdělena na dva úseky, kdy hraničním bodem je neutrální body, kde se mění směr tečného napětí. Uvolněním vyznačených elementů a zanedbáním součinu nekonečně malých veličin dostáváme vztah pro rovnováhu elementu ve válcovací mezeře [7][8][1].

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{\sigma_r - \sigma_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau}{y} = 0 \quad (2.6)$$

Řešením této rovnice je závislé na konkrétních geometrických podmínkách válcování. Původní předpoklad o dvou pásmech ve válcovací mezeře nutný pro uvolnění elementárního prvku je platná jen při teoretickém válcování. Ve skutečnosti při válcování se ve válcovací mezeře vykytují tři možná pásma:

- pásmo skluzu - rychlost válce je proti rychlosti materiálu rozdílná, tangenciální napětí je úměrné velikosti normálového napětí podle vztahu

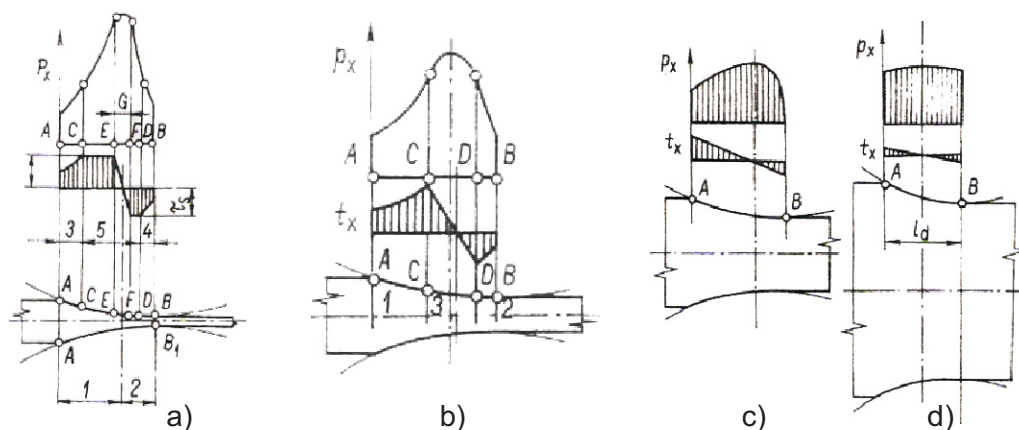
$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (2.7)$$

- pásmo přilnutí - oblast okolo neutrálního bodu, válcovaný materiál má na povrchu stejnou rychlost jako válec, dochází přilnutí. Tangenciální napětí pak není úměrné normálovému tlaku. V této oblasti můžeme tangenciální napětí vypočítat z dynamické viskozity η a příslušného gradientu rychlosti. V neutrálním bodě je tangenciální napětí nulové.

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv_x}{dy} \quad (2.8)$$

- přechodové pásmo - přechodová oblast mezi předchozími pásmy, tangenciální napětí je v této oblasti konstantní.

Podle rozložení těchto oblastí ve válcovací mezeře určené geometrickými podmínkami válcování dostáváme rozdílné řešení základní rovnice rovnováhy elementárního prvku 2.6. Ukázka průběhů napětí po záběrném oblouku v závislosti na poměru délky záběrného oblouku l_d střední tloušťky materiálu h_s je ukázána na obrázcích 2.10.

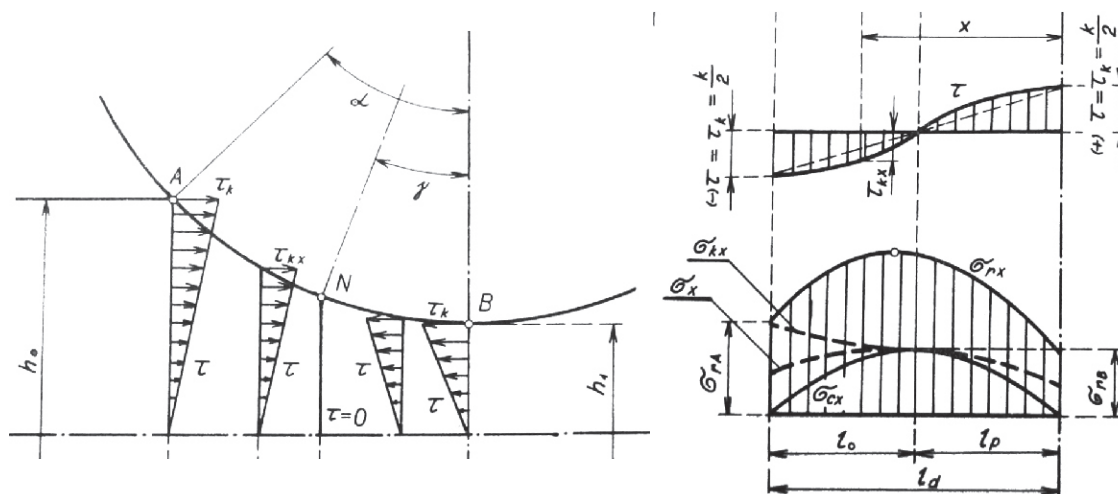


Obr. 2.10: Průběhy normálových a tangenciálních napětí po záběrovém oblouku pro různé varianty válcování a) $l_d/h_s = 5$ b) $l_d/h_s = 2 \div 5$ c) $l_d/h_s = 0,5 \div 2$ d) $l_d/h_s < 0,5$ [1]

Pro válcování kdy je délka záběrného oblouku l_d a střední tloušťka materiálu h_s v poměru menším než 2 ($l_d/h_s = 0 \div 2$) dochází ve válcovací mezeře k přilnutí po celé délce. Průběh tangenciálního napětí při povrchu válce potom dle literatury [8] má průběh tvaru kosinusoidy s extrémními hodnotou na vstupu a výstupu válcovací mezery. Nahrazením této závislosti přímkou (předpokladem je, že neutrální řez leží uprostřed pásma deformace), dostáváme vztah pro průběh tangenciálního napětí po záběrném oblouku:

$$\tau_K = \pm \frac{k}{2} \left(1 - \frac{2x}{l_d} \right) \quad (2.9)$$

Kde k je konstanta plastičnosti



Obr. 2.11: Průběhy normálových a tangenciálních napětí po záběrném oblouku [1]

Odvozením průběhu normálového napětí se zabývá v knize [8] B. Počta. Rovnice pro radiální normálové napětí má dle něj tvar:

$$\sigma_{rx} = \frac{k}{2} \left[\psi_x + \int (1 + \psi_x) \cdot \frac{dy}{y_k} \right] \pm \int \tau_K \cdot \frac{dx}{y_k} + C \quad (2.10)$$

$$\psi_x = \sqrt{1 - \left(\frac{2\tau_K}{k} \right)^2}$$

Kde y_k pořadnice bodu obrysu pásma deformace

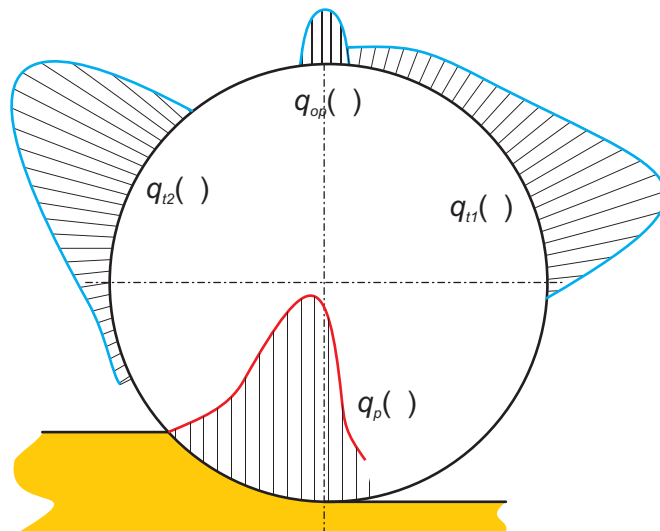
Integrováním rovnice 2.10 dostáváme konečný průběh normálového napětí po záběrném oblouku:

$$\begin{aligned}
\sigma_{rX} &= \sigma_{kA} + \frac{k}{2} \left[\psi_x - A \cdot \ln \frac{h_0}{2y_k} + B \left(\frac{h_0}{2} - y_k \right) \right] \\
\sigma_{rX} &= \sigma_{kB} + \frac{k}{2} \left[\psi_x + A \cdot \ln \frac{y_k}{2h_1} - B \left(y_k - \frac{h_1}{2} \right) \right] \\
A &= \frac{2+\alpha}{\alpha} + \frac{2(2-\alpha)}{\alpha} \left(\frac{h_0}{\Delta h} - 1 \right) \\
B &= \frac{2-\alpha}{\alpha} \frac{4}{\Delta h}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

2.3.2 Teplotní zatížení

Vstupuje-li element povrchu válce do válcovací mezery, dochází k jeho ohřevu a element má snahu se rozpínat. V tom mu brání okolní materiál, jehož teplota je nižší - vzniká teplotní napjatost [10]. Obecně lze říci, že teplotní zatížení válce je způsobeno velkými gradienty teploty na povrchu válce. Válec je ohříván od provalku s teplotou přes 1000 °C. Po průchodu může teplotní gradient dosáhnout hodnot řádu 10^6 K/m . Při takovýchto teplotních rozdílech se vytváří teplotní napětí vlivem rozdílné roztažnosti materiálů. Efekt je ještě násoben závislostí koeficientu teplotní roztažnosti na teplotě, kdy jeho hodnota roste. V povrchové vrstvě nastává napjatost tlakového charakteru.

U tepelného toku od vodního chlazení dochází ke vzniku opačných teplotních gradientů, jeho hodnoty nejsou tak velké. Výsledná napjatost má tahový charakter.



Obr. 2.12: Tepelné toky ve válci

Chlazení vzduchem

Při válcování dochází ve válcovací stolici ke vzniku velmi proměnného prostředí obsahující vodní páru, odraženou vodu, proto je obtížné stanovit odvod tepla vzduchem jako jednoduchou závislost. Vzhledem k malému významu chlazení proudícím vzduchem je uvažováno ideálních prostředí bez přítomnosti vodní páry, odražených kapek nebo konstrukce stolice.

Na volném povrchu působí dvě složky přestupu tepla - konvekční složka a složka radiační. Konvekce je popsána rovnicí pro desku ofukovanou vzduchem obvodovou rychlostí. Odvození jeho velikosti je uvedeno v literatuře [2]. Součinitel přestupu tepla α_k od konvekční složky v závislosti na rychlosti w můžeme zapsat ve zjednodušeném tvaru:

$$\alpha_k = 5.8 + 4.1w \quad (2.12)$$

Radiační složku součinitele přestupu tepla α_r v závislosti na teplotě povrchu je [2]:

$$\alpha_r = \epsilon\sigma(T + T_{okoli})(T^2 + T_{okoli}^2) \quad (2.13)$$

V okolí válcovací mezery dochází při přítomnosti rozžhavenému železa k tepelným tokům do válcea vlivem radiace. Maximální velikost součinitele přestupu tepla od této složky můžeme zjistit z rovnice (2.13). Tato hodnota se zmenšuje s rostoucí vzdáleností od válcovací mezery vlivem změny úhlového součinitele a vzdálenosti [2].

3 Metodika řešení

Pro řešení problému byla použita výpočtová metoda modelování pomocí metody konečných prvků (MKP). Pro řešení úloh pomocí MKP existuje spousta úspěšných systémů jako je ANSYS, ABAQUS, COSMOS, NASTRAN aj.. Jako vhodný simulační systém se jevil prostředí ANSYS dostupný ve škole v akademické licenci.

Zvolený simulační nástroj poskytuje prostředky pro řešení termální i strukturní úlohy a jejich vzájemnou kombinaci, obsahuje prvky pro řešení nelineárních úloh a disponuje také vlastním skriptovacím jazykem APDL pro vytvoření parametrického modelu. Výpočty byly spuštěny na počítači s procesorem Intel Core 2 Quad Q6700 s 2GB operační pamětí.

Před zahájením tvorby modelu byly vzneseny některé požadavky, které musel výsledný model splňovat:

- výpočet teplotního pole v povrchové vrstvě
- výpočet napjatosti v povrchové vrstvě
- aplikace nelineárním model materiálu válce
- aplikace okrajové podmínky získané z měření
- simulace delší doby válcování - stovky otáček válce
- simulovat celý průchod sochoru s proměnlivými okrajovými podmínkami při různých úběrech

3.1 Vytvoření výpočtového modelu modelu

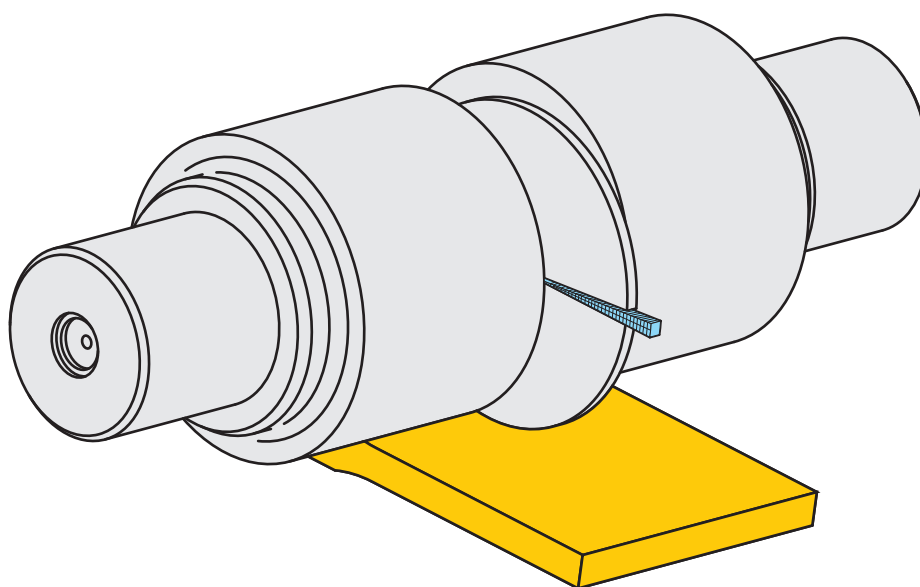
3.1.1 Model geometrie

Geometrie válce je ve své podstatě velmi jednoduchá, skládá se z cylindrické pracovní části a dvou konců pro uchycení v rámu stolice. Při řešení úlohy s úplnou geometrií válce jsou, s ohledem na požadavek řešení napjatosti jen v povrchové vrstvě, výsledky v oblasti uchycení nepodstatné. Proto první návrh spočíval jen v modelování pracovní středové části a aplikováním vhodných okrajových podmínek.

Při tvorbě modelu musely být brány ohledy také na výše vypsane požadavky. Omezujícím prvkem bylo řešení napjatosti v dlouhém časovém úseku. Modelováním celého válce a následnou simulací by byl výpočet časově velmi náročný.

Prvním krokem proto bylo omezit velikost geometrie zavedením některých omezení a předpokladů:

1. v modelu budeme sletovat teplotní pole jen v polovině délky válce. Nebudeme analyzovat přechod mezi povrchem válce v kontaktu s válcovaným materiálem a povrchem bez kontaktu (v axiálním směru). Změnu tepelného toku v tomto směru předpokládáme pozvolnou.
2. tepelný tok podél osy válce a v obvodovém směru je v porovnání s dominantním tokem v radiálním směru malý proto v modelu lze tyto tepelné toky zanedbat.
3. teplotní pole a napjatost v těle válce jsou rotačně symetrické, pouze na povrchu se vyskytují lokální špičky



Obr. 3.1: Geometrie modelu

Na základě těchto předpokladů byl vytvořen zjednodušený geometrický model. Pro výpočet teplotního pole by stačil 2D model v podobě kruhové výseče s malým úhlem. Pro výpočet napjetí v povrchových vrstvách musel být vytvořen 3D model. Pro omezení deformací povrchu v axiálním směru jako reakce okolního materiálu je posuv možný jen při zachování rovinnosti příčného průřezu. Deformace v obvodovém směru jsou omezeny. Tepelné toky v obvodové a axiálním směru jsou nulové.

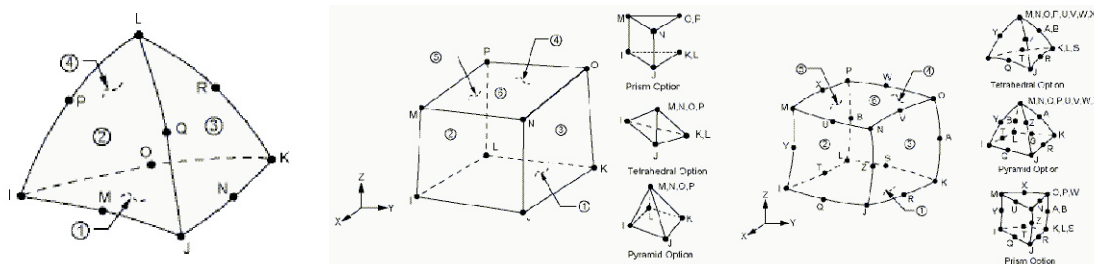
Výsledný model představuje kruhovou výseč o velikosti středového úhlu 1° s tloušťkou rovnající se velikosti elementu použitým pro povrch válce.

3.1.2 Konečnoprvkový model

Při řešení teplotní napjatosti vycházíme ze skutečností, že se jedná o slabě sduženou teplotně deformační úlohu, kdy teplotní pole odviňuje deformaci, ale ne naopak. Při

řešení této úlohy můžeme napřed vyřešit teplotní pole v tělese a následně vypočítat napjatost a deformaci tělesa. K tomu s výhodou využijeme stejnou síť, kdy máme jednoduchý přenos výsledků z jedné úlohy do druhé.

ANSYS nabízí pro řešení prostorových teplotních úloh několik prvků. Základním prvkem je šestistěn s osmi uzly SOLID70, jeho rozšířenou variantu 20 uzlový SOLID90. Čtyřstěnnou variantu představuje 10 uzlový SOLID87.



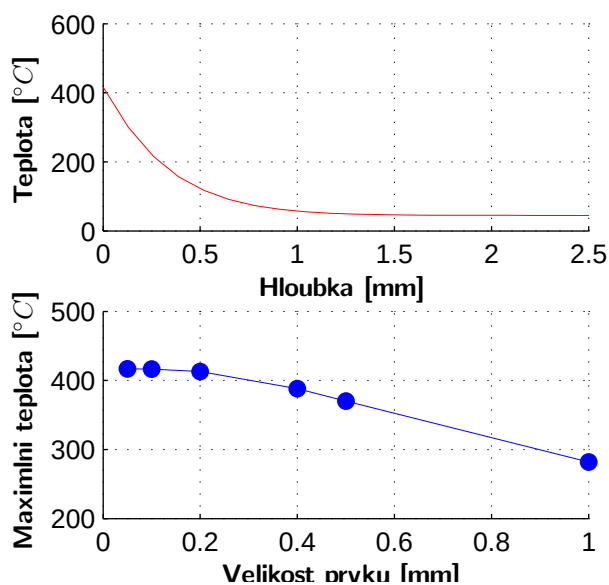
Obr. 3.2: Základní 3D prvky pro teplotní úlohy SOLID87, SOLID70, SOLID90

Pro model byl zvolen prvek SOLID70, jeho protějšek pro pevnostní výpočet pak prvek SOLID185.

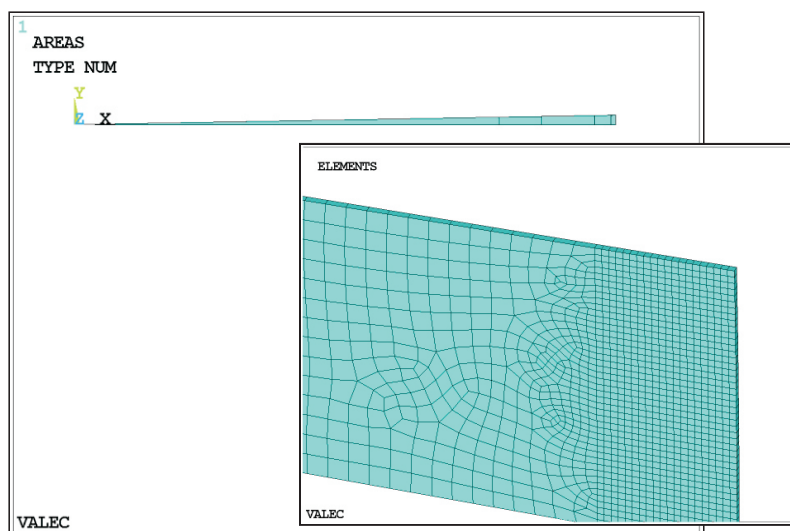
- **SOLID70** - Prvek je tvořen šesti uzly s jedním stupněm volnosti v uzlu (teplota). Je určen pro prostorové statické nebo přechodové teplotní analýzy. Umožňuje aplikaci nelineárních modelů materiálů. Zobrazení šestistěnné varianty a jeho degenerovaných tvarů na obr. 3.2 [6].
- **SOLID185** - Prvek je tvořen šesti uzly se třemi stupni volnosti v uzlu (posuvy v osách x,y,z). Je určen pro napjatostní analýzu. Umožňuje aplikovat elastické, plastické, hyperplastické modely materiálu; modely pro velké deformace, s creepovým chováním [6].

Základ při vytváření sítě bylo zvolit vhodnou velikost prvku na povrchu tělesa. Velké cyklické změny teploty se projevují jen v malé hloubce od povrchu. Vhodnou kombinací velikosti prvku v povrchové vrstvě můžeme snížit požadavky na výpočetní čas a paměťovou kapacitu. Na základě několika testů byla vhodná velikost prvku stanovena na 0.1 mm. Při testech byly zkoumány hodnoty špičkové teploty na jedné otáčce a pokles teploty v závislosti na hloubce (obr. 3.3). Vrchní vrstvu válce o tloušťce 2 mm pak tvoří prvky s velikostí 0.1 mm vytvořené jako mapovaná síť. Její ukázka je zobrazena na obrázku 3.4.

Zbýlá síť je tvořena jednou vrstvou prvků o velikosti od 1 do 5 mm. Výsledný konečnoprvkový model obsahuje 3584 uzlů a 1428 prvků.



Obr. 3.3: Průběh teploty v závislosti na hloubce; Závislost špičkové teploty po jedné otáčce na velikosti prvku



Obr. 3.4: Geometrie modelu, ukázka sítě

3.1.3 Model materiálu

Použité prvky umožňují aplikovat nelineární modely materiálu. Pro teplotní úlohu byly charakteristiky tepelné kapacity, tepelné vodivosti, specifického tepla a hustoty zadány jako teplotně závislé.

Pro deformačně napěťovou část výpočtu je jako nelineární model materiálu použita bilineární aproximace pracovního diagramu. Dle doporučení manuálu ANSYSu je aplikován bilineární kinematický zpevnňující materiál. Zadání vyžaduje znalost modulu pružnosti, meze kluzu a modulu zpevnění. Pro výpočet teplotní napjatosti je v modelu zahrnuta také teplotní roztažnost v závislosti na teplotě.

Pro výpočet je použit materiál měřeného válce. Podle výrobního protokolu je válec vyroben z litiny. V podrobnějším složení materiálu bylo uvedené následující:

Prvek	rozsah složení [%]	měřený válec [%]
C	2,6 - 3,2	3,0
Si	0,3 - 1,0	0,94
Mn	0,4 - 0,9	0,68
P	max 0,5	0,14
S	max 0,1	0,02
Cr	0,6 - 1,2	1,18
Ni	3,0 - 4,0	3,97
Mo	0,1 - 0,5	0,39

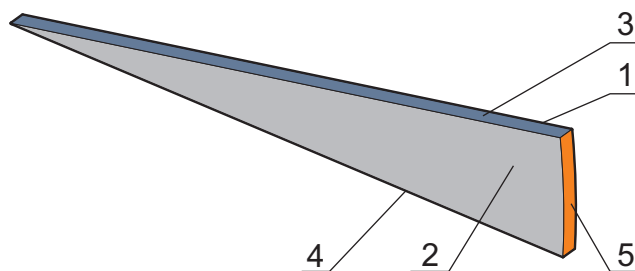
Tepelné vlastnosti tohoto materiálu nebyly k dispozici, proto byly hodnoty převzaty pro materiál s podobným složením. Přitom byly porovnávány hlavně hodnoty složek C, Cr. Z dostupných charakteristik nejlépe vyhovoval materiál 42 2456.

Hodnoty pro napjatostní výpočet - modul pružnosti v tahu, mez kluzu, modul zpevnění a poissonův poměr jsou uvedeny v příloze. Hodnoty jsou různé pro poružené modely materiálu. **Material_01** vychází z oceli s 3% chromu. **Material_03** z oceli 65Ch 3MWA používanou na opěrné válce.

3.1.4 Model vazeb

Vazby v modelu umožňují vytvořit model méně objemný při zachycení obdobného stavu napjatost v povrchové vrstvě jako při plném modelu. Popis je uveden v kapitole 3.1. Realizace v ANSYSu je následující:

- plocha 1 - aplikováno omezení posuvů v ose z .
- plocha 2 - posuv uzlů této plochy v ose z je vzájemně svázán pomocí funkce **Couple DOFs**
- plocha 3,4 - na těchto plochách je omezen posuv ve směru normály pomocí symetrie.

Obr. 3.5: *Schéma aplikace vazeb*

3.1.5 Model zatížení

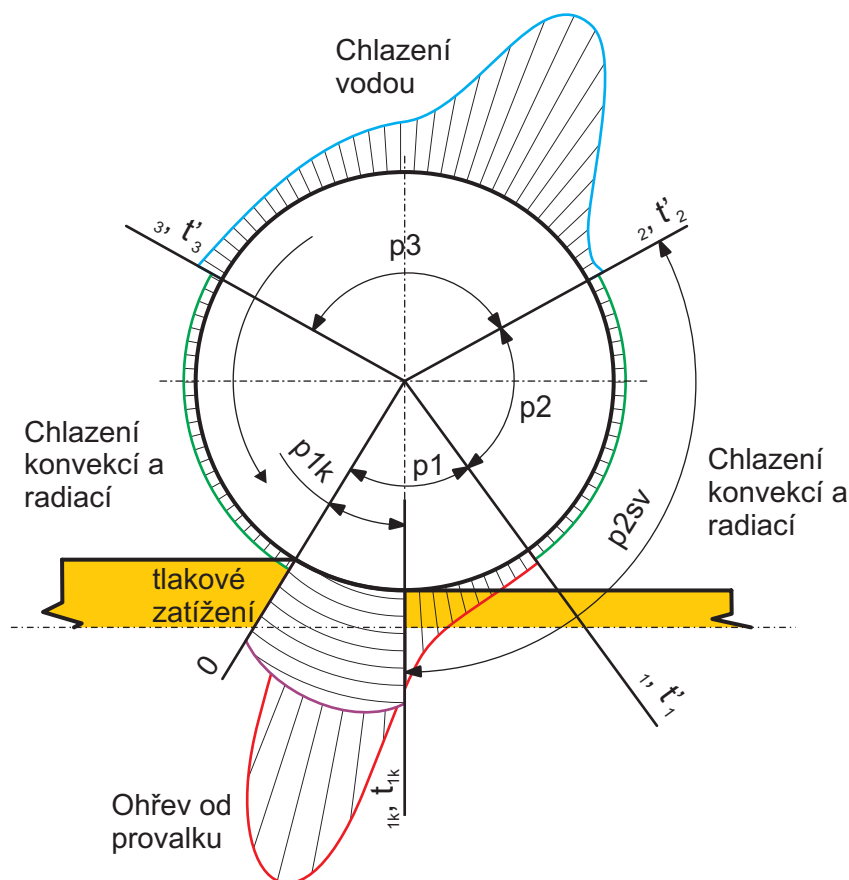
Pro simulaci bylo vytvořeno několik schémat založených na měřené kampani popsané v kapitole 4. Z měření byly převzaty úběry, válcovací síly a tepelné přestupy do válce. Simulační válec je chlazen jedním kolektorem na výstupní straně a válcovací stolice je bez opěrných válců.

Zatěžující okrajové podmínky jsou na model aplikovány jako plošné zatížení na plochu 5 zobrazenou na schématu (obr. 3.5). Tato plocha představuje malý úsek povrchu válce. Pro simulaci otáčení válce jsou zatížení zadány pomocí tabulky jako funkce času (teploty). Tímto způsobem by bylo možno zadat celé zatížení válce v jedné otáčce pomocí jednoho zátěžného kroku. Pro lepší kontrolu nad časovým krokem při řešení a lepší modularitu je jedna otáčka válce rozdělena do čtyř zátěžných kroků.

Prvním krokem výpočtu je výpočet teplotního pole v modelu válce. Při této úloze jsou na povrch válce aplikovány zatížení definované v proměnných :

- tepelný tok od provalku do válce - tabulka **PROVALEK** jako funkce času. Výsledky z měření na válcovací stolici 4.1.
- chlazení vzduchem jako součinitel přestupu tepla - funkce **HTC_VZDUCH** závislá na povrchové teplotě. Kombinace konvekční a radiační složky popsanou rovnicemi (2.13),(2.12) odvozené v kapitole zatížení válce.
- chlazení vodou - tabulka **VODA** jako funkce času. Výsledky měření v laboratoři 4.2.

Pro vlastní výpočet byl vytvořen skript pomocí jazyka APDL umožňující aplikovat různé zatěžující scénáře. Skript je rozdělen do oddělených bloků umožňující jednoduchým nastavením aplikovat na model jiné podmínky při válcování. Pomocí smyček ***DO** ***ENDDO** se opakovaně aplikuje okrajové podmínky na povrch válce. Pro simulaci celé válcovací kampaně výpočtový skript navíc obsahuje smyčku pro průchod více provalku a ***IF** sekci pro výběr vhodné okrajové podmínky podle aktuálního průchodu. Výsledky teplotního výpočtu jsou ukládány ve všech časových krocích.



Obr. 3.6: Aplikování okrajových podmínek na povrch válce

Pro navazující statický výpočet obsahuje smyčka teplotní úlohy také vytváření požadovaných časů pro řešení napjatostí. V každém zatěžujícím kroku jsou do proměnné `casy_pst` uloženy požadované časy pro výpočet napjatosti - krok je rozdělen podle nastaveného dělení. Tím můžeme v každém zatěžujícím kroku určit optimální počet následujících statických výpočtů.

Silové zatížení ve válcovací mezeře

Na válec ve válcovací mezeře působí tangenciální a normálové tlaky. Odvození jejich velikosti je popsáno v kapitole zatížení válce (kapitola 2.3.1). Při válcování pro experiment byl poměr délky záběrného oblouku l_d a střední tloušťka materiálu h_s vždy menší než 2 můžeme použít odvozené rovnice pro průběh normálového a tečného napětí (2.11) (2.9).

Pro zjednodušení modelu bylo vypuštěno tečné napětí a aplikováno na model jen normálové napětí. Jako jeho velikost byly brána hodnota změřená na válcovací

stolici. Tato hodnota představuje střední měrný tlak na válce vypočteny z normálového a tečné složky jejich promítnutím do směru y .

Tímto zjednodušením jsme s dopustili jisté chyby ale vzhledem k dominanci teplotní deformace je tato chyba menší než 3%. Vypočtené špičkových radiálních se průměrně pohybují okolo 900MPa, hodnota tečného napětí s extrémními hodnotami na krajích záběrného oblouku $\tau_k = k/2 = 30$ MPa (podle [8] kdy $p = 1.5 \div 1,7k$).

Statický výpočet v ANSYSu je v této úloze úzce svázán s výpočtem teplotního pole. Vzhledem k velkému objemu dat a delší časové náročnosti výpočtu bylo třeba počet výpočtových kroků oproti teplotním redukovat. K tomu byla zavedena proměnná `casy_pst` obsahující časy s požadavkem na výpočet. Pro nalezení nejbližšího času s vypočteným teplotním polem obsahuje skript prohledávání vypočtených teplotních polí.

4 Experimentální zjištění okrajových podmínek

Pro výpočtový model byly jako okrajové podmínky použity hodnoty z měření prováděných Laboratoří přenosu tepla a proudění VUT v Brně ve válcovně Bohumín a na laboratorních zařízeních.

4.1 Měření zatížení při válcování

Měření probíhalo na válcovací stolici typu TRIO ve válcovnách Bohumín. Jedná se o vratnou stolicí s třemi válci používanou pro výrobu pásové oceli. Parametry stolice jsou uvedeny v tabulce A.2. Cílem měření bylo stanovit závislost součinitele přestupu tepla na válcovacím tlaku.



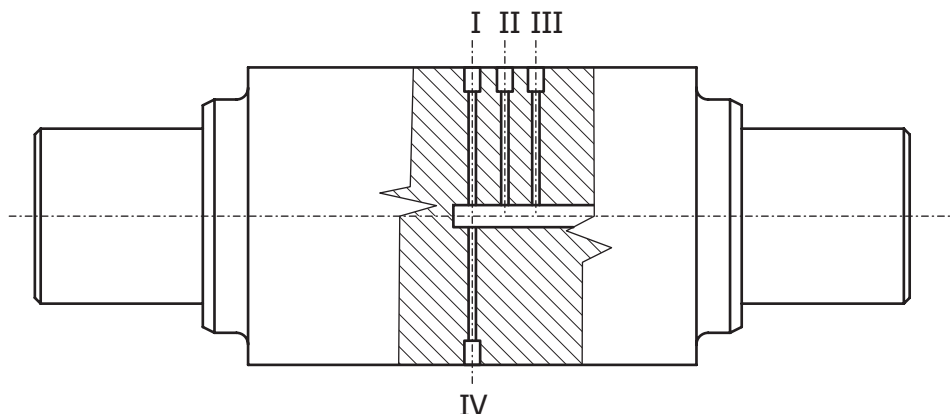
Obr. 4.1: *Měřená válcovací stolice*

Ke stanovení součinitele přestupu tepla mezi válcem a válcovaným materiálem byly měřeny teploty ve válci a pomocí inverzního výpočtu vypočteny součinitele přestupu tepla. Při kampani byly zaznamenány:

- válcovací síly při provozu
- teploty ve válci osazeném termočlánky

4.1.1 Konstrukce měřicího válce

Válcovací stolice obsahuje tři pracovní válce z nichž prostřední je zatížen při obou směrech válcování. Tento válec byl osazen senzory pro měření teploty. K tomu byl použit válec na konci své životnosti upravený pro měření. Válec byl osazen celkem sedmi termočlánky umístěným v různých hloubkách a různých pozicích v celkem čtyřech čidlech. Jejich umístění a parametry ukazuje tabulka 4.1.



Obr. 4.2: Schéma osazení válce termočlánky

K měření teploty byly použity termočlánky typu K od výrobce Omega. Jednalo se o plášťový neuzemněný termočlánek, vnější plášť vyrobený z inconelu měl průměr 0.5 mm. Od výrobce bylo čidlo kalibrováno, absolutní chyba měření je $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ při celém teplotním rozsahu.

Tab. 4.1: Parametry termočlánků

Termočlánek	Hloubka	Čidlo	Pozn.
T1	0.8	I	
T2	1.2	I	
T3	0.4	II	pájené čidlo
T4	0.8	III	
T5	1.2	III	
T6	0.8	IV	
T7	1.2	IV	

Všechny termočlánky mimo T3 byly umístěny v předvrtaných dírách v předem definované hloubce čidla. Kontakt mezi materiálem a termočlánkem zajišťovalo pružné umístění měřicího hrotu v těle čidla. Rozdíl u termočlánek T3 byl v umístění hrotu blíže povrchu - termočlánek byl umístěn v drážce a k čidlu připájen. Pro

dobrou tepelnou vodivost a teplotní odolnost byla použita pájka s vysokým obsahem stříbra (Ag45SN). K upevnění čidla ve válci byl použit dřík se závitem.

Přes svorkovnici byly termočlánky připojeny k dataloggeru, který rotoval spolu s válcem a při měření sloužil jako zapisovač napětí z termočlánků. Při měření byla nastavena vzorkovací frekvence na 360Hz. Rozlišovací schopnost pro měření napětí při této konfiguraci byla $10\text{ }\mu\text{V}$ což je odpovídá rozlišení teploty 0.25°C .



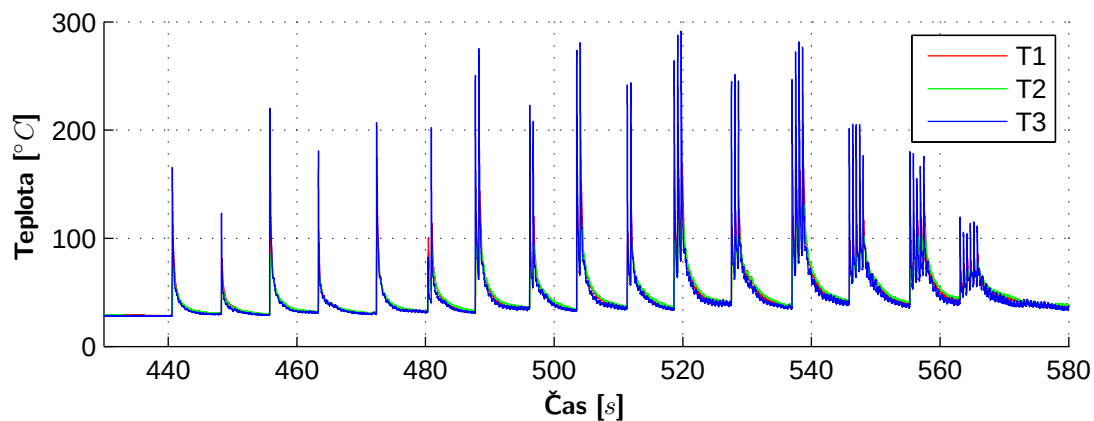
Obr. 4.3: Měřicí válec před osazením čidel

4.1.2 Měření a výsledky

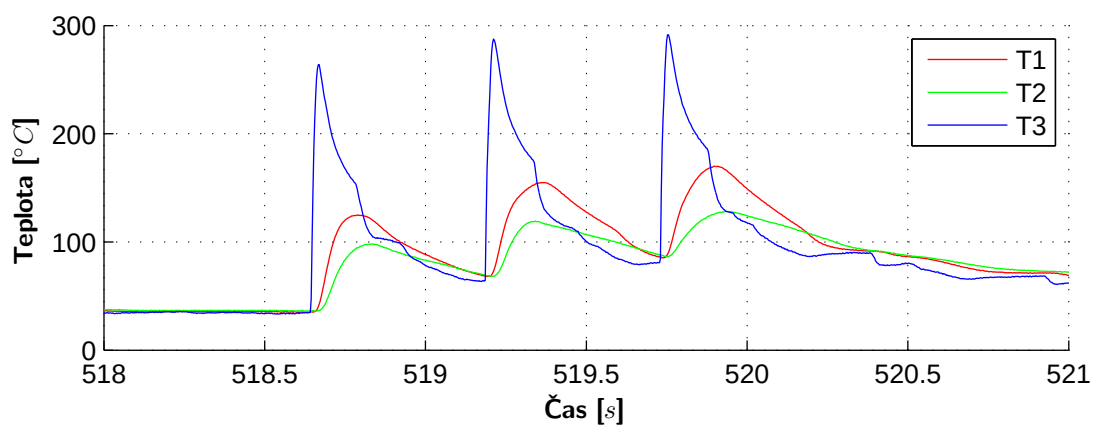
Při vlastním měření při reálném provozu byly získány průběhy teplot v termočláncích T1-T7. Měřená válcovací kampaň byla složena z válcování 18 sochorů. Toto válcování bylo rozděleno na čtyři skupiny z důvodu omezené kapacity paměti dataloggeru. Mezi měřeními bylo kontrolováno opotřebení měřících čidel.

Pro pájené čidlo s termočlánkem T3 byla kontrola obzvláště důležitá. Použitá pájka byla značně tepelně a mechanicky namáhána a po prvním sochoru se natolik poničila, že v následujícím měření dává termočlánek T3 zkreslená data. Důvod pro použití termočlánku s pájeným čidlem byla jeho vysoká rychlost v porovnání s ostatními termočlánci.

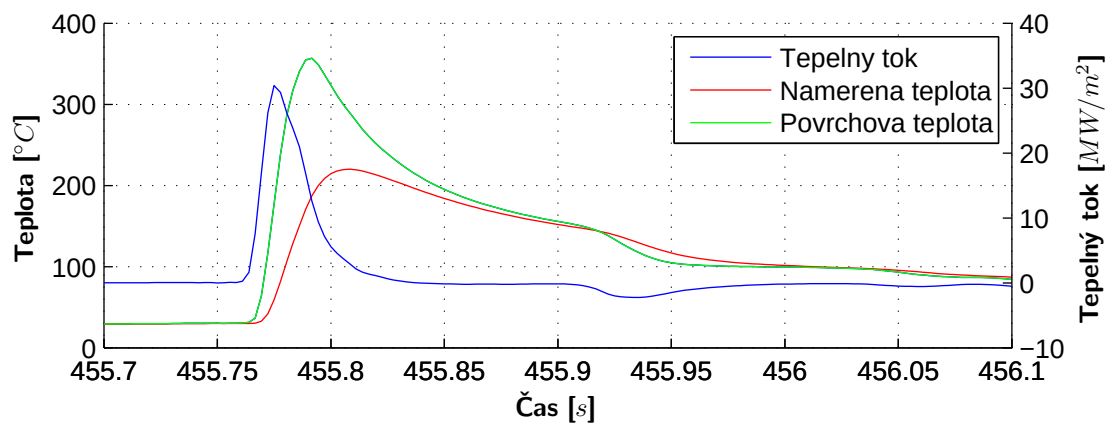
Při válcování jednoho sochoru dochází k 17 průchodům válcovací stolicí. Při každém průchodu dochází k úběr podle úběrového plánu. Z naměřených teplot byly inverzní metodou vypočteny hodnoty tepelného toku, součinitele přestupu tepla a povrchové teploty. Do výpočtového modelu byla použita data z rychlého termočlánku T3, která by měla nejlépe ukázat špičkové hodnoty napětí. Ukázka vypočtených hodnot tepelného toku a odpovídajících teplot jsou ukázány na obrázku 4.6.



Obr. 4.4: Ukázka průběhů teplot pro první sochor



Obr. 4.5: Srovnání rychlosti odezvy termočlánků



Obr. 4.6: Ukázky tepelných toků a teplot pro T3

Pro měření síly byly využity vnitřní senzory zabudované v systému řízení válcovací stolice. Síly jsou měřeny zvlášť na pravém a levém stojanu stolice. Získaný válcovací tlak v mezeře je průměrný tlak vypočtený ze změřených sil a plochy kontaktu válce s materiálem zjištěného z úběrového plánu. Tlaky při válcování prvního sochoru pro všech 17 průchodů spolu se silami a teplotami provalků jsou uvedeny v tabulce A.1 uvedené v příloze.

4.2 Měření chlazení válce

Měření tepelných účinků chlazení bylo prováděno zvlášť v laboratoři. Primární účelem tohoto měření bylo stanovit intenzitu chlazení současného ostříku a navrhnout nový chladicí kolektor.

Testovaný kolektor obsahuje řadu kuželových trysek s úhlem kužele 45° s roztečí mezi tryskami 100 mm. Kolektor byl umístěn do stejné pozice, jako ve stolici, kdy osa trysek směřuje do osy válce a vzdálenost mezi povrchem válce a tryskou je 100 mm.



Obr. 4.7: Měřicí válec s osazeným chlazením

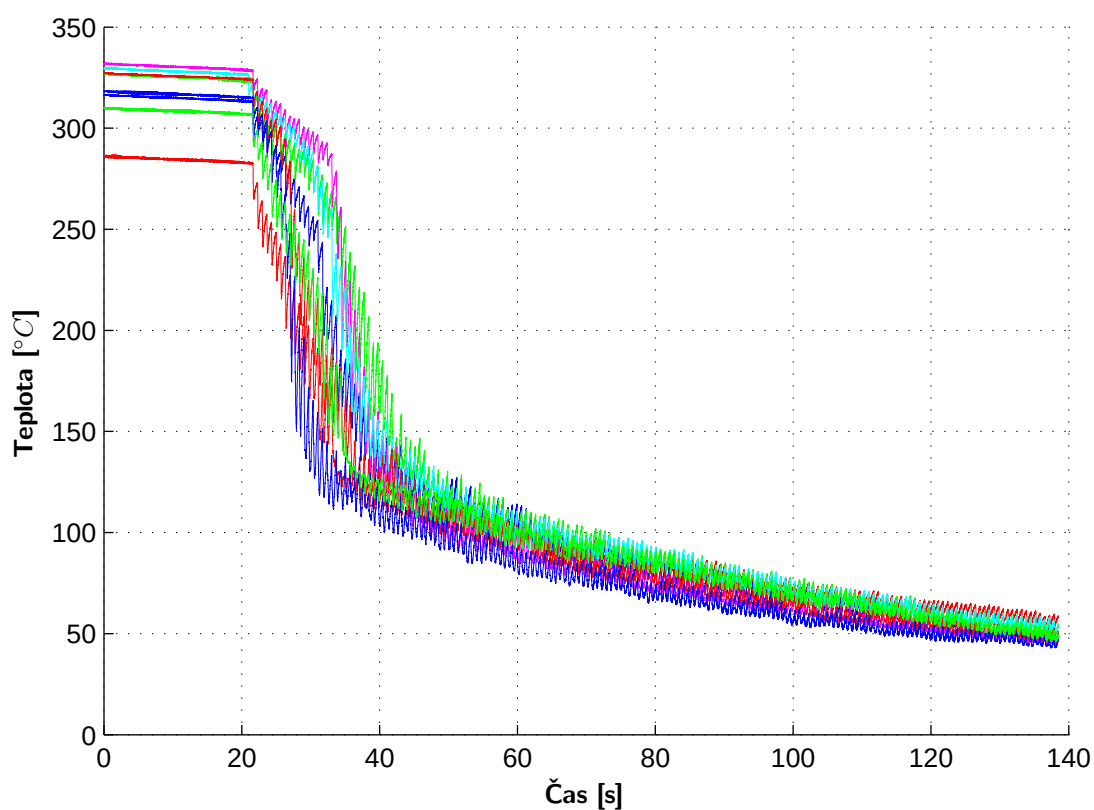
Měřicí válec je osazen osmi senzory s termočlánky umístěné v drážkách v houbce 0.4mm a zapájené stříbrnou pájkou (Ag45SN). Pro měření homogenity chlazení podél osy válce jsou senzory umístěny v linii rovnoběžné s osou válce a roztečí 55 mm. Přes svorkovnici jsou termočlánky připojeny k dataloggeru, který se otáčí spolu s válcem a při měření slouží jako zapisovač napětí z termočlánků. Při měření je nastavena vzorkovací frekvence na 360Hz. Rozlišovací schopnost pro měření napětí při této konfiguraci byla $10 \mu\text{V}$ což je odpovídá rozlišení teploty 0.25°C .

Pro zjištění uhlu natočení válce vůči kolektoru je měřicí válec osazen absolutním snímačem uhlového natočení.

Tab. 4.2: *Tabulka experimentů*

Experiment	Tlak vody [bar]	Průtok vody na trysku [l/s]	Vzdálenost od povrchu [mm]
B1	0.7	0.41	100
B2	4	0.69	100

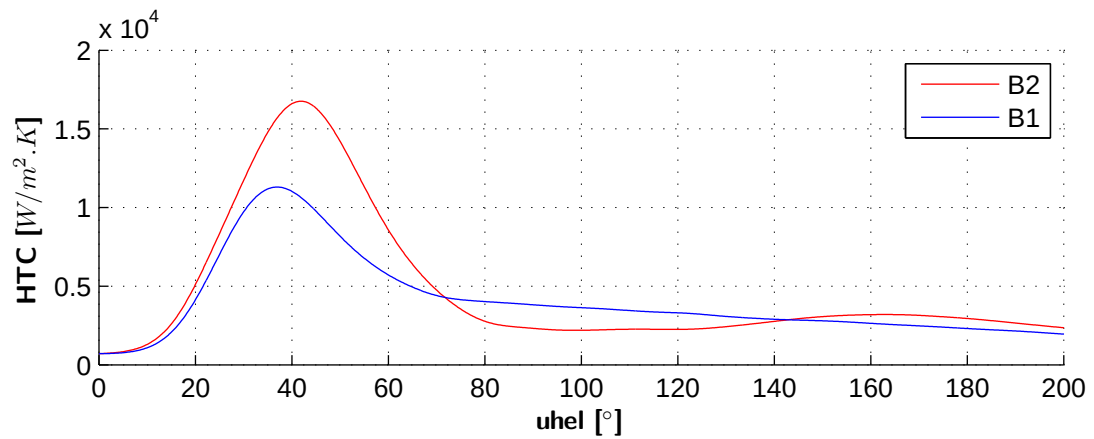
Před měřením je měřicí válec zahřát na počáteční teplotu 300°C . Válec je při zavřeném deflektoru roztočen na požadovanou obvodovou rychlost 3 ms^{-1} a je zapnuto chlazení. Po vyrovnaní rychlosti a tlaku v kolektoru je otevřen deflektor a voda začne ochlazuje měřicí válec.

Obr. 4.8: *Změřené průběhy teplot*

Z naměřených poklesů teploty byly vypočítány tepelného toku a hodnoty součinitele přestupu tepla od chladicího kolektoru.

Při vyhodnocení byly získány dva průběhy tepelného toku na obvodu hodnoty nad a pod Leidenfrostovou teplotou. Při této teplotě se výrazně mění charakter chlazení, zaniká parní vrstva bránící styku chladicí tekutiny a povrch. Rozdíl ve

výsledku u experimentu B2 není výrazný, vzhledem k vyššímu tlaku v trysce. V konfiguraci B2 je nárůst intenzity chlazení v teplotách pod Leidenfrostem v průměrné hodnotě okolo 20 %.



Obr. 4.9: Hodnoty koeficientu přestupu tepla při experimentech B1, B2 pro teploty pod Leidenfrostem

5 Výpočtová simulace

Vytvořený výpočtový model představuje prostředek pro stanovení povrchové napjatosti na válci. Umožňuje do modelu modulárně přidávat další kolektory nebo kontakty s opěrným válcem. Pro demonstraci modelu bylo vytvořeno několik simulací vycházejících z reálných válcovacích kampaní.

Pro výpočet byly vytvořeny celkem tři schémata válcování. Ty byly dále modifikovány do několika variant.

1. **S01** - Z měřené válcovací stolice je vybrán jeden průchod a ten opakovaně aplikován na válec.
2. **S02** - Válcovací kampaň založená na reálné kampani při experimentu. Jsou simulovány všechny úběry podle skutečné kampaně, k tomu jsou aplikovány odpovídající okrajové podmínky.
3. **S03** - Vygenerované okrajové podmínky pro studium vlivu polohy a rovnovážné teploty na výslednou napjatost.

5.1 Popis výpočtů

5.1.1 S01 - Jeden úběr

Schéma vychází z válcování na válcovací trati. Z naměřených hodnot je vybrán jeden průchod, kterým je následně opakovaně zatěžován výpočtový model. Podobné zatížení je při válcování na válcovací trati, kdy provalek prochází postupně několika stolicemi jedním směrem. Válce jsou nastavené na konstantní velikost válcovací mezery.

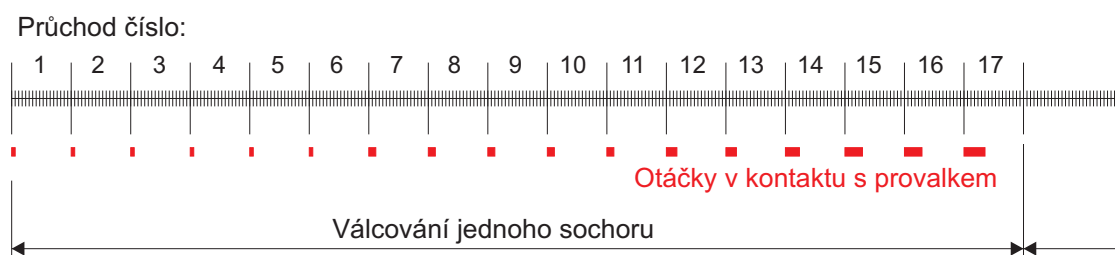
Tab. 5.1: *Varianty schématu S01*

Varianta	Válcovací mezera		Chlazení		Počáteční teplota válce [$^{\circ}\text{C}$]
	Tepelný tok - exp.	tlak [MPa]	Chlazení vodou - exp.	Poloha kolektoru, úhel [$^{\circ}$]	
1	11. průchod	86	B1	15	40
2	11. průchod	86	B2	15	40
3	11. průchod	86	B1	60	40
4	11. průchod	86	B2	60	40

Pro simulaci byl vybrán 11. průchod měřené kampaně, velikost jeho špičkového tepelného toku dosahuje 80 MW/m^2 což je okolo průměrné hodnoty z měření. Parametry pro průchod jsou uvedeny v tabulce 5.3. Válec je 2 otáčky v kontaktu s provalkem a 14 otáček mimo kontakt. Chlazení je zadáno pomocí součinitele přestupu tepla změřené laboratorně (obr. 4.9). Jako model materiálu byl použit `Material_01` uvedený v příloze A.3.

5.1.2 S02 - Válcovací kampaň

Toto schéma je založeno na reálné kampani při experimentálním měření. Její časové schéma (obr. 5.1) je zjednodušeno oproti experimentu; základní časovou jednotkou kampaně je jedna otáčka válce. Předpokládá se, že všechny operace jsou násobky této základní jednotky. Průměrný počet otáček mezi vstupy sousedních provalků do stolice je 16. V tomto časovém intervalu je počet otáček v kontaktu s provalkem a bez kontaktu stanoven podle naměřených teplot a závisí na aktuální délce provalku.

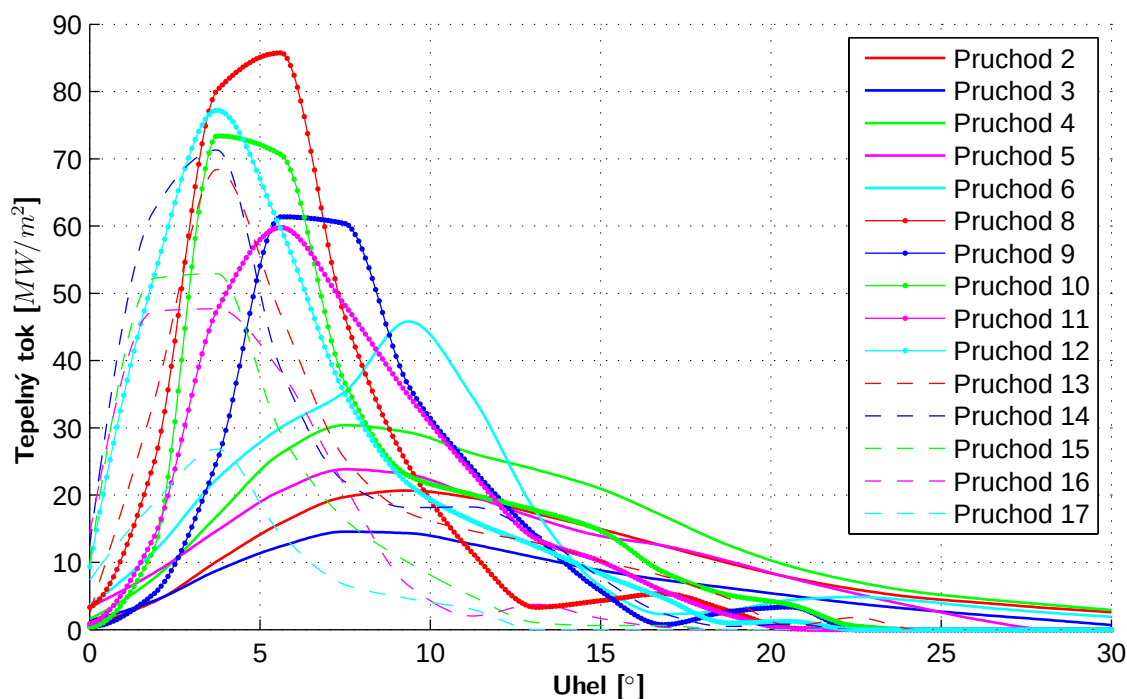


Obr. 5.1: Časové schéma kampaně

Mezi jednotlivými sochory je stanovena průměrná prodleva na 120 otáček. Pro přepočet na časové údaje se vychází z obvodové rychlosti válce, která byla v průběhu válcování průměrně 3 m/s . Doba jedné otáčky při průměru válce 0.51 m je přibližně 0.53 s .

Jako okrajové podmínky ve válcovací mezeře jsou na model aplikovány výsledky z měření. Vypočtené tepelné toky do válce, jako funkce úhlu, jsou zobrazeny na obrázku 5.2. Tyto hodnoty jsou součtem toků mezi válcovaným materiálem a válcem a radiací v blízkém okolí válcovací mezery. Výsledkem toho je, že zaujímají větší rozsah než je teoretický záběrný úhel. Schematicky je rozsah tepelného toku ve válcovací mezeře aplikovaný na model zobrazen na obr. 3.6, ve výpočtovém skriptu je omezen pomocí proměnné `P1`.

Tlakové zatížení je na model aplikováno v rozsahu teoretického záběrného úhlu α . Velikost tlaku je vypočtena na základě změřených válcovacích sil. Podrobný rozpis zatížení ve válcovací mezeře pro jednotlivé průchody je zobrazen v tabulce 5.3.



Obr. 5.2: Tepelné toky ve válcovací mezeře

Měřená válcovací stolice je typu trio, kdy je střední válec v kontaktu s válcovaným materiálem při všech průjezdech. Chlazení středního válce je obvykle zajištěno dvojicí kolektorů umístěných tak, aby vždy bylo zajištěno chlazení na výstupní straně stolice při obou směrech průchodu válcovaného materiálu. Modelovaná kampaň obsahuje jen jeden kolektor na výstupní straně stolice. Chlazení je zadáno pomocí součinitele přestupu tepla změřeném laboratorně (obr. 4.9). V mezeře mezi sochory je chlazení vodou vypnuto, válec je ochlazován pouze proudícím vzduchem.

Tab. 5.2: Varianty schématu S02

Varianta	Válcovací mezera		Chlazení		Počáteční teplota válce [$^{\circ}C$]
	Tepelný tok - exp.	tlak [MPa]	Chlazení vodou - exp.	Poloha kolektoru, úhel [$^{\circ}$]	
1	dle průchodu		B1	30	45
2	dle průchodu		B2	30	45

Jako model materiálu byl použit `Material_01` uvedený v příloze (tab. A.3).

Vlastní výpočet byl rozdělen pro dlouhou časovou náročnost na dvě etapy. Při prvním výpočtu bylo přepočítáno teplotní pole po válcování pěti sochorů. Následný výpočet použil tyto teploty jako inicializační hodnoty modelu. Celkem bylo spočítáno válcování sedmi sochorů: 5x teploty, 2x teploty a napětí.

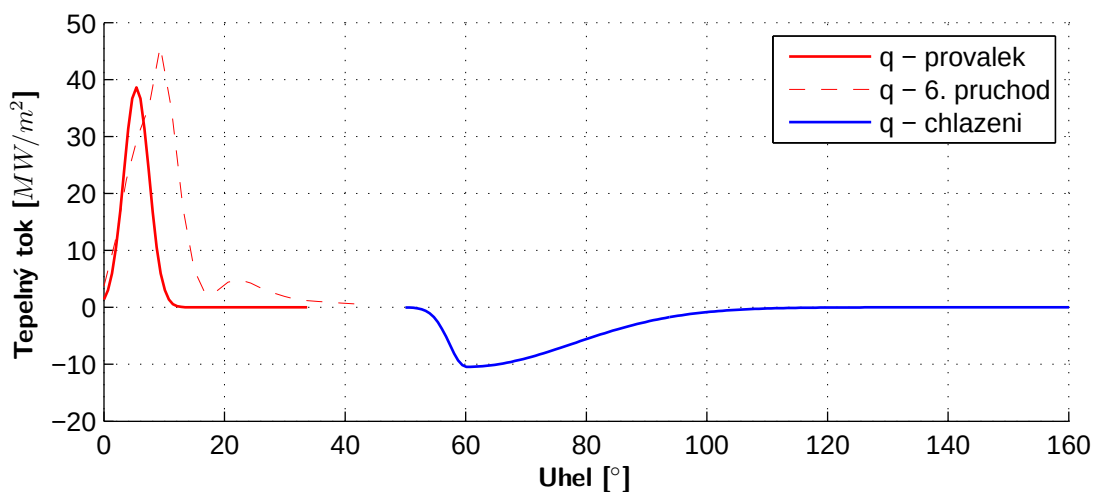
Tab. 5.3: *Parametry zatížení ve válcovací mezeře při simulaci celé kampaně*

Průchod	rozsah v ANSYSu [°]	Teor. úhel [°]	úběr [mm]	tlak [MPa]	počet otáček v kontaktu
1	30	11.36	10	60	1
2	30	11.36	10	56	1
3	30	11.36	10	74	1
4	30	11.36	10	69	1
5	30	11.36	10	72	1
6	30	11.36	10	75	1
7	30	11.36	10	92	2
8	20	11.36	10	86	2
9	20	11.36	10	104	2
10	20	11.36	10	99	2
11	20	11.36	10	125	2
12	20	10.78	9	121	3
13	20	10.78	9	148	3
14	10	8.80	6	138	4
15	10	7.18	4	135	5
16	10	5.08	2	139	5
17	7	3.59	1	147	6

5.1.3 S03 - Generované zatížení

Pro zjištění vlivu polohy kolektoru a teploty válce na výsledný stav napjatosti v povrchové vrstvě byla vytvořena umělá válcovací kampaň. Jako zatížení byly vygenerovány teplotní okrajové podmínky - tepelný tok do válce od provalku a tepelný tok z válce od účinku chlazení. Chlazení vzduchem bylo nulové.

Pomocí MATLABu byly vygenerovány průběhy tepelného toku, ve válcovací mezeře a od chlazení, jako dvě gaussovy křivky se stejným obsahem. Tímto jsme zajistili, že tepelná energie vstupující do válce při kontaktu s válcovaným materiálem je stejná, jako energie jdoucí z válce při chlazení vodou. Suma energie v průběhu jedné otáčky je rovna nule. Teplota válce se nemění. Křivka tepelného toku z provalku byla vytvořena na základě průběhu toku pro 6. úběr experimentální kampaně. Úhel chlazení vodou na válci byl stanoven na 80 °. Jako reakční síla od provalku byl zadán tlak 100 MPa. Úběr při průchodu je 10 mm.



Obr. 5.3: Vygenerované tepelné toky

Modelem materiálu je **Material_03**. Materiál má modul pružnosti nezávislý na teplotě a mez kluzu je u materiálu snížena tak, aby se projevila také plastizace při chlazení v oblasti, kde je v povrchu válce tahové napětí. Ostatní hodnoty pro materiál jsou stejné jako v **Material_01**.

Při simulaci je měněna pozice chlazení a počáteční teplota.

Tab. 5.4: Varianty schématu S03

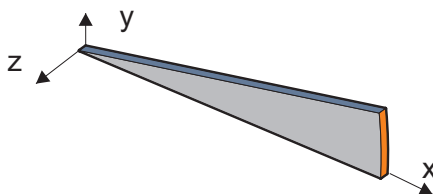
Varianta	Válcovací mezera		Chlazení		Počáteční teplota válce [$^{\circ}C$]
	Tepelný tok - exp.	tlak [MPa]	Chlazení vodou - exp.	Poloha kolektoru, úhel [$^{\circ}$]	
1	gen.	100	gen.	5	30
2	gen.	100	gen.	5	60
3	gen.	100	gen.	5	90
4	gen.	100	gen.	30	30
5	gen.	100	gen.	30	60
6	gen.	100	gen.	30	90
7	gen.	100	gen.	60	30
8	gen.	100	gen.	60	60
9	gen.	100	gen.	60	90
10	gen.	100	gen.	80	60
11	gen.	100	gen.	100	60
12	gen.	100	gen.	120	60

6 Analýza výsledků

6.1 Metodika analýzy

Model je zatěžován cyklicky vlivem otáčení válce a střídavým průchodem válcovací mezerou a chlazením. K posouzení válce z hlediska únavového porušení je třeba stanovit charakter zatěžování - zjistit průběhy napětí, deformace jako funkce času.

Při zatěžování výpočtového modelu vzniká v povrchové vrstvě trojosá napjatost s hlavními osami v obdobných směrech jako má cylindrickým souřadným systémem použitý v modelu ($x, \varphi(y), z$ obr. 6.1). Tento stav neodpovídá napjatosti reálného válce, ale za omezujících předpokladů uvedených v kapitole tvorby modelu, dobře modeluje chování povrchové vrstvy.

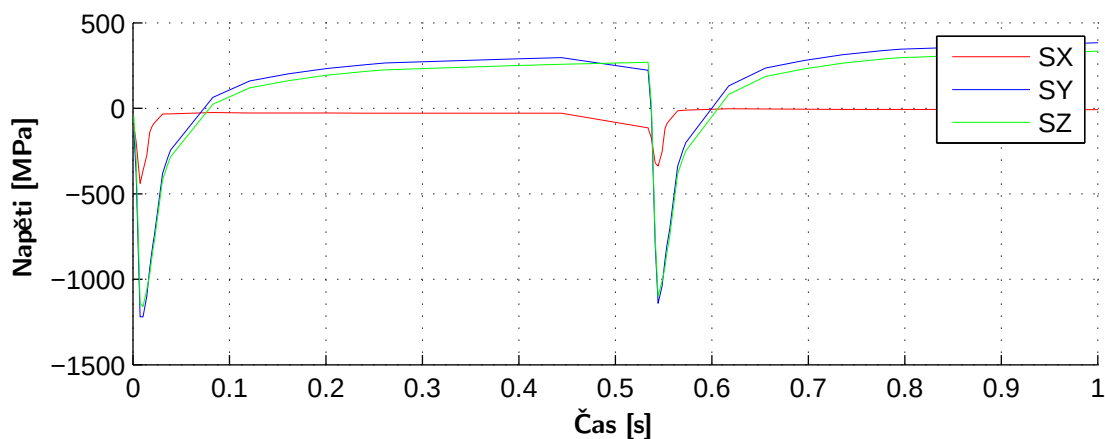
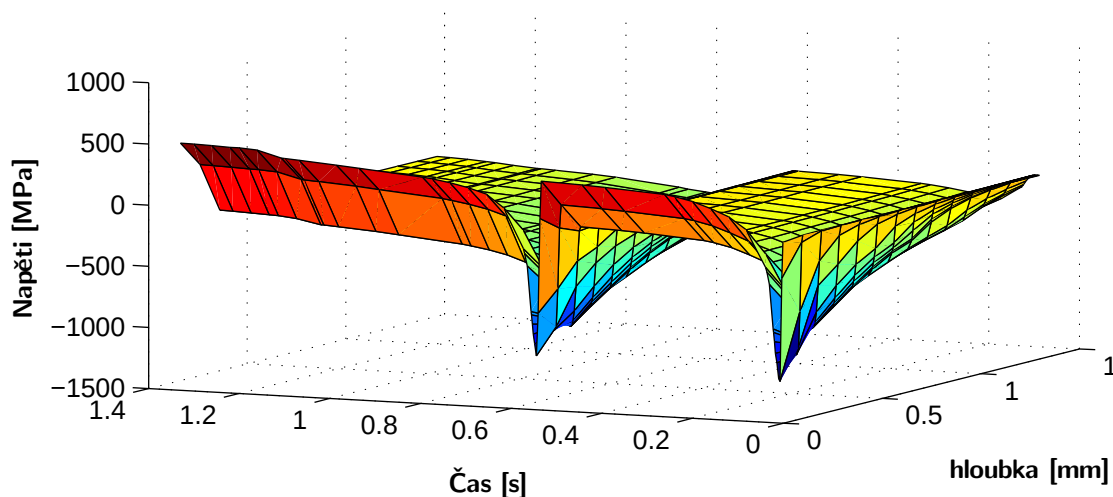


Obr. 6.1: Orientace souřadného systému použitým v modelu

V radiálním směru v ose x , vzniká nejmenší napětí. Je výsledkem zatěžování tlakem od provalku a nerovnoměrného zahřívání vrstev válce. Deformace v osách y, z je způsobená zahříváním povrchu a omezením posuvu od okolního materiálu. Napětí v ose y je oproti ose z větší o dodatečné zatížení od tlaku materiálu ve válcovací mezeře rozložené do tohoto směru.

Při zatěžování jsou špičkové hodnoty napětí na povrchu válce (obr. 6.3), což odpovídá jeho největšímu tepelnému ovlivnění (obr. 6.5). Pro každý výpočet byl vytvořen graf závislosti povrchových napětí v osách x, y, z na čase. S narůstajícím časem, kdy se teplo dostává do spodních vrstev, dochází ke zvýšení napjatosti v podpovrchových vrstvách, hodnoty napětí mohou být větší než u povrchu ve stejném čase. Nedosahuje ale maximálních hodnot na povrchu. Závislost napětí ve směru y na čase a hloubce je zobrazena v obrázku 6.3.

Pro zachycení cyklického charakteru zatěžování jsou do grafu vykresleny napětí v závislosti na přetvoření. Při srovnání různých variant jednoho zátěžného schématu vycházíme z porovnání velikosti plochy hysterezní křivky v ustáleném stavu.

Obr. 6.2: Příklad vypočteného napětí v osách x , y , z Obr. 6.3: Zobrazení napětí ve směru y v závislosti na hloubce a čase

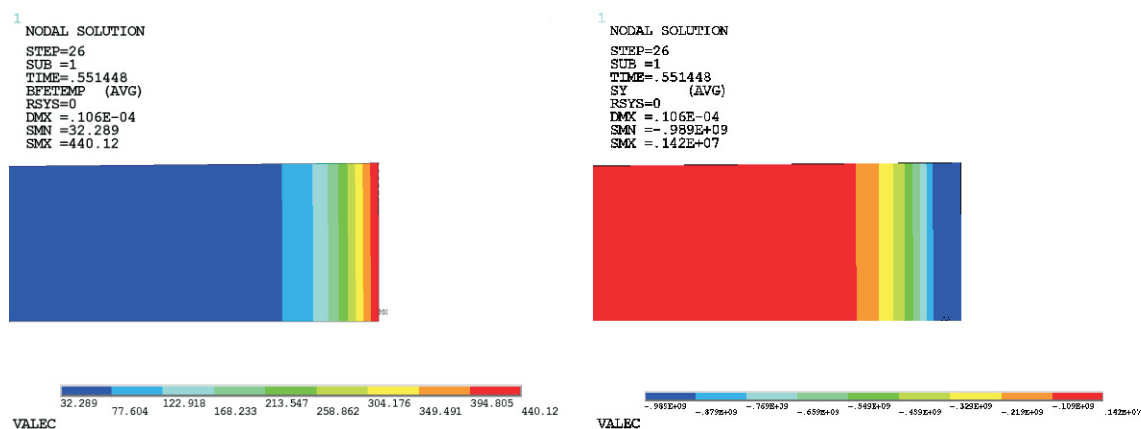
6.2 Výsledky a vyhodnocení simulací

Výsledky práce obsahují vypočtená data pro tři zatěžující schémata a jejich varianty. Výsledky byly vyhodnoceny podle různých kritérií podle typu schématu.

6.2.1 Schéma S01

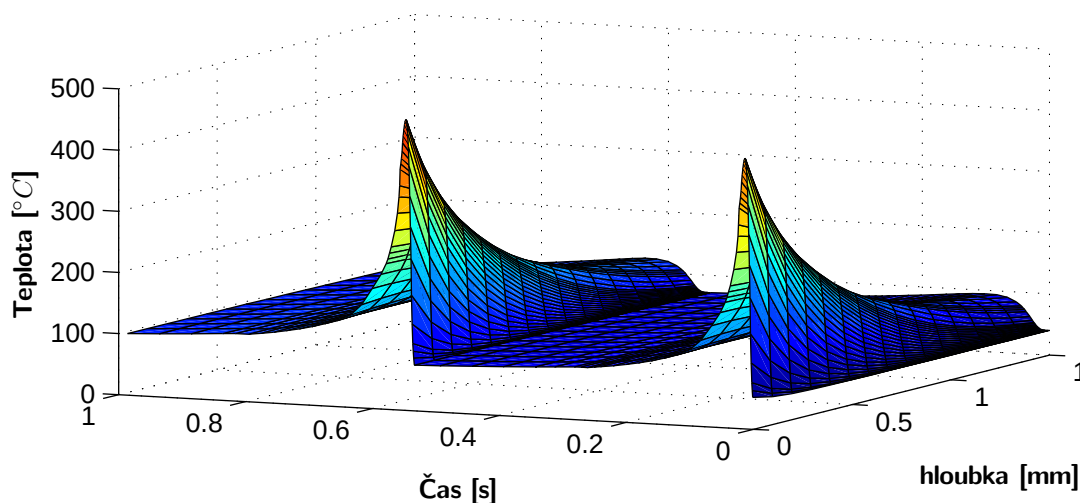
Tento druh zatěžování byl zvolen jako demonstrační příklad. Na průbězích jsou zobrazeny souvislosti vznikající při zatěžování. Srovnáním mezi variantami je okrajově

zkoumán vliv umístění chladicího kolektoru a intenzity chlazení na výsledný průběh teplot a napětí.



Obr. 6.4: Příklad teplotního pole a napětí při kontaktu s provalkem

Výsledky teplotní úlohy potvrzují předpoklad o lokálnosti teplotních špiček jen ve velmi malé vrstvě při povrchu válce. Příčinou je omezená rychlost šíření tepla v materiálu a krátký kontakt s provalkem. Pro kampaň z experimentálního měření je maximální délka kontaktu 0.02 s.



Obr. 6.5: Zobrazení teplot v různých hloubkách v závislosti na čase

Z výsledných grafů napětí je zřejmé, že největší hodnoty způsobuje kontakt válce s provalkem a teplotní deformace povrchu válce v této oblasti. Velikost napětí (deformace) určuje míra tepleného toku z provalku do válce. Na ní má vliv

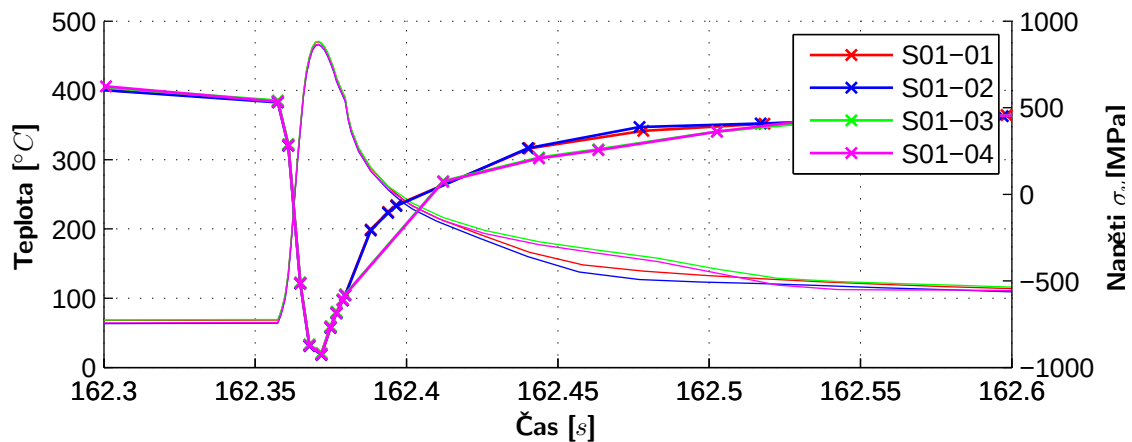
jednak velikost úběru, teplota válcovaného materiálu, válcovací síla, přítomnost maziva, jakost povrchu a další. Při konkrétní válcovací kampani je těžké tuto hodnotu ovlivnit.

Srovnáme-li jednotlivé varianty výpočtu mezi sebou vidíme, že při umístění kolektoru blíže k válcovací mezeře dochází k intenzivnějšímu chlazení vlivem vyšší povrchové teploty. Tepelný tok odebraný z válce je podle Newtonova ochlazovacího zákona roven:

$$q = \alpha(T_p - T_v) \quad (6.1)$$

Zvětšením teplotního rozdílu mezi chladicí vodou a ochlazovaným povrchem, posunem kolektoru blíže k válcovací mezeře, odebíráme z povrchu více tepla a výsledná rovnovážná teplota při válcování je nižší. Při výpočtech dle tohoto schématu není tento rozdíl příliš velký. Před vstupem do válcovací mezery je rozdíl teplot pro chlazení varianty B1 roven 0.6°C , pro chlazení varianty B2 dělá rozdíl 0.9° .

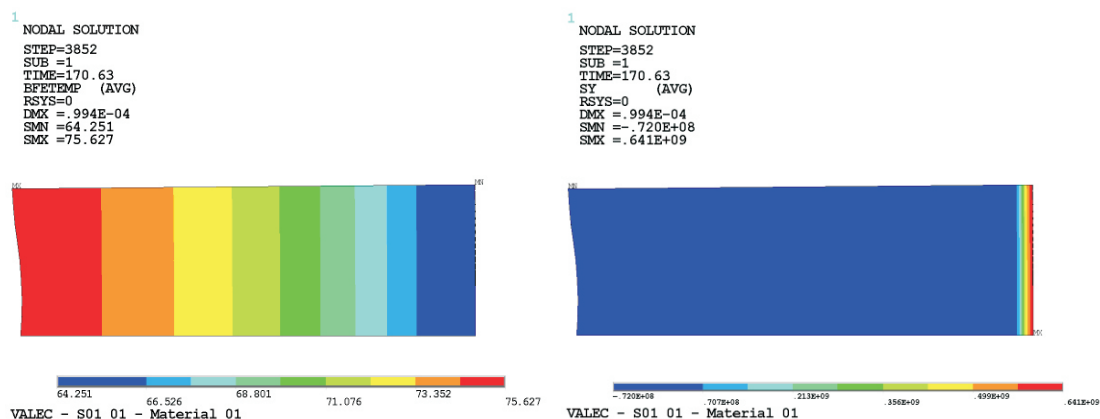
Podstatnější než rovnovážné teploty jsou okamžité teploty na povrchu. Umístěním kolektoru blíže mezeře dochází k větším teplotním poklesům zřetelně patrným z obrázku 6.6. Teploty ve variantě zatížení S01_01 vykazují větší pokles než teploty při jiné poloze stejného kolektoru (varianty S01_02). Rozdíl v poklesech teplot se projeví v průběhu napětí většími hodnotami.



Obr. 6.6: Průběh napětí σ_y a povrchové teploty při posledním průchodu pro jednotlivé varianty

V otáčkách bez kontaktu s provalkem dochází pouze k chlazení povrchu od chladicího kolektoru. Vytváří se podchlazená vrstva. V povrchové vrstvě dochází k pozvolnému nárůstu tahového napětí. Příklad rozložení teplot a napětí po průchodu válce několika otáčkami chlazení je zobrazen na obrázku 6.7.

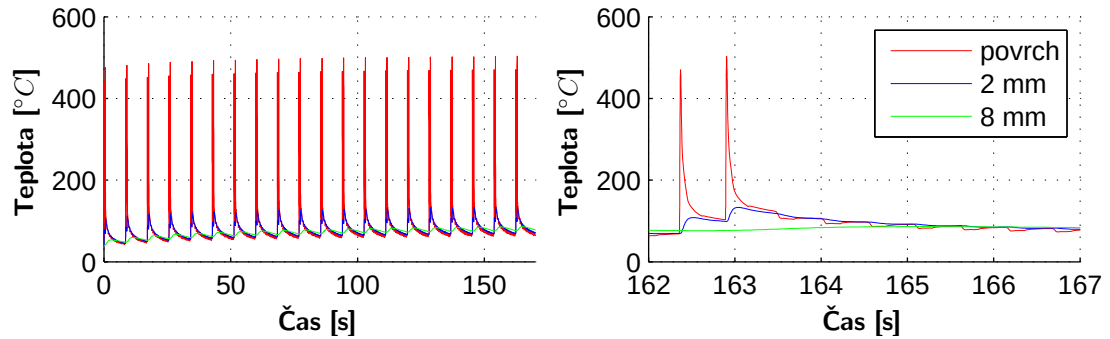
Podíváme-li se na vývoj napětí vs. deformace dochází po několika průchodech k ustálenému stavu. V prvních několika otáčkách dojde k plastickému přizpůsobení

Obr. 6.7: *Teploty a napětí po několika průchodech chlazením*

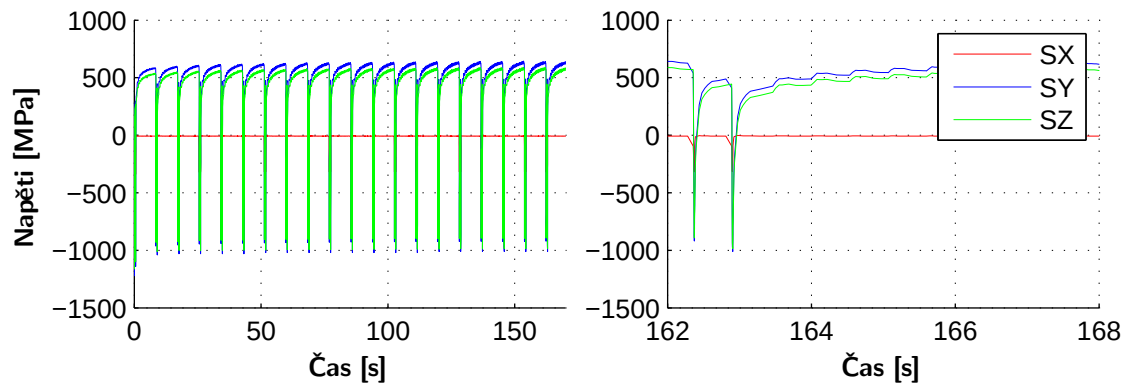
a následně jsou deformace již jen čistě elastické. Vlivem modulu pružnosti závislého na teplotě, není výsledný ztěžující obrazec přímka ale obecná lomená křivka.

V případě jiného materiálu s nižší mezí kluzu může dojít, v čase po průchodu válcovací mezerou a v oblasti tahového zatížení, k plastické deformaci. Vytvoří se pak typické hysterezní chování materiálu s cyklickou plastizací v povrchové vrstvě válce.

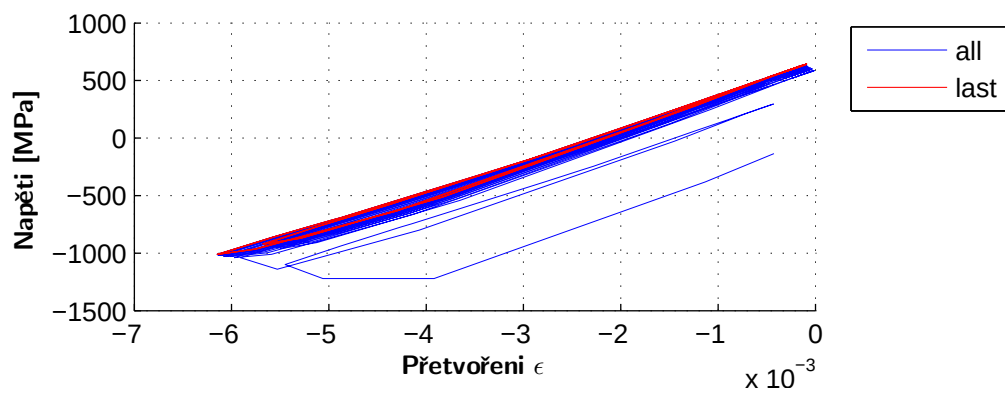
S01_01



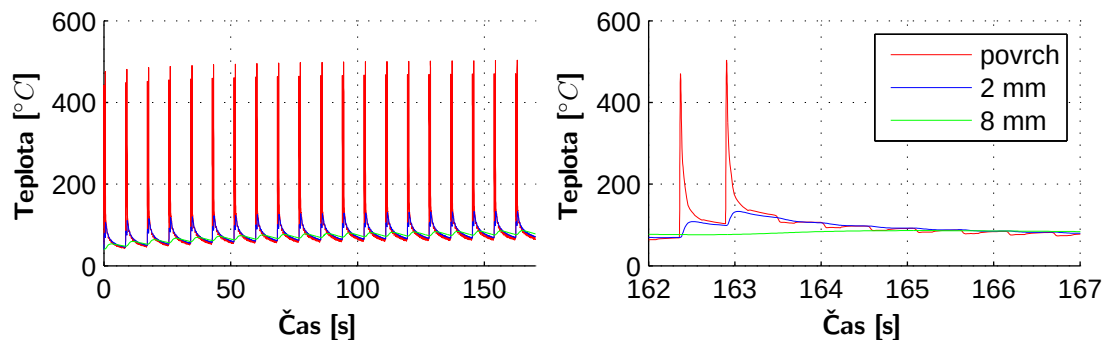
Obr. 6.8: S01_01: Vypočtené teploty na povrchu, 2mm, 8mm pod povrchem



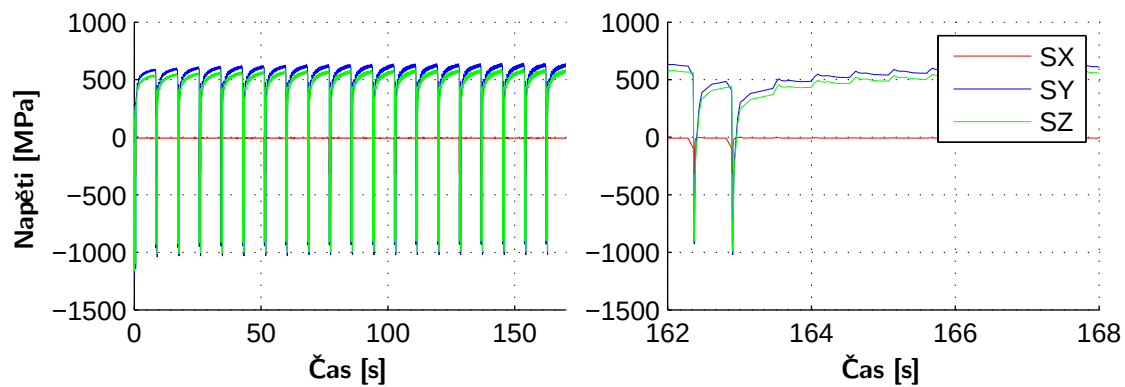
Obr. 6.9: S01_01: Napětí v horní vrstvě

Obr. 6.10: S01_01: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$

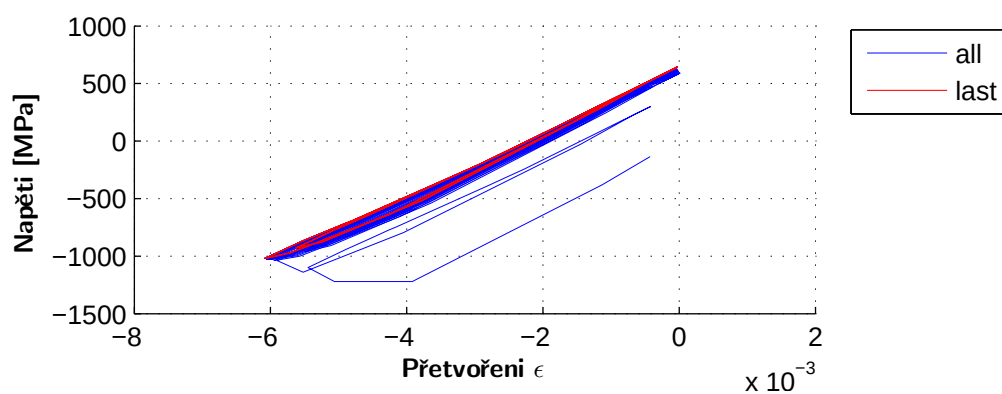
S01_02



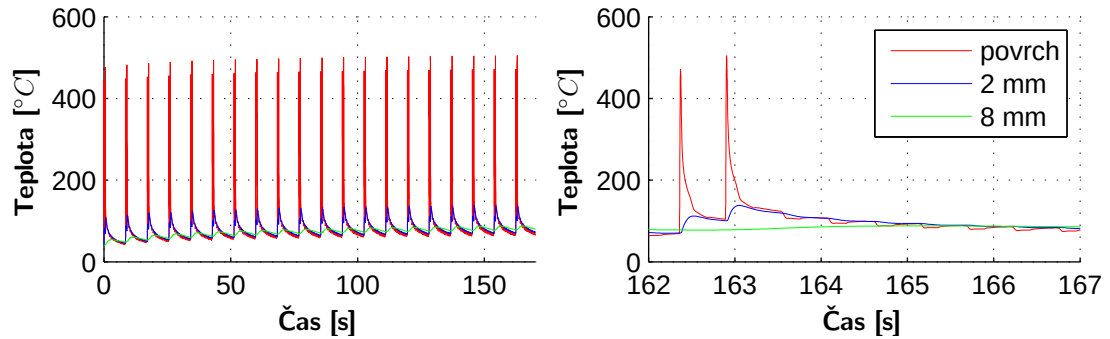
Obr. 6.11: S01_02: Vypočtené teploty na povrchu, 2mm, 8mm pod povrchem



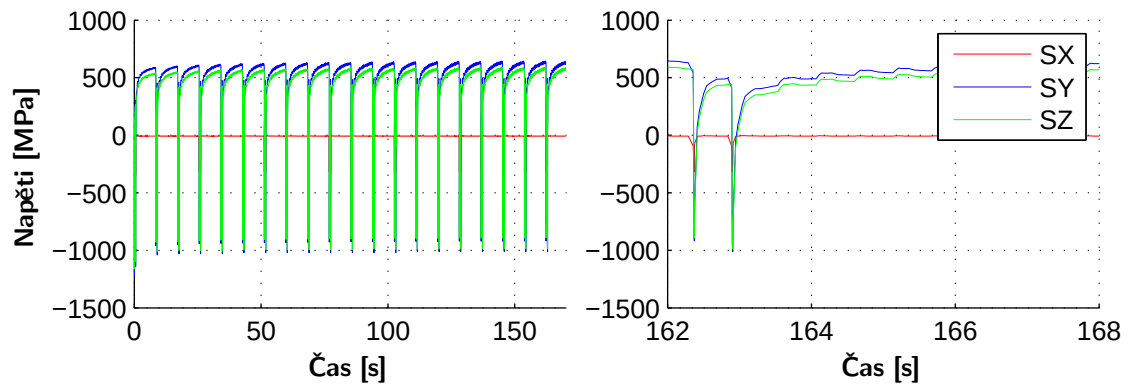
Obr. 6.12: S01_02: Napětí v povrchové vrstvě

Obr. 6.13: S01_02: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$

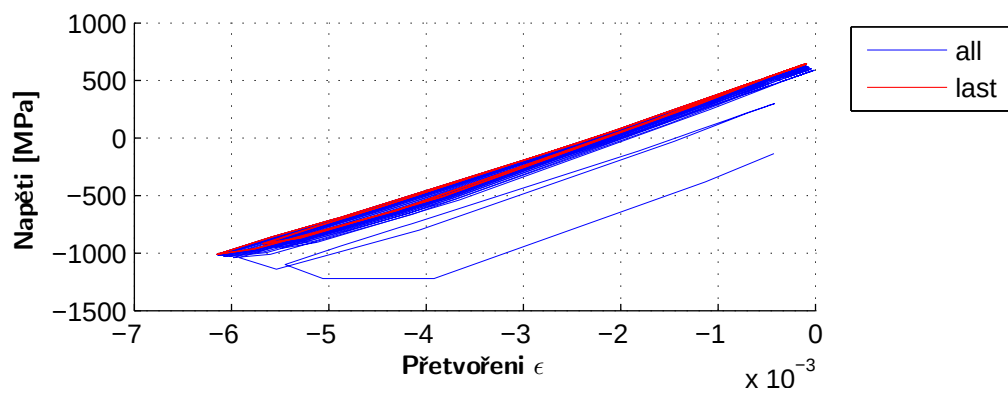
S01_03



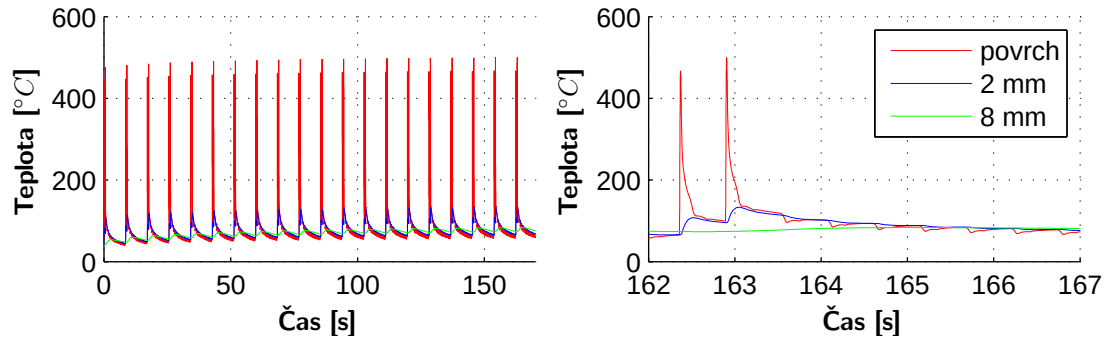
Obr. 6.14: S01_03: Vypočtené teploty na povrchu, 2mm, 8mm pod povrchem



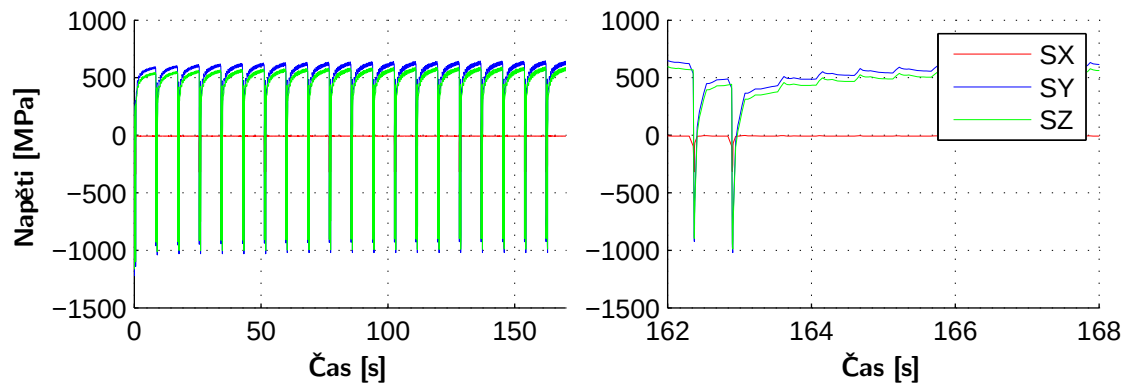
Obr. 6.15: S01_03: Napětí v horní vrstvě

Obr. 6.16: S01_03: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$

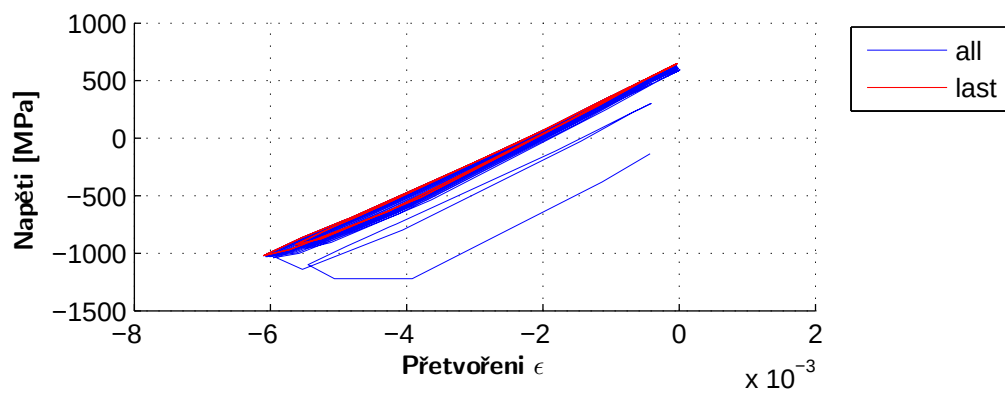
S01_04



Obr. 6.17: S01_04: Vypočtené teploty na povrchu, 2mm, 8mm pod povrchem



Obr. 6.18: S01_04:: Napětí v horní vrstvě

Obr. 6.19: S01_04:: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$

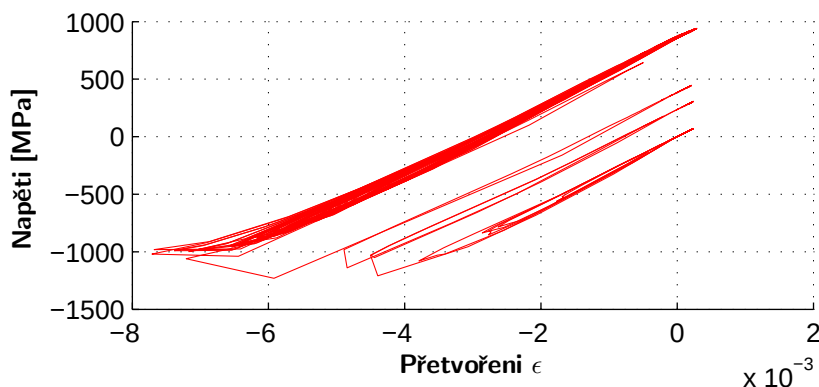
6.2.2 Schéma S02

Schéma zařazené do výpočtu jako simulace průběhu napjatosti při reálné válcovací kampani. Situace pro toto schéma je obdobná jak pro schéma předchozí. Zatěžování doznalo změn v podobě proměnné okrajové podmínky ve válcovací mezeře a přibyla další prodleva mezi jednotlivými sochory.

Na obrázcích 6.21, 6.23 jsou výsledné hodnoty z teplotní úlohy. Bylo vypočteno celkem sedm válcovaných sochorů. Obrázky ukazují průchod posledního z nich. Obě varianty se lišily použitým chlazením. Rovnovážná teplota pro variantu S02.01 s použitým kolektorem B1 je 85 °. Pro kolektor B2 je to 78 °.

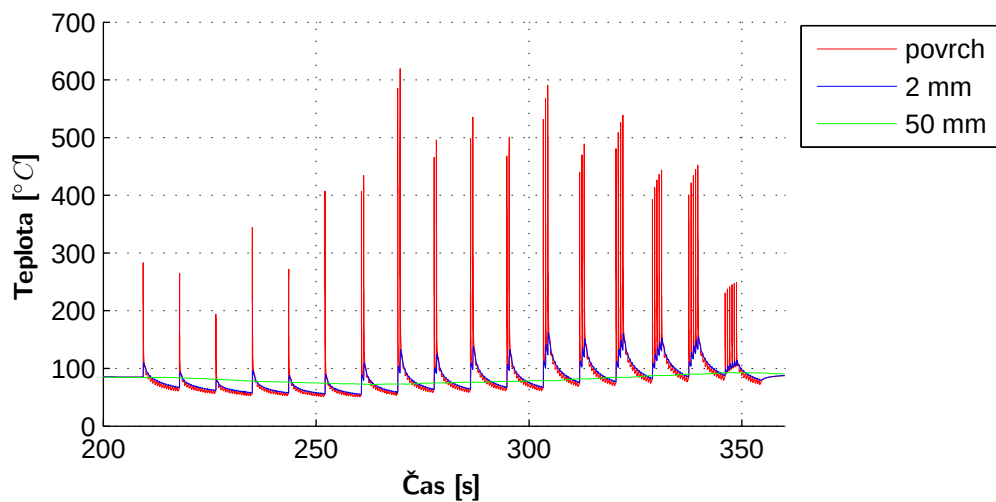
Srovnáme-li průběh teplot s průběhem vypočtených teplot povrchu při experimentu (kapitola 4) dostáváme rozdílné výsledky. Prvním rozdílem oproti měřené kampani je, že počítaná kampaň vypíná chlazení mezi jednotlivými sochory, experimentální má chlazení stále zapnuto. Druhým, větším rozdílem, je odlišné chladicí prostředí při experimentu než při měření kolektoru v laboratoři. Při válcování dochází ke stékání vody z horního válce a různým odrazům od konstrukce stolice.

V průbězích napětí na povrchu válce vidíme převládající tahovou napjatost při podchlazování povrchové vrstvy od chlazení vodou. Vzhledem k velmi vysoké mezi kluzu nedojde v této oblasti k plastické deformaci. Zatěžování je po plastickém přizpůsobení, při tlakovém zatížení během několika průchodů, elastické s trvalou konstantní velikostí plastické deformace.

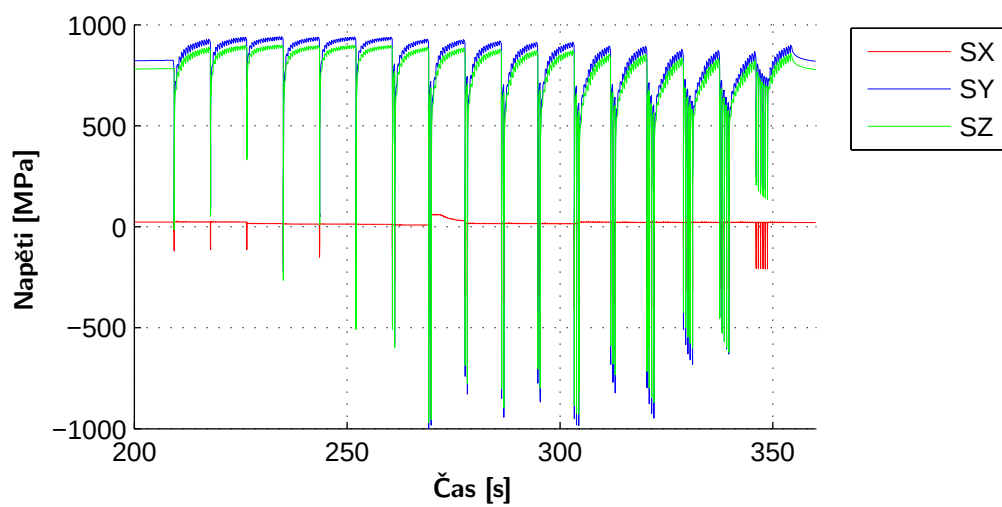


Obr. 6.20: S02.01: hysterezní křivka $\sigma_y - \epsilon_y$

S02_01

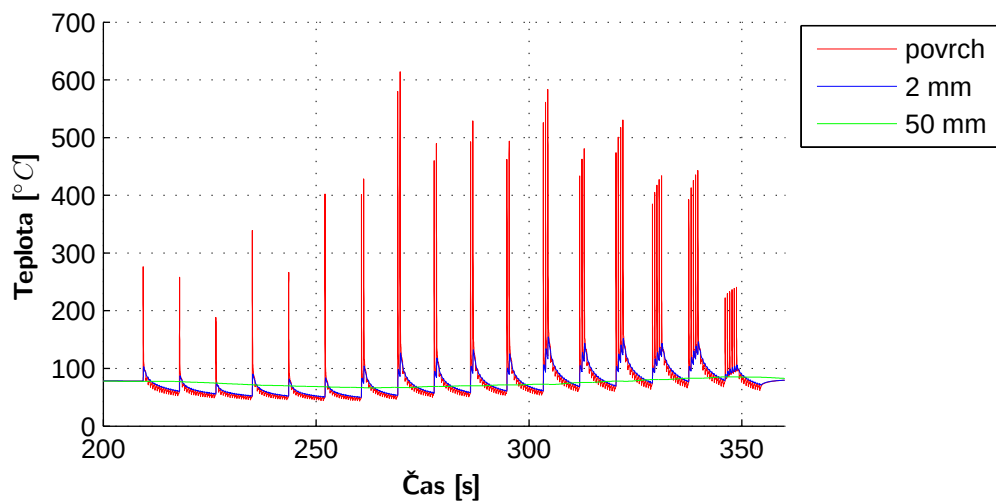


Obr. 6.21: S02_01: Vypočtené teploty na povrchu, 2mm, 50mm pod povrchem pro poslední sochor

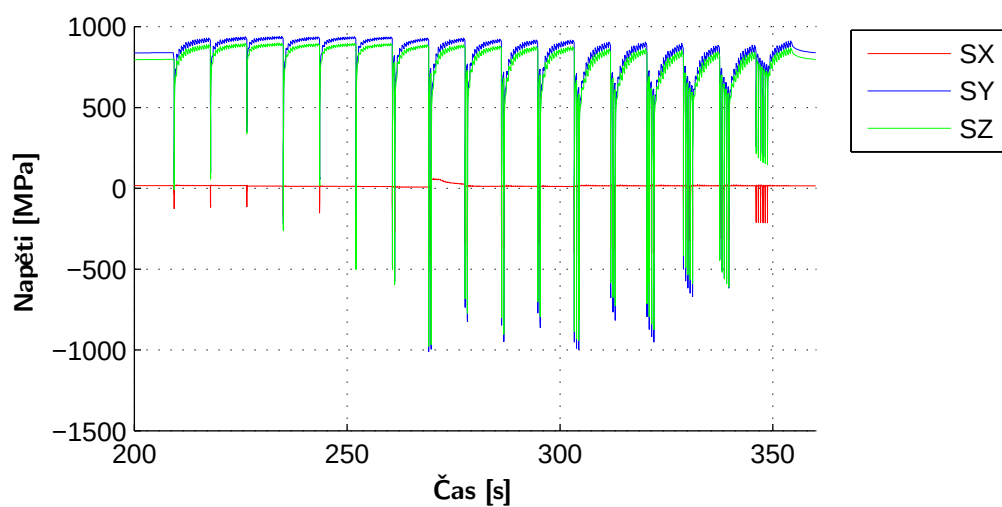


Obr. 6.22: S02_01: Napětí v povrchové vrstvě

S02_02



Obr. 6.23: S02_02: Vypočtené teploty na povrchu, 2mm, 50mm pod povrchem pro poslední sochor



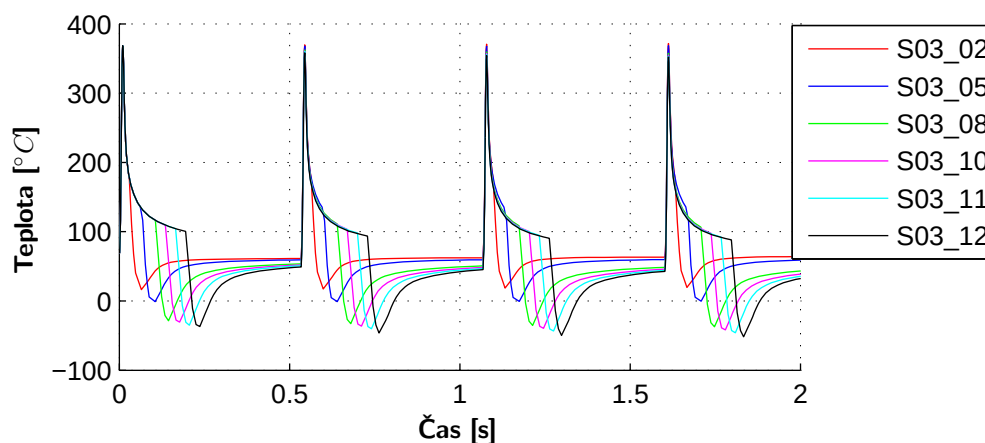
Obr. 6.24: S02_02: Napětí v povrchové vrstvě

6.2.3 Schéma S03

Hlavním cílem tohoto výpočtu je zjistit závislosti mezi polohou chlazení, teplotou a napětím v povrchové vrstvě. K tomuto účelu byly vygenerovány tepelné zatížení. Použitím tepelných toků namísto součinitele přenosu tepla jako charakteristiku chlazení odstraníme závislost na aktuální teplotě povrchu a můžeme tak vzájemně srovnat jednotlivé výsledky mezi sebou.

S03 - počáteční teplota 60 °C

Při posuzování vlivu polohy kolektoru vycházíme z variant výpočtu 2, 5, 8, 10, 11 a 12, které mají stejnou startovací teplotu a jejichž úhly jsou 5 °, 10 °, 60 °, 80 °, 100 ° a 120 °. Zobrazením výsledů povrchových teplot těchto výpočtů do jednoho grafu (obr. 6.25) vidíme různé začátky chlazení. Teploty vlivem silného chlazení pomocí konstantního tepelného toku klesají až k záporným hodnotám. Toto při reálném chlazení samozřejmě nemůže nastat. Pro srovnání chlazení je to nepodstatné.

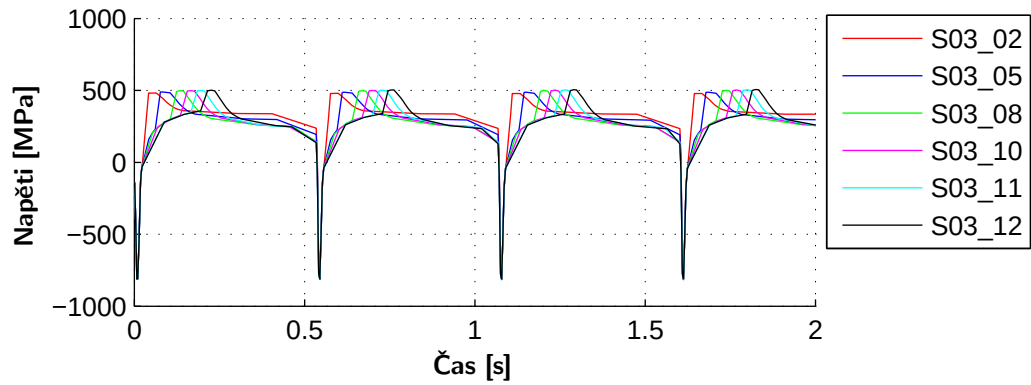
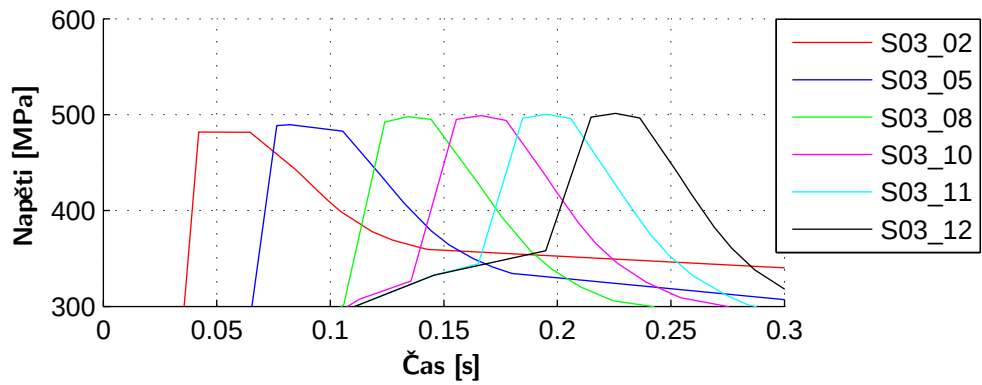
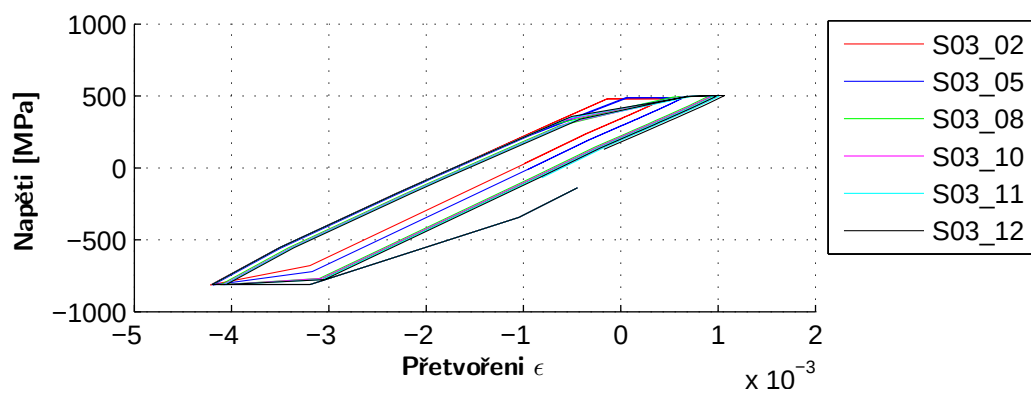


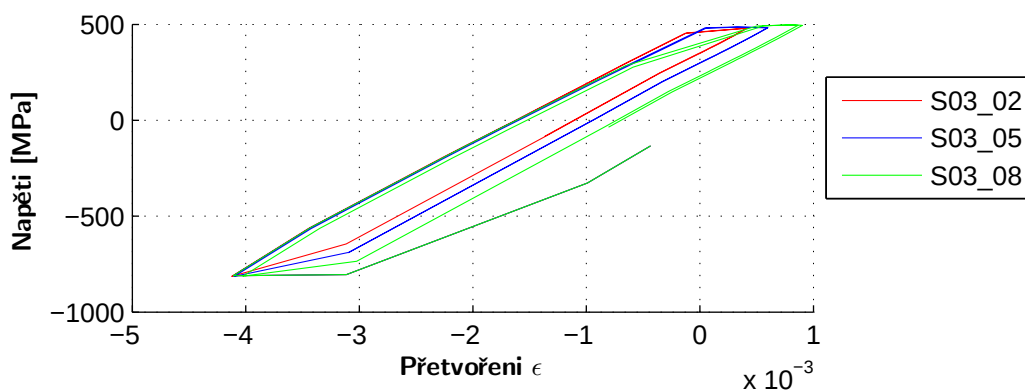
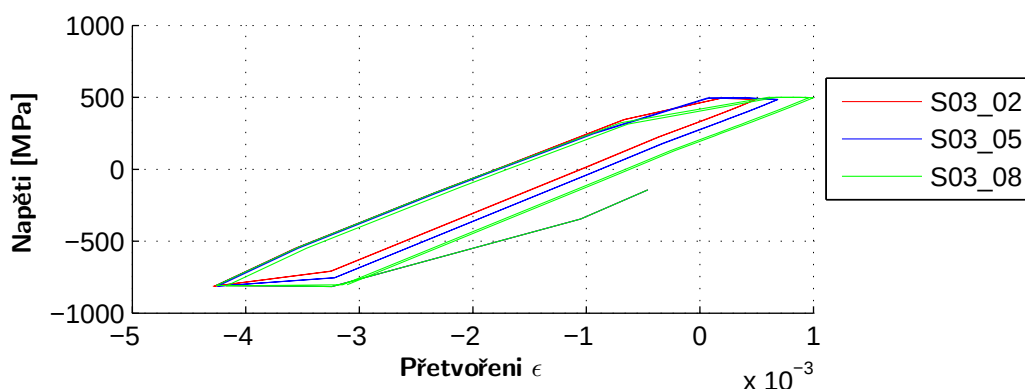
Obr. 6.25: S03: Teploty v povrchové vrstvě pro startovací teplotu 60 °C

Teplotní model trpí drobnou vadou. Vlivem krátké periody zatěžování nedojde k vyrovnaní a teploty mírně „ujíždí“. Tento vliv můžeme zanedbat omezením dat na první pár otáček.

Z průběhu napětí na čase je patrný mírný nárůst a posun napětí v oblasti chlazení. Deformace povrchu je vlivem nižší meze kluzu cyklicky elasto-plastická. Vykreslíme-li následně cyklickou zatěžovací křivku $\sigma_y - \epsilon_y$ vidíme posuv této smyčky pro různé polohy kolektoru.

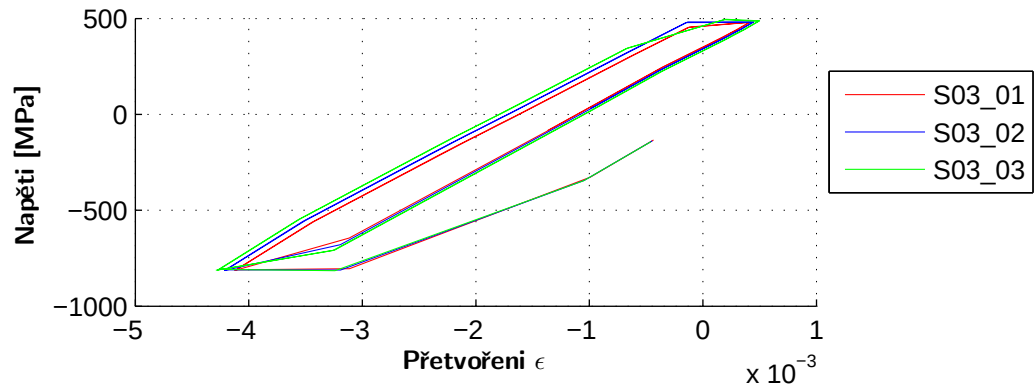
V grafech pro počáteční teplotu 30 °C a 90 °C vidíme stejné posuvy.

Obr. 6.26: S03: Napětí v povrchové vrstvě σ_y Obr. 6.27: S03: Napětí v povrchové vrstvě σ_y Obr. 6.28: S03: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$

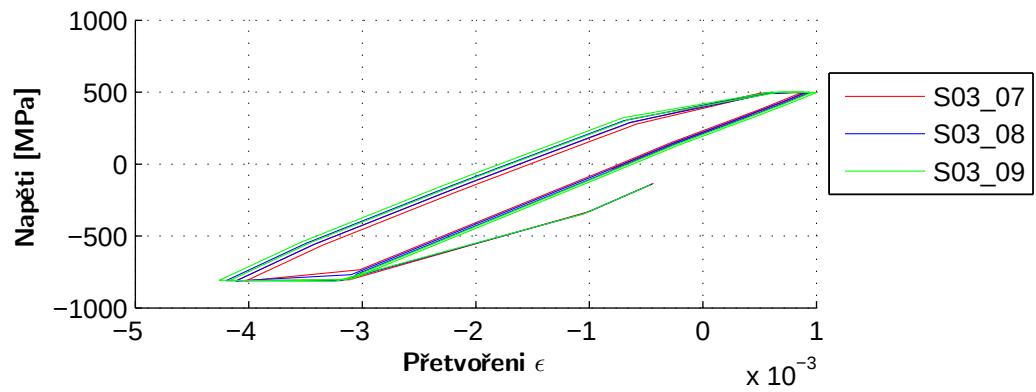
S03 - počáteční teplota 30 °CObr. 6.29: S03: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$ **S03 - počáteční teplota 90 °C**Obr. 6.30: S03: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$

Srovnáme-li křivky $\sigma_y - \epsilon_y$ mezi sebou pro stejnou polohu chlazení, ale různé počáteční teploty dostáváme rovněž posun cyklických křivek zatěžování. Pro vzájemné porovnání jednotlivých variant výpočtu byla vypočtena plocha hysterezní smyčky. Tato hodnota představuje měrnou deformační práci nevratně přeměněnou v průběhu jednoho cyklu na teplo. Z hlediska cyklického zatěžování je výhodnější zatížení s menší plochou hysterezní křivky.

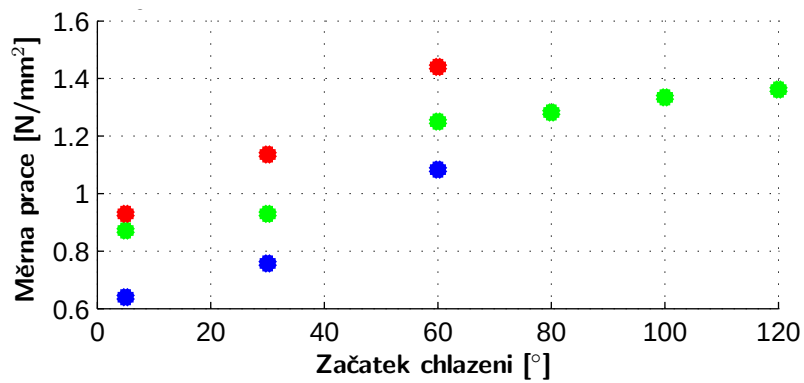
Porovnáním všech variant zatěžování pomocí jednoho údaje - obsahu plochy hysterezní křivky zjišťujeme, že nejmenší plocha hysterezní křivky je při umístění chlazení blízko výstupu z chladicí mezery.



Obr. 6.31: S03: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$ úhel začátku chlazení 5°



Obr. 6.32: S03: Cyklické zatěžování povrchové vrstvy $\sigma_y - \epsilon_y$ úhel začátku chlazení 60°

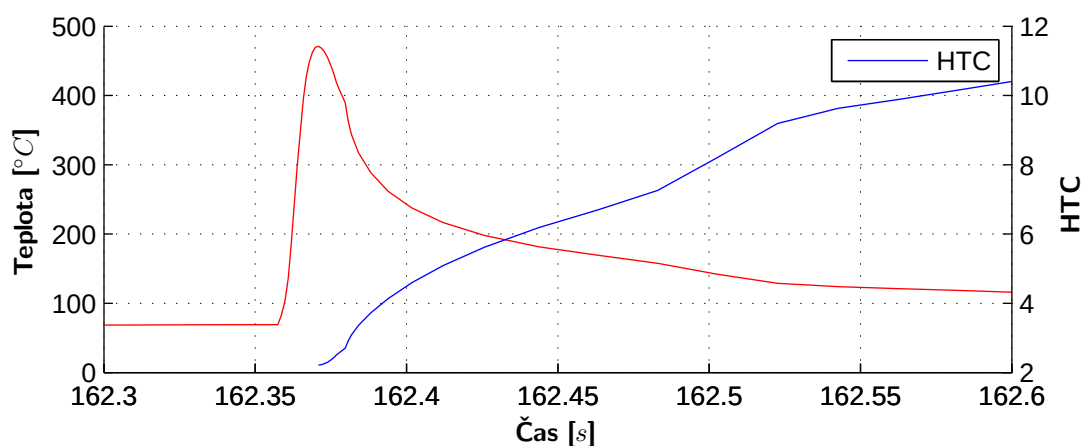


Obr. 6.33: S03: Srovnání chlazení z hlediska plochy hysterezní křivky (teploty: modrá - 30°C , zelená - 60°C , červená - 90°C)

6.2.4 Shrnutí výsledů

Při hodnocení vlivu polohy chlazení na výslednou napjatost, při posuzování z energetického hlediska kdy máme konstantní tepelný tok z válce, jsme došli k poznatku, že umístěním chlazení blíže válci dochází k menší cyklické plastické deformaci. Plocha hysterezní křivky se zmenšuje s přibližováním k výstupu z válcovací mezery 6.33.

Použitím konstantního tepelného toku je problematické aplikovat získané závěry do reálného provozu. Návrhem chladicího kolektoru získáme chladicí charakteristiku ve formě konstantního průběhu součinitele přestupu tepla. Tepelný tok od kolektoru nebude konstantní, ale bude závislý na rozdílu teplot 6.1. Pokles teploty blízko válcovací mezeře je rychlý a teplotní rozdíl v její blízkosti velký. V této oblasti je proto potřeba chladit menším kolektorem než dále od mezery.



Obr. 6.34: Povrchová teploty na válci pro jednu otáčku a nutný součinitel přestupu tepla pro konstantní tepelný tok (součinitel přestupu tepla je bez měřítka)

Při posouvání reálným kolektorem po obvodu válce bych museli zajisti jeho přizpůsobení aktuálním teplotám povrchu. Toho by šlo docílit například aktivním řízením trysek.

7 Závěr

Vytvořený výpočtový model představuje prostředek pro výpočet napjatosti povrchových vrstev pracovního válce při válcování za tepla. Byl vytvořen s ohledem na možnost zatížit modelový válec reálnými daty získanými z měření. Umožňuje simulovat stovky, tisíce otáček zatěžování při rozumné časové a paměťové náročnosti.

S použitím vytvořeného modelu byl realizován výpočet zatížení při válcovací kampani. Na tomto výpočtu bylo ukázáno, jak se mění odezva válce na různé aplikované okrajové podmínky. Měnil se použitý kolektor charakterizovaný pomocí součinitele přestupu tepla, měnila se jeho poloha a počáteční teplota válce.

Podrobnějším zkoumáním vlivu umístění chlazení vůči válci ukázalo přímou souvislost s výslednou napjatostí ve válci. Výpočty ukázaly, že při konstantním tepelném toku z válce umístěním chlazení blíže výstupu z válcovací mezery dojde ke zmenšení plochy hysterezní křivky napětí - deformace. Při hodnocení chlazení pomocí tohoto energetického přístupu se vzdalujeme realitě. Vyrobit chladicí kolektor s konstantním tepelným tokem by bylo obtížné.

Vytvořený model je vždy alespoň tak dobrý jak jsou kvalitní fyzikální vlastnosti a okrajové podmínky do něj vstupující. Tato obecná pravda platí i v tomto případě. Pro výpočet reálných napjatostí na válci jsou zapotřebí reálné vlastnosti. Mnohdy je získání těchto hodnot velmi obtížné ne-li nemožné nebo finančně velmi náročné. Použitím přibližných hodnot a příbuzných modelů nebo odhadů zkreslujeme výsledné hodnoty.

8 Literatura a odkazy

- [1] ELFMARK, J.; a kolektiv: *Tváření kovů*. Praha: SNTL, 1992, ISBN 04-410-91, 528 s.
- [2] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., čtvrté vydání, 1996, ISBN 0-471-30460-3, 886 s.
- [3] ITA: Technologie oprav válců bandážováním. Cit.: 2009-05-01.
URL <http://www.ita-tech.cz>
- [4] KADOSHNIKOV, V. I.; MOSKVIN, V. M.; BELEVSKAYA, E. L.: Procedure for determining the stress state of a work roll by the boundary-elements method. *Metallurgist*, ročník 52, září 2008, ISSN 0026-0894.
- [5] LENFELD, P.: Technologie II. Poslední upravy 2008-11-26 cit.: 2009-04-27.
URL http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/
- [6] MADENC, E.; GUVEN, I.: *The Finite element method and applications in engineering using ANSYS*. New York: Springer, 2006, ISBN 0-387-28289, 260 s.
- [7] PEŠINA, E.: *Základy užité teorie plasticity*. SNTL/SVTL, 1966, 185 s.
- [8] POČTA, B.: *Základy teorie tváření kovů*. Praha: SNTL, 1966, ISBN 04-417-66, 512 s.
- [9] SPUZIC, S.; STAFFORD, K. N.; SUBRAMANIAN, C.; aj.: Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *Elsevier Science S. A.*, 1994.
- [10] STEVENS, P. G.; IVENS, K. P.; HARPER, P.: Increasing work-roll life by improved roll-colling practise. *Journal of The Iron and Steel Institute*, Leden 1971.
- [11] STOLARSKI, T. A.: *Tribology in Machine Design*. Butterworth-Heinemann, druhé vydání, 1999, ISBN 978-0750636230, 298 s.
- [12] STROJIRNY_TŘÍNEC: Výroba a renovace hutních válců. Cit.: 2009-05-01.
URL <http://www.strojirnytrinec.cz/>

A Přílohy

A.1 Naměřené parametry při válcování pro první sochor

Tab. A.1: *Parametry při jednotlivých průchodech pro válcování prvního sochoru*

Úběr číslo	Teplota sochoru [°C]	Horizontální úběr [mm]	Hor. síla levá [kN]	Hor. síla pravá [kN]	Průměrný válcovací tlak [MPa]
1.	966	10.27	695	794	60.0
2.	1114	9.69	757	673	55.9
3.	1116	10.05	976	860	74.5
4.	1107	9.95	1097	684	68.5
5.	1108	10.01	883	902	72.1
6.	1102	9.99	949	1021	75.2
7.	1107	10.01	1277	999	91.9
8.	1103	9.98	1116	1137	86.1
9.	1102	10.02	1292	1290	104.2
10.	1100	9.97	1265	1315	98.6
11.	1098	10.03	1634	1469	125.2
12.	1106	8.97	1557	1459	121.5
13.	1097	9.04	1838	1643	147.9
14.	1098	5.97	1586	1424	138.2
15.	1076	3.97	1378	1197	134.9
16.	1064	2.01	994	991	139.4
17.	1012	1.037	737	767	147.3

A.2 Parametry TRIOSTOLICE

Tab. A.2: *Parametry TRIOSTOLICE Žďas - horizontální větev*

Průměr horního válce	max.	650	mm
	min.	570	mm
Průměr středního válce	max.	570	mm
	min.	490	mm
Průměr dolního válce	max.	650	mm
	min.	570	mm
Délka těla válce		1100	mm
Maximální válcovací tlak		5000	kN
Maximální krouticí moment		280	kN.m
Maximální mezera mezi válci		300	mm

A.3 Parametry materiálových modelů

Tab. A.3: *Model Materiálu - MATERIAL01*

	Teplota						
	20	100	200	300	400	500	600
Hustota [$kg.m^{-3}$]	7310	7290	7260	7230	7200	7170	7140
Tepená kapacita [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]	486	524	557	608	671	771	1052
Tepelná vodivost [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	49.4	47.3	44.4	41.9	38.9	36.4	34.0
Tepelná roztažnost [$1/K \cdot 10^{-6}$]		11.8	12.3	12.8	13.3	13.6	13.9
Modul pružnosti [GPa]	206	206	206	191.3	181.5	166.8	122.6
Mez kluzu [MPa]	1100	1090	1070	1095	800	700	
Modul zpevnění [GPa]	21	18.5	15.1	11.8	8.5	5.2	
Poissonovo číslo $[-]$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

Tab. A.4: *Model Materiálu - MATERIAL03*

	Teplota						
	20	100	200	300	400	500	600
Hustota [$kg.m^{-3}$]	7310	7290	7260	7230	7200	7170	7140
Tepená kapacita [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]	486	524	557	608	671	771	1052
Tepelná vodivost [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	49.4	47.3	44.4	41.9	38.9	36.4	34.0
Tepelná roztažnost [$1/K \cdot 10^{-6}$]		11.8	12.3	12.8	13.3	13.6	13.9
Modul pružnosti [GPa]	206	206	206	206	206	206	206
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	493	495	476	478	453	402	
Modul zpevnění [GPa]	21	18.5	15.1	11.8	8.5	5.2	
Poissonovo číslo [–]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3