

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

OKRAJOVÉ PODMÍNKY VE VÁLCOVACÍ MEZEŘE PŘI
VÁLCOVÁNÍ ZA TEPLA A ZA STUDENA

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. TOMÁŠ LUKS

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

OKRAJOVÉ PODMÍNKY VE VÁLCOVACÍ MEZEŘE PŘI VÁLCOVÁNÍ ZA TEPLA A ZA STUDENA

BOUNDARY CONDITIONS IN THE ROLL GAP DURING HOT AND COLD ROLLING

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Tomáš Luks

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

BRNO 2016

Abstrakt

Při tvorbě modelů technologického procesu válcování jednu z klíčových rolí hraje určení teplotních a silových okrajových podmínek ve válcovací mezeře. V kontaktu ve válcovací mezeře pozorujeme proměnný průběh normálové síly, změnu vzájemné rychlosti těles, působení oxidů a maziv aj. Zahrnout vliv všech parametrů při určení okrajových podmínek není jednoduché a vyžaduje rozsáhlá měření. Proto je účelem této práce vývoj nových teplotních a silových senzorů pro měření okrajových podmínek ve válcovací mezeře ve formě součinitele přestupu tepla v kontaktu a koeficientu tření a jejich použití při testovacích měřeních.

Pro teplotní okrajovou podmínku při válcování zatepla je pracovní válec osazen podpovrchovým teplotním snímačem. Na základě zaznamenaných teplot a pomocí inverzní úlohy vedení tepla jsou vypočteny povrchové teploty válce a hustota tepelného toků mezi válcovaným materiálem a válcem. Několik typů senzorů bylo vyvinuto a úspěšně otestováno na zkušební stolici nebo v poloprovozním režimu válcování na trati. V simulacích a při měření byly porovnávány teplotní odezvy senzorů a schopnost inverzní úlohy správně rekonstruovat povrchovou okrajovou podmínku. Při dlouhodobém měření byla také sledována životnost senzorů.

Ke snímání mechanického napětí na rozhraní válec-provalek a výpočtu koeficientu tření je využita metoda měřícího pinu, kdy vrchol měřícího elementu (pinu) je v kontaktu s válcovaným materiálem. Síly, působící na pin, jsou snímány tříosým piezoelektrickým snímačem sil a přepočteny na kontaktní napětí ve válcovací mezeře. Senzor byl zabudován do měřícího válce a otestován při válcování ocelových a hliníkových tyčí za tepla a za studena. Výsledky byly porovnány s integračním snímačem sil ROLLSURF.

Klíčová slova

válcování, válcovací mezera, koeficient tření, součinitel přestupu tepla, napětí v kontaktu

Abstract

Boundary conditions in the roll gap play an important role in modelling of rolling processes. In the roll gap we can observe the following: changes of rolling pressure, changes of relative velocity, influences of oxides and lubrication, etc. When taking into account all conditions mentioned above the determination of the boundary conditions is not trivial and extensive measurements are necessary. Therefore, this thesis is dealing with design of temperature and force sensors specified for the determination of friction coefficient and heat transfer coefficient in contact.

The temperature sensor with an installed thermocouple measures subsurface temperature for a given depth; and then the inverse heat conduction task is used to compute temperature and heat flux on the surface. Several temperature sensors were designed and used for measuring in pilot mill and industrial rolling mill as well. The thermal responses of different sensors were compared in the numerical simulations. The inverse calculations were tested for various rolling conditions. A durability of the sensors was also studied in industrial rolling conditions.

The contact stresses in the roll gap were measured by a pin, which was in direct contact with the rolled material. The forces on the top of the pin were measured by a three-axes piezoelectric force transducer and recalculated to the contact stress and friction coefficient. The sensor was implemented in a work roll and tested when rolling aluminium and steel slab for different rolling conditions. The results were compared with the integrative force sensor ROLLSURF.

Keywords

rolling, roll gap, friction coefficient, heat transfer coefficient, contact stress

LUKS, T. *Okrajové podmínky ve válcovací mezeře při válcování za tepla a za studena*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 95 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci „Okrajové podmínky ve válcovací mezeře při válcování za tepla a za studena“ vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Jaroslava Horského CSc. a školitele specialisty Ing. Petra Kotrbáčka, Ph.D., s použitím materiálů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně 15.6.2016

Ing. Tomáš Luks

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli a vedoucímu dizertační práce prof. Ing. Jaroslavu Horskému CSc. za jeho odborné vedení, podporu a cenné rady. Chtěl bych také poděkovat prof. Ing. Miroslavu Raudenskému CSc. za jeho trpělivost a péči. Musím taky vyjádřit díky všem kolegům, současným i minulým, z Laboratoře přenosu tepla a proudění za podporu a vytváření příjemného prostředí. A na závěr nemohu opomenout ani své rodiče, kteří mě během celého vysokoškolského studia podporovali.

Ing. Tomáš Luks

Vymezení cílů dizertační práce	3
Úvod	5
1 Okrajové podmínky ve válcovací mezeře - teoretický úvod	7
1.1 Tření	8
1.1.1 Modely tření	9
1.1.2 Elementární teorie smykového tření	11
1.2 Tepelný odpor v kontaktu	12
1.3 Technologie válcování - obecná teorie	13
1.3.1 Geometrie válcování	14
1.3.2 Rychlost a deformace materiálu ve válcovací mezeře	16
1.3.3 Kontaktní napětí ve válcovací mezeře	17
1.3.4 Teplotní zatížení ve válcovací mezeře	20
2 Měření okrajových podmínek ve válcovací mezeře	23
2.1 Měření koeficientu tření ve válcovací mezeře	23
2.1.1 Měření průměrné hodnoty koeficientu tření	23
2.1.2 Optické metody měření kontaktních napětí	24
2.1.3 Měření lokální hodnoty tření pomocí pinu	24
2.1.4 Integrační měření tření	28
2.1.5 Součinitel tření z inverzního výpočtu kontaktních napětí	30
2.2 Měření součinitele přestupu tepla v kontaktu	31
3 Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování	33
3.1 Teplotní senzor	33
3.1.1 Pevnostní kontrola teplotního senzoru	38
3.1.2 Inverzní úloha vedení tepla	40
3.1.3 Výpočtové modely teplotních senzorů	41
3.1.4 Testování inverzní úlohy v podmínkách plánovaných měřeních	44
3.1.5 Kalibrace teplotních senzorů	47
3.1.6 Teplotní odezva senzorů	48
3.2 Pin senzor	49

3.2.1	Tříosý piezoelektrický snímač sil	51
3.2.2	Kalibrace pin senzoru	53
4	Experimentální měření	55
4.1	Teplotní měření na experimentální válcovací stoličce	55
4.1.1	Pilotní měření - etapa I	55
4.1.2	Pilotní měření - etapa II	56
4.2	Teplotní měření na válcovací trati - etapa III	58
4.3	Měření tření - MEFOS	62
4.3.1	Výsledky ze silových senzorů	65
4.3.2	Výsledky z teplotního senzoru	66
4.3.3	Kontrola povrchu	67
5	Hodnocení výsledků měření	69
5.1	Teplotní senzory	69
5.2	Měření tření pomocí pin senzoru	70
6	Závěr	73
	Seznam použitých symbolů a zkratk	75
	Seznam obrázků	79
	Seznam tabulek	85
	Seznam použitých zdrojů	93
	Vlastní publikace vztahující se k tématu dizertační práce	94
	Ostatní vlastní publikace	95
	Přílohy	I
A	Výkresová dokumentace	III
A.1	Teplotní senzory pro pilotní testy	V
A.2	Teplotní senzory pro průmyslové testy	XI
A.3	Měření MEFOS	XVII
B	Parametry snímačů	XXI
C	Výsledky z měření MEFOS	XXIII

Vymezení cílů dizertační práce

Cílem práce je vývoj senzorů schopných stanovit okrajové podmínky ve válcovací mezeře ve formě součinitele přestupu tepla v kontaktu a koeficientu tření. Vývoj je zaměřen na metody měření teploty ve válci a využití inverzní úlohy vedení tepla. Pro stanovení koeficientu tření se využívá měření lokálních hodnoty kontaktního napětí pomocí tříosých snímačů sil a kontaktního měřicího tělesa. Práce je rozdělena na návrh silového a teplotního senzoru. V jednotlivých bodech je práce složena z těchto částí:

- konstrukce teplotních senzorů pro různé režimy válcování.
- porovnání schopností teplotních senzorů pro různé parametry válcování.
- pilotní a poloprovozní měření a analýza dat.
- konstrukce senzoru pro stanovení kontaktních napětí a měření na testovací stolici
- analýza naměřených dat a srovnání s jinými metodami měření.

Válcování patří mezi základní technologie pro výrobu hutních polotovarů. I přes značnou vyspělost, vzhledem k téměř třísetletému vývoji, stále existuje snaha o vývoj nových přístupů zvyšující válcovací rychlosti, válcovací síly nebo jen zlepšující kvalitu výrobků. Častým požadavkem je snížení ceny výroby, hlavně pomocí snížení spotřeby energií a zvětšení životnosti pracovních válců. Pro dosažení všech těchto cílů je potřeba lépe pochopit interakci mezi válcovaným materiálem a válcem. Hlavními mechanismy interakce, na které se zaměřuje tato práce, jsou teplotní ovlivnění pracovního válce od válcovaného materiálu a tření vyskytující se ve válcovací mezeře.

Pro válcování je tření nezbytnou podmínkou pro uskutečnění válcovacího procesu. Velikost koeficientu tření mezi válcem a válcovaným materiálem určuje, zda je záběr možný. Průměrnou hodnotu tření je možno stanovit pomocí snímání celkové válcovací síly a krouticího momentu pracovního válce. Reálný průběh tření v mezeře však není konstantní. Jeho průběh závisí na mnoha faktorech: rychlosti, režimech válcování, přítomnosti olejů aj.. Pro porozumění třecím procesům při válcování je proto nezbytné měřit lokální hodnoty normálových a tečných napětí v mezeře ke stanovení reálného průběhu koeficientu tření.

Tepelné zatížení při válcování ovlivňuje samotný technologický proces válcování a má přímou návaznost na otázku životnosti válců. Pomocí součinitele přestupu tepla v kontaktu jsme schopni simulovat teplotní cykly v povrchové vrstvě a stanovit limity životnosti válců případně tyto hodnoty použít při řízení válcovací tratě.

Doposud bylo provedeno několik studií na téma měření okrajových podmínek ve válcovací mezeře. V rámci evropského projektu ROLLGAP (finální report dostupný online [1]), jehož částí je tato práce, byly vyvíjeny různé typy senzoru pro podrobný popis dějů ve válcovací mezeře. Hlavním cílem dizertační práce je vývoj a implementace senzorů schopných charakterizovat tření a tepelné toky při válcování. Pro měření tepelných okrajových podmínek je v práci využito zkušeností Laboratoře přenosu tepla. Vlastní práce u teplotního měření spočívá ve vývoji senzorů pro různé režimy válcování, výrobě a měření v testovacím a poloprovozním režimu válcování. Druhou částí práce je vývoj silového senzoru pro měření tření.

1

Okrajové podmínky ve válcovací mezeře - teoretický úvod

Pro potřeby modelů válcování, odvezených v následující kapitole 1.3, jsou nejdůležitější okrajové podmínky charakterizující velikost tření a teplotního odporu ve válcovací mezeře. Obě tyto okrajové podmínky závisí na interakci mezi dotýkajícími se povrchy těles a jsou v podstatě určeny stejnou sadou parametrů [2]. Pro studium a měření okrajových podmínek je proto využito metod a modelů z oblasti tribologie.

Tribologie je vědní obor zabývající se vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu, případně pokusu o vzájemný pohyb [3]. Ucelený pohled na tribologické systémy z pohledu tvářecích procesů poskytuje práce Scheyho [4], která pojmenovává jednotlivé komponenty systému a identifikuje jejich parametry. Interakcí jednotlivých komponent v čase a prostoru dochází k jednotlivým tribologickým procesům, tj. procesy kontaktní, třecí, opotřebení a mazání. Pro technologii válcování se jedná o interakci pracovního válce a provalku jakožto kontaktních těles, maziva a okolního prostředí.

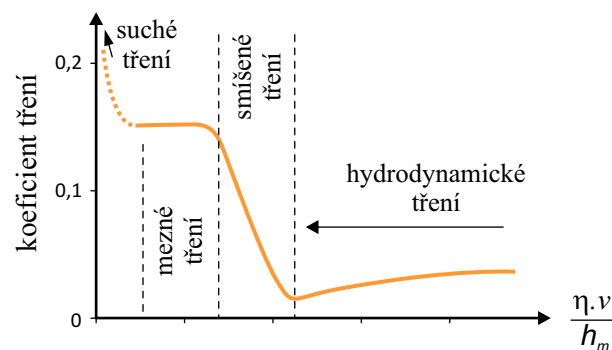
Podstatným prvkem tribologického systému je vzájemný kontakt těles. Při něm je třeba vzít v úvahu různé vlivy jako je tvar a rozměry tělesa, jeho materiálové vlastnosti, interakce chemické, fyzikální, materiálové případně jiné vlivy. Na stykovou plochu tribologického systému potom obvykle pohlédneme z následující hledisek [4]:

- **mechanický pohled:** styková plocha představuje souvislou vrstvu smykového napětí τ mezi tuhým nástrojem (pracovním válcem v případě válcování) a deformovatelným tvářeným materiálem. Vliv deformace nástroje na třecí síly je tímto předpokladem odstraněn. Tento přístup nevyžaduje podrobnější znalosti o kontaktu a předpokládá se, že případná změna v rozhraní se příslušně projeví ve změně velikosti smykového napětí τ .
- **makroskopický pohled:** nástroj (pracovní válec) se deformuje elasticky. Při této úrovni modelu je uvažováno také s přilnutím, adhezí mezi kontaktní tělesy a teplotní deformací v průběhu zkoumaného procesu.
- **mikroskopický pohled:** je uvažováno s drsností povrchu a jeho vlivem nejen na velikost třecích sil, ale i na velikost a stabilitu mazacího filmu. S materiálem nástroje je možno pracovat jako s materiálem složeným z tvrdých abrazivních částic zabudovaných v měkké matrici. Dále zde spadají vlivy oxidů, difuze, chemické reakce maziv ap..

1.1 Tření

Tření je jedním z procesu tribologického systému. Z energetického pohledu je proces tření definován jako ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku nebo při ukončení relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí. Pokud se omezíme pouze na vnější tření můžeme tření definovat jako odpor proti relativnímu pohybu při kontaktu dvou těles v oblasti plochy jejich vzájemného dotyku v tangenciálním směru [3].

Tření při tvářecích procesech má oproti tření v běžné inženýrské praxi jistá specifika. Při tvářeni existuje velký rozdíl v tvrdosti kontaktních ploch (tvářecím nástrojem a tvářeným materiálem), tlak na třecích plochách je značně vyšší než se obvykle dosahuje u strojních součástí a při tvářeni za tepla navíc dochází ke vzniku sekundárních okují, které mají na velikost tření zásadních vliv. Obecně má vnější tření při tvářecích procesech dvojí roli. Jednak úlohu pasivního činitele, který působí proti rozvoji deformace, zvětšuje tvářecí síly (růst spotřeby energie) a způsobuje opotřebení tvářecích ploch. Při aktivní roli je tření naopak nezbytnou podmínkou pro úspěšné proběhnutí procesu. Pro příklad válcování je mezní úhel záběru definován přímo z koeficientu tření, kdy hodnota úhlu záběru musí být menší než je mezní úhel jinak dojde k prokluzu válců. [5]



Obrázek 1.1: Striebeckův diagram s vyznačenými druhy tření

S procesy tření úzce souvisí proces mazání, ve kterém se pomocí maziva snažíme ovlivnit velikost třecí síly a snížit opotřebení třecích ploch. Přítomnost maziva ovlivňuje velikost koeficientu tření dle Striebeckova diagramu (viz obrázek 1.1). Na průběhu této křivky můžeme rozlišit následující druhy tření:

- **suché tření:** nastává při přímém styku povrchů kontaktních těles bez přítomnosti maziva. Dochází k přímému dotyku povrchových nerovností.
- **mezní tření:** modifikace suchého tření. Na styku těles se nachází velmi tenká vrstva absorbovaných molekul kapaliny nebo plynů, případně látky vytvořené chemickou reakcí povrchu. Dochází k částečnému přímému kovovému styku vrcholů povrchových nerovností a porušení tenkého mazacího filmu. Tenký

film maziva je pod vlivem meziatomových sil a snižuje tření. Vzhledem ke své tloušťce se film neřídí zákony hydrodynamiky.

- **hydrodynamické tření:** vzniká při dokonalém oddělení ploch vrstvou kapaliny, které podléhá zákonům hydrodynamiky. Třecí síla je úměrná dynamické viskozitě maziva a rychlosti vzájemného pohybu.
- **smíšené tření:** je přechod mezi hydrodynamickým a mezním třením. Jedná se o nejtypičtější druh tření při tvářecích procesech.

1.1.1 Modely tření

Pomocí makroskopického (mechanického) přístupu zkoumáme kontakt těles jako celku na základě funkčních projevů sledovaného tribologického systému. Při tomto přístupu získáváme údaje z vnějších měřitelných veličin tribologického systému jako je velikost třecí síly, třecího momentu nebo třecí práce s cílem charakterizovat proces tření například pomocí koeficientu tření [3].

Následuje přehled nejpoužívanějších modelů tření používaných při modelaci tvářecích procesů [6, 7].

Coulombův model tření

Základní vlastnosti tření byly objeveny pomocí prací v 15.-18. století (Leonardo da Vinci, Amonton, Coulomb). Výsledkem experimentů byly tři zákony pro suché tření:

- třecí síla je přímo úměrná normálovému zatížení (Amontonův první zákon).
- třecí síla nezávisí na velikosti zdánlivé stykové plochy (Amontonův druhý zákon).
- třecí síla nezávisí na kluzné rychlosti (Coulombův zákon tření).

Tyto zákony byly čistě empirické na základě provedených experimentů bez detailní znalosti podstaty procesu. Podzději bylo objeveno, že zákony platí jen přibližně, tření závisí na rychlosti smýkání a historii kontaktu. Velikost třecí síly se v průběhu tření může značně měnit.

$$\tau = \mu \cdot p \quad (1.1)$$

Kde p je normálový kontaktní tlak, τ je smykové napětí v kontaktu a μ koeficient tření.

Model konstantního tření

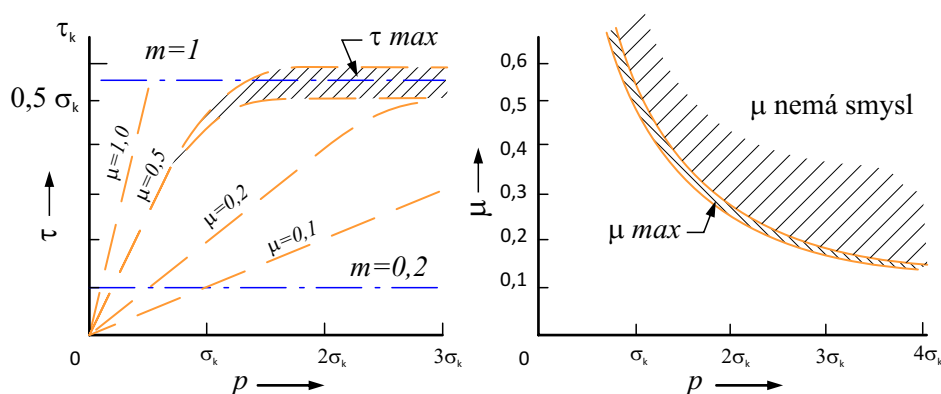
Při tvářecích procesech dochází k velkým normálovým tlakům, kdy vyvozené smykové napětí na rozhraní se přibližuje k hodnotě meze kluzu ve smyku τ_k . Při překročení dojde v jednom z kontaktních těles (pevnostně slabším) ke smykové deformaci spíše než ke vzájemnému skluzu. Dochází k plastizaci a k přilnutí materiálu.

Hodnotu τ_k je možno vyjádřit na základě meze kluzu pro daný materiál. Dle zvolené podmínky plasticity je $\tau_k = \sigma_k/2$ nebo $\tau_k = \sigma_k/\sqrt{3}$.

$$\tau = m \cdot \tau_k \quad (1.2)$$

Kde m je třecí faktor. Jeho hodnota je v rozměni 0 až 1. Při $m = 0$ nedochází ke tření, pro $m = 1$ dochází k přilnutí materiálu.

K objasnění tohoto modelu je možno na tření pohlížet v mikroskopickém měřítku z pohledu adhezní teorie tření. Při nárůstu normálové síly dochází ke zvětšování reálné kontaktní plochy, až do doby, kdy je reálná plocha a zdánlivá kontaktní plocha stejná. Poté je třecí síla konstantní a rovna smykovému napětí meze kluzu při čistém smyku τ_k .



Obrázek 1.2: Porovnání modelu konstantního tření s modelem Coulombovým. Vymezení maximální hodnoty koeficientu tření μ

Při zpětném pohledu na Coulombův model tření při respektování chování materiálu při velkých tlacích docházíme k závěru, že hodnota koeficientu tření μ nemůže nabývat libovolné hodnoty (viz obrázek 1.2).

Obecný model tření

Obecný model tření vytvořil v sedmdesátých letech Wanheim a Bay [8] jako nelineární variantu Orowanova modelu tření. Kombinuje Coulombův model tření s modelem konstantního tření. V oblasti, kde normálový tlak p je menší než mez kluzu ve smyku ($p/\sigma_k < 1,5$) platí Coulombův model s přímou úměrou mezi normálovým a smykovým napětím (1.1). V oblasti ($p/\sigma_k > 3$) se uplatňuje model konstantního tření (1.2). Oblast přechodu představuje spojitou hladkou křivku.

$$\tau = f \alpha_k \tau_k \quad (1.3)$$

Kde f je třecí faktor, α_k poměr mezi skutečnou S_r a zdánlivou S_a velikostní kontaktní plochy.

Model hydrodynamického tření

Model tření vytvořený pro kapalinné tření, kdy dochází k dynamickému chování kapaliny mezi třecími povrchy. Třecí síly v kontaktu tvoří odpor kapaliny proti vzájemnému pohybu. Pevná tělesa jsou zcela oddělena kapalinou (mazivem)

$$\tau = \eta \frac{v}{h_m} \quad (1.4)$$

Kde η je dynamická viskozita kapaliny, v vzájemná rychlost pohybu těles, h_m tloušťka vrstvy mazací kapaliny.

1.1.2 Elementární teorie smykového tření

Při mikroskopickém přístupu pohlížíme na procesy tření jako na elementární děje, kdy se hodnotí lokální vlastnosti interakce mezi tělesy. Pomocí tohoto přístupu lze zkoumat podstatu vzniku třecích sil těles v kontaktu. Teorie tření lze rozdělit do pěti kategorií [9]:

- *Plowing and cutting-based models* - deformační teorie
- *Adhesion, junction growth, and shear models* - adhezní teorie
- *Single- and multiple-layer shear models* - teorie smykových vrstev
- *Debris layer and transfer layer models*
- *MD models* - molekulární teorie

Jednotlivé teorie osvětlují fenomén tření z různých pohledů. Podrobnosti k jednotlivým teoriím jsou uvedeny v literatuře [9, 10], v následující části práce je popsána adhezní teorie tření.

Adhezní teorie suchého tření

Adhezní teorie, vytvořená Bowderem a Taboraborem [10], popisuje vznik tření jako kontinuální porušování adhezních spojů (mikrosvarů) vzniklých na nerovnostech kontaktních těles. Reálná plocha kontaktu S_r je pouze malou částí zdánlivé kontaktní plochy S_a . Z definice materiál nemůže odolat většímu tlaku než je jeho tvrdost. Pokud je tlak v nerovnostech kontaktních těles větší než je tvrdost materiálu dojde k deformaci povrchu a zvětšování kontaktní plochy S_r . Místo kontaktu se přizpůsobuje zatížení, dokud se tlak v kontaktu nevyrovná s tvrdostí materiálu. Pak můžeme psát:

$$\mu = \frac{F_t}{F_N} = \frac{S_r \tau}{S_r H} = \frac{\tau}{H} \quad (1.5)$$

Kde F_t je třecí, F_N normálová síla, H indentační tvrdost měkčího z kontaktních těles.

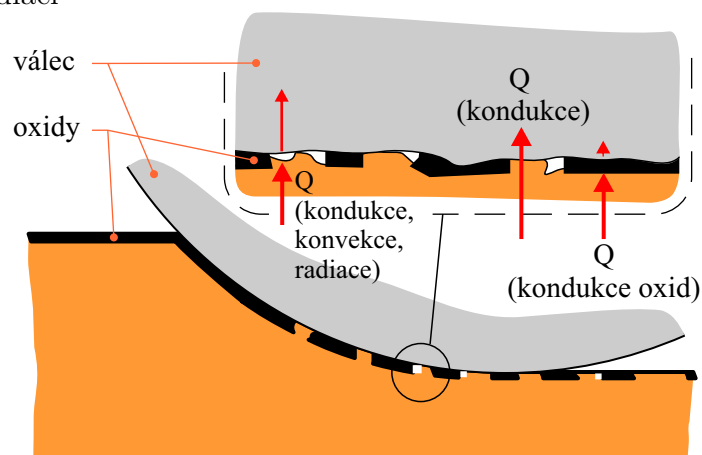
Při zpětném pohledu na tři zákony pro suché tření v Coulombově model z pohledu adhezivní teorie tření může psát:

- závislost třecí síly na kolmém tlaku je způsobena faktem, že obě hodnoty závisí na materiálových konstantách (charakterizující obě plochy) násobené hodnotou skutečné kontaktní plochy.
- skutečnost, že třecí síla nezávisí na zdánlivé kontaktní ploše lze objasnit pomocí faktu, že skutečná a nikoliv zdánlivá plocha řídí interakci mezi tělesy. A skutečná plocha nezávisí na ploše zdánlivé.
- slabá závislost třecí síly na rychlosti pohybu obou těles souvisí s malou závislostí mezi napětím a deformací v plastické oblasti většiny materiálů.

1.2 Tepelný odpor v kontaktu

Při kontaktu těles s rozdílnou teplotou dochází, vlivem nedokonalosti kontaktu, k vytvoření tepelného odporu bránící průchodu tepla. Přestup tepla mezi tělesy v kontaktu se může uskutečnit třemi mechanismy:

- přenos tepla vedením na nerovnostech povrchu v přímém kontaktu
- přenos tepla vedením a konvekcí přes mezery zaplněné tekutinou (vzduch, mazivo...)
- přenos radiací



Obrázek 1.3: Tepelný odpor v kontaktu ve válcovací mezeři

Celkový tepelný výkon Q procházející přes kontakt je pak součtem dílčích tepelných výkonů. Přestup tepla mezi dvěma tělesy v kontaktu vede k omezení tepelného toku, které nazýváme tepelný odpor v kontaktu R_k a je definován [11] jako :

$$R_k = \frac{\Delta T}{Q} \quad (1.6)$$

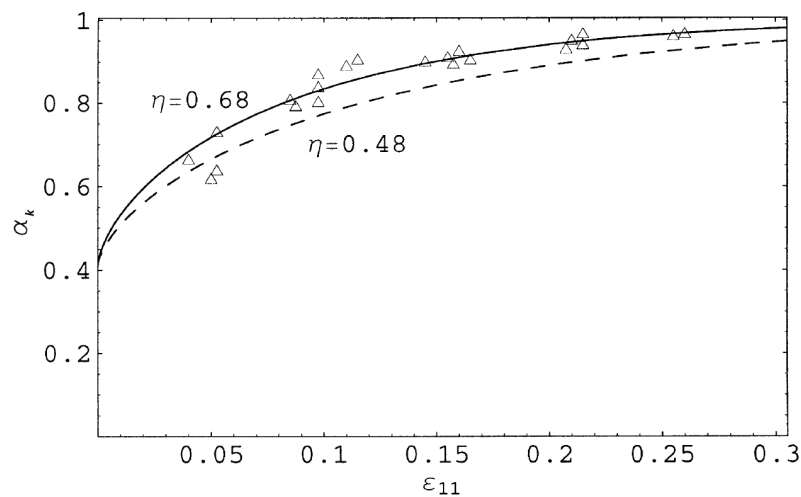
kde ΔT je teplotní pokles na rozhraní. Recipročně poté vyjádříme i součinitel přestupu tepla v kontaktu h_k .

$$h_k = \frac{1}{S_a R_k} = \frac{Q}{S_a \Delta T} = \frac{q}{\Delta T} \quad (1.7)$$

1.3. Technologie válcování - obecná teorie

Při elastickém kontaktu dvou těles je reálná plocha kontaktu S_r v porovnání se zdánlivou plochou S_a velmi malá (desetiny procenta). Pak ačkoli je tepelný tok přes kontaktní plochu na nerovnostech dominantní, do celkové teplotní bilance se projeví i přenos tepla přes mezery.

U tvářecích procesů, jako je válcování za tepla, dochází k rozsáhlé plastické deformaci a reálná kontaktní plocha je výrazně větší, v řádu desítek procent plochy zdánlivé (obrázek 1.4). Přenos tepla potom probíhá z podstatné části vedením na stykových plochách povrchových nerovnosti. U válcování za tepla navíc dochází k tvorbě sekundárních oxidů, které mají nižší vodivost než základní materiál a slouží jako dodatečná izolace bránící prostupu tepla. Celkový přehled situace ve válcovací mezeře dává obrázek 1.3.



Obrázek 1.4: Poměr reálné a zdánlivé kontaktní plochy α_k jako funkce přetvoření ϵ_{11} pro případ kování v zápustce, porovnání s experimentem [12]

Mimo empirických modelů odvozených z měření tepelných odporů v kontaktu (viz. kapitola 2.2) se výzkum zaměřuje také na teoretické odvození tepelných odporů [13, 14]. Podstatnou oblastí výzkumu je odvození reálné kontaktní plochy. Příkladem modelu kontaktu může být výzkum Stupkiewiczze pro odvození reálné kontaktní plochy při kování v zápustce [12].

1.3 Technologie válcování - obecná teorie

Válcování spadá do výrobní technologie objemového tváření, kdy je materiál tvářen mezi dvěma nebo více rotujícími válci. Při válcování dochází k plastické deformaci pouze v malé části tvářeného materiálu, v tzv. válcovací mezeře, vymezené kontaktní plochou pracovních válců [5].

Jako základní dělení válcování se obvykle považuje rozdělení podle vzájemné polohy os válců a průběhu deformace. Válcování pak rozdělujeme na:

- **válcování podélné**, kde jsou osy válců kolmé na osu válcovaného materiálu a podstatná část deformace probíhá v podélném směru.
- **válcování příčné**, osy válců jsou rovnoběžné s osou válcovaného materiálu a hlavní deformace probíhá v příčném průřezu.
- **válcování kosé**, kde jsou osy válců a materiálu mimoběžné. Tímto způsobem je možno ve středu materiálu vyvodit tahovou napjatost se vznikem trhliny pro výrobu bezešvých trubek.

V následujícím textu se popisuje pouze podélné válcování na hladkých pracovních válcích. Při tomto způsobu válcování je materiál vtahován do válcovací mezeru a přetvářen ve formě bram, bloků, plechů, pásu rozličných rozměrů.

Válcování může probíhat za nízkých teplot, respektive teplot nižší než je rekrytalizační teplota daného materiálu, pak se jedná o *válcování za studena*. Při tomto způsobu válcování dochází k deformaci krystalu kovu následkem čehož se mění také mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu a jeho krystalická struktura je usměrněna ve směru válcování. Pokud k válcování dochází v oblasti nad rekrytalizační teplotou, pak mluvíme o *válcování za tepla*. Po průchodu válcovací mezerou se krystalická mřížka regeneruje, mechanické vlastnosti se nemění a vývalek má obvykle normální krystalickou strukturu. [5]

1.3.1 Geometrie válcování

Základní geometrie pro podélné válcování je definována na obrázku 1.5. Polotovar má před vstupem do válcovací mezeru rozměry: výšku h_0 , šířku b_0 a celkovou délku l_0 . Po průchodu přes válců je průřez redukován na rozměry $h_1 \times b_1$ a konečnou délku l_1 . Pro ustálený stav válcování se definují následující parametry:

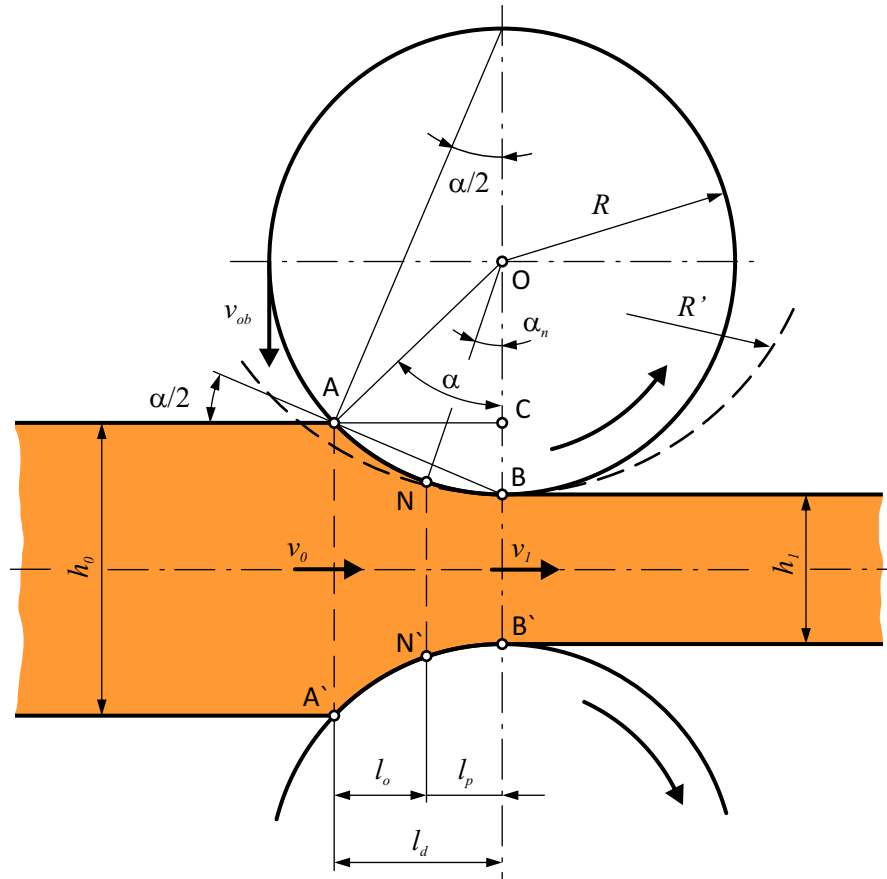
$$\Delta h = h_0 - h_1; \Delta b = b_1 - b_0; \Delta l = l_1 - l_0 \quad (1.8)$$

$$\varepsilon_h = \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100; \varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0} \cdot 100; \varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad (1.9)$$

Rovnice (1.8) představují výpočet absolutní deformace materiálu provalku během válcování pro jednotlivé délkové rozměry. Parametry ε (1.9) vyjadřují poměrnou deformaci vztaženou k původnímu rozměru vyjádřenou v procentech.

Na základě platnosti zákona stálosti objemu tvářeného tělesa lze určit rozměrové změny válcovaného materiálu. Podíl jednotlivých rozměrů před a po válcování označujeme jako součinitel stlačení γ , součinitel šíření β a součinitel prodloužení λ . Pomocí těchto součinitelů můžeme vyjádřit zákon zachování podle rovnice (1.10). Součinitel prodloužení λ lze určit s délkou provalku před a po válcování nebo z podílu průřezů provalku před a po průchodu válcovací mezerou (1.11).

$$\frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{l_1}{l_0} = \gamma \cdot \beta \cdot \lambda = 1 \quad (1.10)$$



Obrázek 1.5: Základní rozměry pro podélné válcování hladkými válci [5]

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{b_0 h_0}{b_1 h_1} \quad (1.11)$$

Záběrový úhel α (1.12) je vypočítán z trojúhelníku AOB (dle obrázku 1.5), kde R je poloměr pracovního válce.

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{2R} \right) \quad (1.12)$$

Délka geometrického pásma deformace l_d (1.13) představuje průmět stykového oblouku \widehat{AB} do horizontální roviny. Pro malé úhly záběru je možno výraz zjednodušit zanedbáním hodnoty absolutního úběru tloušťky ve vyšší mocnině.

$$l_d = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \doteq \sqrt{R\Delta h} \quad (1.13)$$

Při odvozování základních geometrických parametrů válcování se předpokládá tuhý, nedeformovatelný pracovní válec. Tento předpoklad je použitelný pouze pro malé válcovací síly. Při reálném válcování vždy dochází, v různé míře, k ohybu a deformaci pracovního válce. Pro korekci chyby se zavádí válec se zvětšeným poloměrem, který prodlužuje kontaktní délku při zachování stykového oblouku ve formě kruhové výseče. Výpočet vychází z Hertzovy teorie kontaktu řešeného dle Hitchcocka [15]. Hodnota

poloměru válce R' závisí na materiálových vlastnostech válce (E, ν), velikosti úběru Δh , střední šířce provalku b_s a celkové válcovací síle F_v podle vzorce (1.14). Opravené hodnoty záběrového uhlu α' a délky pásma deformace l'_d pro deformovaný válec se vypočítají dle uvedených rovnic (1.15) a (1.16).

$$R' = R \left[1 + \frac{16(1 - \nu^2) F_v}{\pi E \Delta h b_s} \right] \quad (1.14)$$

$$\alpha' = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{2R'} \right) \quad (1.15)$$

$$l'_d = \sqrt{R' \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \doteq \sqrt{R' \Delta h} \quad (1.16)$$

1.3.2 Rychlost a deformace materiálu ve válcovací mezeře

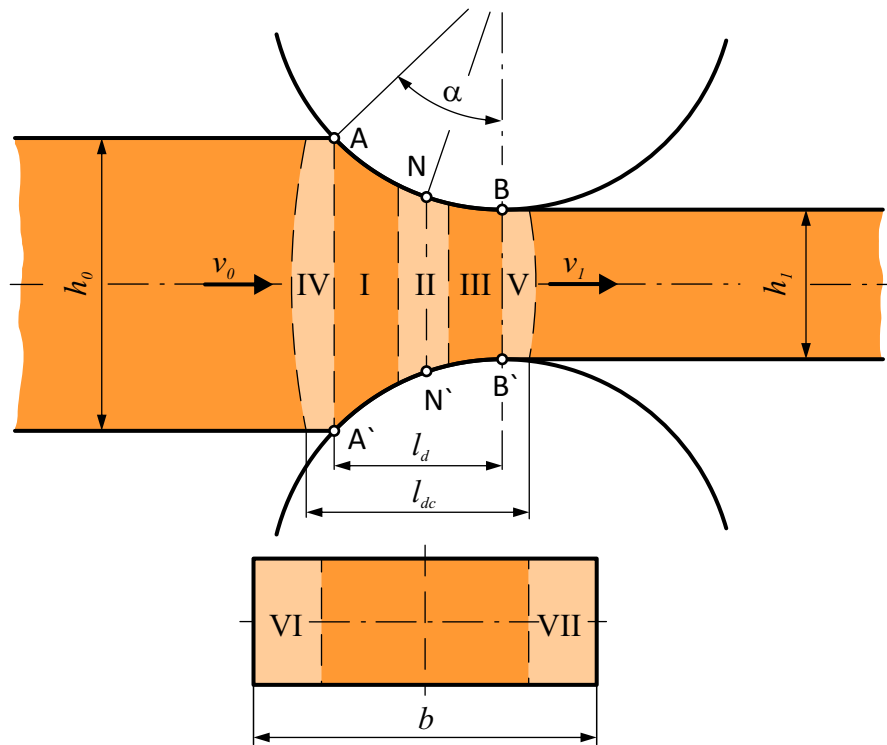
Pro analýzu pohybu materiálu ve válcovací mezeře uplatňujeme zákon kontinuity. Objemový tok materiálu procházející libovolným kolmým řezem pásma deformace je konstantní (1.17) [5].

$$v_1 = v_0 \frac{b_0 h_0}{b_1 h_1} = v_0 \lambda \quad (1.17)$$

Střední rychlost materiálu vstupující do pásma deformace označujeme jako v_0 , v_1 označuje střední rychlost materiálu vystupující z pásma deformace. Pracovní válce mají konstantní rychlost otáčení, a proto i jejich obvodová rychlost v_{ob} je stálá. Rychlost tvářeného materiálu se však musí měnit pro zachování kontinuity toku.

Při jednodušších modelech válcování (Kármán aj.) předpokládáme existenci dvou pásem s rozdílným průběhem rychlostí a deformace. V pásmu opožďování (l_o), vymezeným rovinami AA' a NN', je rychlost válcovaného materiálu menší než vodorovná složka obvodové rychlosti válce. V pásmu předstihu (l_p), vymezená rovinami NN' a BB', naopak dochází k předstihu válcovaného materiálu oproti povrchu válce. Mezi těmito pásmy existuje oblast, kde je vodorovná složka obvodové rychlosti válce totožná s rychlostí válcovaného materiálu, tzv. neutrální bod vymežující neutrální rovinu NN'. [5]

Průběh deformace a rychlosti ve válcovací mezeře ovlivňuje především nerovnoměrná deformace závisící na geometrickém faktoru l_d/h_s , kde hodnota h_s představuje střední výšku materiálu ve válcovací mezeře. Při geometrickém faktoru větším než 1 dochází k deformacím tlakovým napětím po celé výšce příčného průřezu. Povrchové vrstvy válcovaného materiálu mají rozdílnou rychlost než střední část což vede ke vzniku nerovnoměrné deformace a napětí. S nárůstem geometrického faktoru dochází k postupné homogenizaci deformace po výšce. Při geometrickém faktoru l_d/h_s menším než 0.5 tlaková deformace neproniká až ke středu válcovaného materiálu.



Obrázek 1.6: Schéma pásem deformace ve válcovací mezeře

Uplatňuje se vliv tuhých konců a ve středové části materiálu dochází ke vzniku tahového napětí [16].

Pro obecný model válcování můžeme předpokládat, že ve válcovací mezeře existuje sedm pásem s rozdílným průběhem deformací a rychlostí (schématicky znázorněné na obrázku 1.6). Pásmo opožďování I a pásmo předstihu III doplňuje pásmo přilnutí rozšiřující neutrální bod na oblast II. Lze také pozorovat rozšíření pásma deformace za hranice geometrického pásma deformace (IV, V) tj. pásmo vzniku a útlumu deformace. Při příčném toku materiálu pak ještě existující oblasti VI, VII pásma šíření. Konkrétní rozložení pásem ve válcovací mezeře závisí na mnoha faktorech válcování jako jsou to geometrické parametry l_d/h_s , l_d/b_s , Δh , rychlost válcování, koeficient tření aj. [16]

1.3.3 Kontaktní napětí ve válcovací mezeře

Jednou z nejdůležitějších úloh teorie válcování je stanovit rozložení kontaktního napětí mezi válcem a tvářeným materiálem, respektive určit válcovací síly. Mezi hlavní faktory ovlivňující výsledné rozložení patří geometrie a tření na rozhraní válce a provalku. Pro řešení této úlohy můžeme využít různé přístupy. Jednou ze základních metod pro řešení je metoda tenkých řezů, jiný přístup využívá metodu skluzových čar, případně metodu končených prvků.

Řešení napětí pomocí metody tenkých řezů

Analytické řešení napětí ve válcovací mezeře je obecně komplikované. Klasický matematický popis válcování používá metodu tenkých řezů k uvolnění elementu ve válcovací mezeře, kdy je rychlost, přetvoření a napětí závislé pouze na poloze podél pásma deformace. Jako první publikoval model a řešení Kármán ve své práci [17]. Při řešení pomocí této metody zavádíme několik zjednodušujících předpokladů [18]:

- ve válcovací mezeře existuje pouze rovinná deformace, nedochází k šíření
- směry hlavních napětí jsou totožné se směry os souřadného systému
- hlavní napětí se ve směru kolmém na směr aplikovaných napětí nemění
- koeficient tření je konstantní v celé délce záběrového oblouku
- třecí síly jsou omezeny jen na kontaktní plochy, vliv tření na distorzi kovu nebo hlavní směry napětí je zanedbáván.
- uvolněné řezy zůstávají rovinné i po přetvoření, deformace je považována za homogenní
- elastická deformace válcovaného materiálu je zanedbatelná v porovnání s plastickou deformací, elastická deformace pracovních válců je zanedbána.
- válcovaný materiál se nezpevňuje vlivem deformace

Pro silové rovnice rovnováhy na elementárním prvku (1.18) vycházíme z uvolnění dle obrázku 1.7.

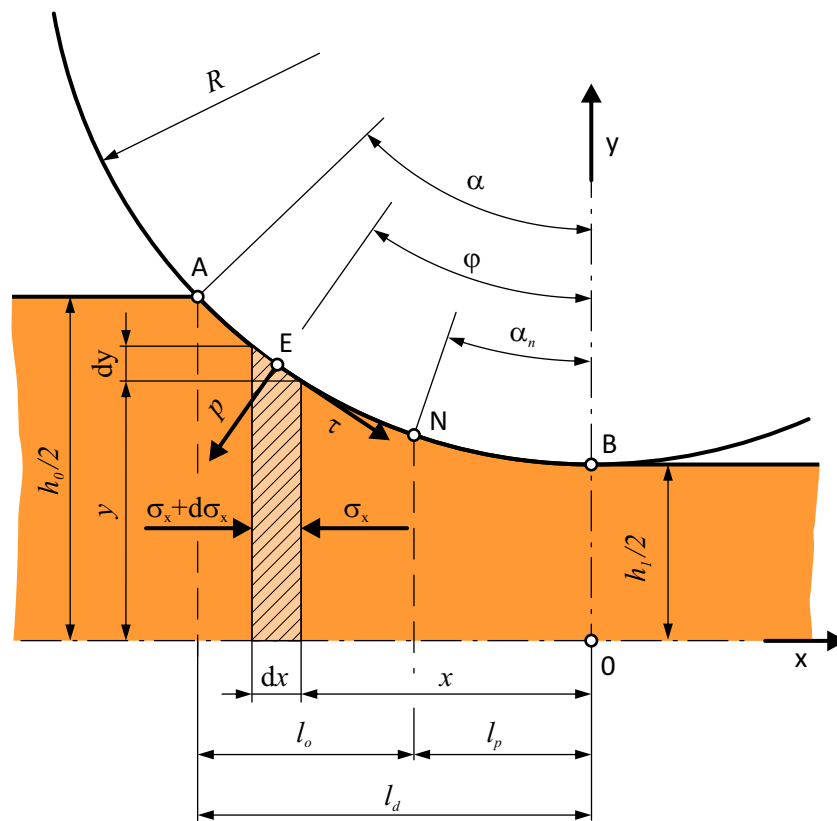
$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{p - \sigma_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau}{y} = 0 \quad (1.18)$$

Uvolnění je prováděno zvláště pro pásmo opožďování (AN) a pásmo předstihu (NB). Rozdíl spočívá ve směru tečného napětí τ znázorněné v rovnici (1.18) členem $\pm\tau/y$. Řešení pro jednotlivé zóny pak využívá rovnici (1.18) s příslušnou orientací tečného napětí (správným znaménkem).

Při rovinné deformaci můžeme zapsat podmínku plasticity ve formě $\sigma_1 - \sigma_3 = k$, kde σ_1, σ_3 jsou hlavní napětí a k konstanta rovnice plasticity. Hlavní napětí ztotožníme s napětím ve směrech os souřadného systému x, y odvozené rovnice rovnováhy elementárního prvku ($\sigma_1 = p, \sigma_3 = \sigma_x$). Hodnota k závisí na zvolené podmínce plasticity, pro podmínku maxima smykových napětí τ_{max} je hodnota k rovna mezi kluzu σ_k , pro energetickou podmínku HMH je $k = 2/\sqrt{3} \cdot \sigma_k$.

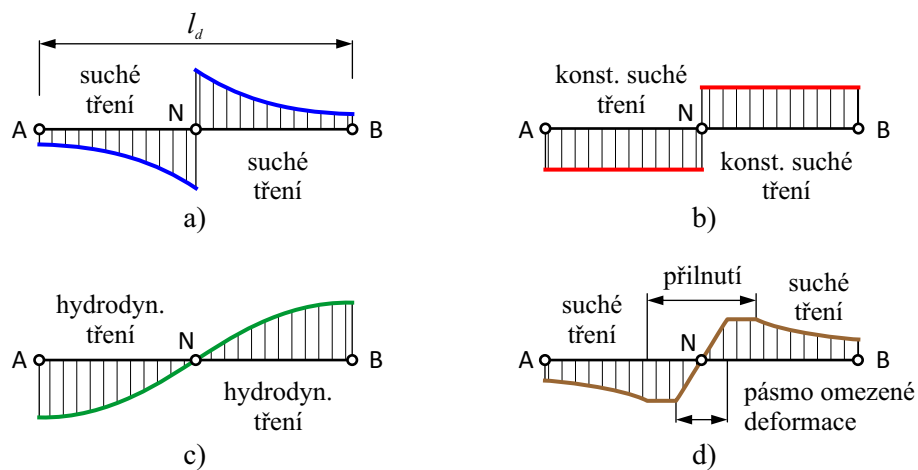
Při řešení rovnice (1.18) je podstatné znát vztah mezi normálovou a tečnou složkou napětí v kontaktu, respektive podstatu tření. Při řešení dle Kármána je hodnota tečného napětí přímo úměrná normálové síle podle Coulombova modelu pro suché tření (1.1). Finální diferenciální rovnice pak vypadá:

$$\frac{dp}{dx} - \frac{k}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{p\mu}{y} = 0 \quad (1.19)$$



Obrázek 1.7: Síly a napětí na elementárním prvku ve válcovací mezeře [5]

Jiní autoři využívají pro řešení rovnice (1.18) jiných modelů tření, případně předpokládají více pásem s rozdílným chováním ve válcovací mezeře [16].

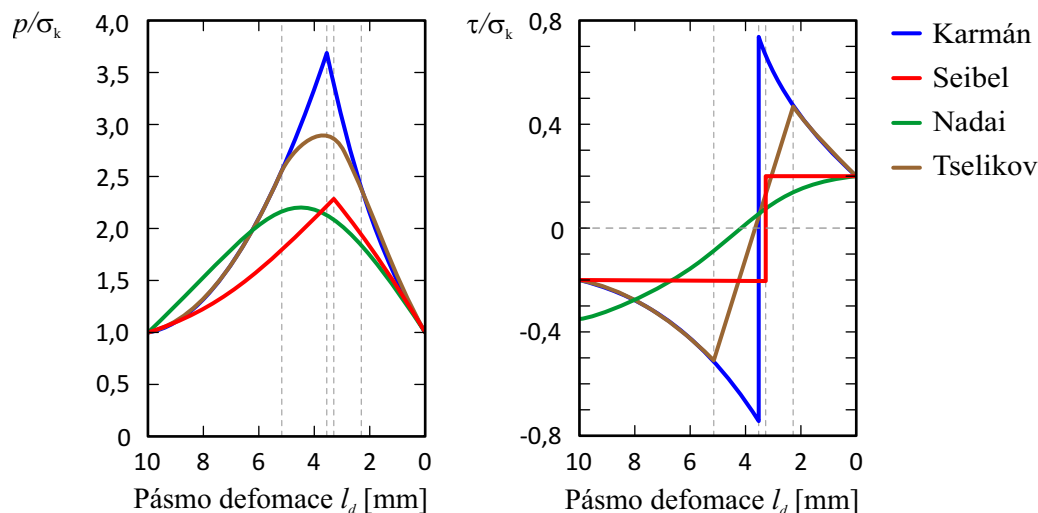


Obrázek 1.8: Tření ve válcovací mezeře pro různá řešení [18]

Siebelovo řešení [19] je pro případ suchého tření s konstantní velikostí třecí síly (1.2) (obrázek 1.8-b). Nadai [20] předpokládá hydrodynamické tření ve válcovací mezeře, kdy tečné napětí v kontaktu je úměrné dynamické viskozitě maziva η , tloušťce vrstvy maziva a příslušného gradientu rychlosti (1.4) (obrázek 1.8-c). Orowan [21] předpokládá řešení pro případ, kdy v celé válcovací mezeře dojde k přilnutí. Tselikovo

řešení [22] předpokládá existenci více pásem s rozdílným chováním. Zóna I a III (dle obrázků 1.6, 1.8-d) je charakterizována suchým třením, v zóně II dojde k přilnutí a vytvoření pásma omezené deformace.

Srovnání jednotlivých modelů válcování řešených dle různých autorů [18] je přehledně znázorněno na obrázku 1.9. Parametry válcování použité při řešení jsou: $h_0 = 2 \text{ mm}$, $h_1 = 1 \text{ mm}$, $R = 100 \text{ mm}$, $\mu = 0,2$.



Obrázek 1.9: Rozložení napětí ve válcovací mezeře podle různých autorů [18]

Předpoklad homogenní deformace po výšce provalku omezuje řešení na případy kdy je poměr mezi velikostí pásma deformace l_d a střední výškou provalku h_s větší než 1. Čím větší je tento poměr, tím více homogenní deformace nastane. Předpoklad rovinné deformace, neexistence šíření, je dobře splněn pro střední rovinu u válcování širokých provalků, respektive situace, kdy poměr mezi střední šířkou provalku b_s je větší než délka pásma deformace. Čím větší je tento poměr, tím větší šířka splňuje podmínku rovinné deformaci předpokládané při řešení [16].

Výše uvedený model válcování je v současné době stále hojně rozšířen pro jeho jednoduchost a poměrně přesné výsledky při respektování limitů vyplývajících ze zjednodušení sepsaných výše. Během posledních sedmdesáti let bylo řešení pomocí tenkých řezů dále zlepšováno tak, aby dokázalo postihnout širší spektrum válcování. Podstatná modifikace uvažuje s deformací válce a s nehomogenním průběhem deformace po výšce provalku. Například Ehmman [23] využívá nehomogenní model k dynamické analýze válcování. Lenard [2] uvažuje nejen deformaci válce, ale také elastickou deformaci na začátku a konci válcovací mezery.

1.3.4 Teplotní zatížení ve válcovací mezeře

Vzhledem k rozdílným teplotám pracovního válce a válcovaného materiálu dochází při kontaktu ve válcovací mezeře k tepelným tokům mezi těmito tělesy. U válcování

za tepla směřuje dominantní tepelný tok z provalku do pracovního válce, pro případ válcování za studena závisí směr tepelného toku na parametrech válcování a počáteční teplotě. Schématicky jsou tepelné toky při válcování zobrazeny na obrázku 1.10.

Proces tepelného kontaktu je popsán rovnicí vedení tepla s využitím součinitele přestupu tepla v kontaktu pro popis nedokonalosti přechodu tepla mezi tělesy. Popis tepelného odporu při kontaktu mezi tělesy je popsán v kapitole 1.2. Pro tepelnou bilanci je dále potřeba počítat s teplem generovaným ve válcovací mezeře, kde existují dva hlavní mechanismy:

- teplo vzniklé při plastické deformaci

$$q_p = \eta \sigma_0 \dot{\varepsilon} \quad (1.20)$$

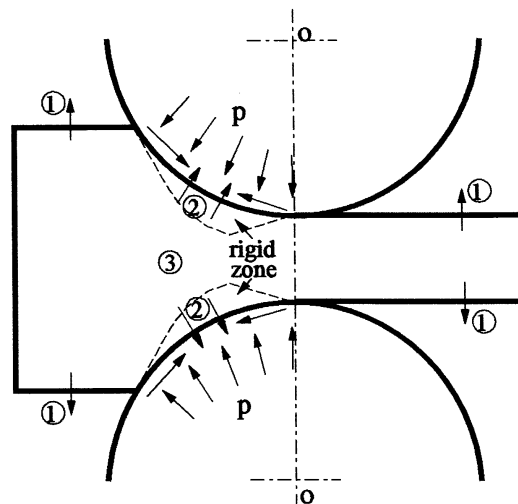
kde σ_0 představuje ekvivalentní napětí, $\dot{\varepsilon}$ je poměrné ekvivalentní přetvoření a hodnota η určuje efektivitu přeměny v rozmezí 0 až 1, obvyklá hodnota je 0,9.

- teplo vyvinuté třením.

$$q_t = \tau \cdot v \quad (1.21)$$

τ představuje smykové napětí v kontaktu, v je rozdíl povrchových rychlostí válcem a provalku. Tato hodnota se v podél válcovací mezery mění, v neutrálním bodě je nulová.

U válcování za tepla je celkové generované teplo nevýznamné, vzhledem k vysoké teplotě provalku a tepelný tok do válce není příliš ovlivněn. U válcování za studena je generování tepla ve válcovací mezeře nežádoucím efektem ovlivňující zejména velikost třecí síly a tím i proces válcování.



Obrázek 1.10: Schéma teplotních toků při válcování: (1) – Odvod tepla z válcovaného materiálu mimo válcovací mezeru, (2) – přenos tepla mezi válcem a provalkem, generování tepla třením, (3) - generování tepla plastickou deformací [24]

2

Měření okrajových podmínek ve válcovací mezeře

Tato kapitola se zabývá literární rešerší metod používaných k určení okrajových podmínek ve válcovací mezeře, speciálně se zaměřuje na měření koeficientu tření a součinitele přestupu tepla, respektive teplotního odporu v kontaktu.

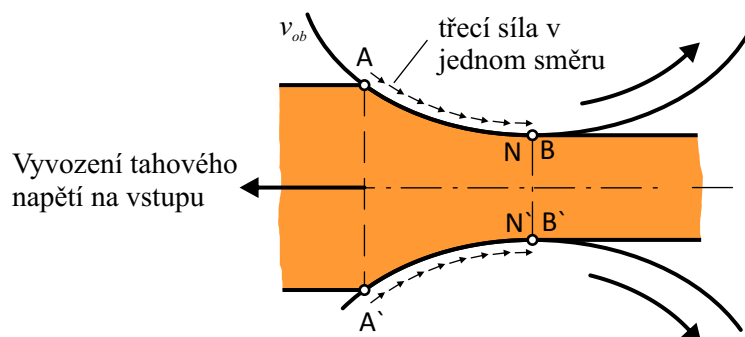
2.1 Měření koeficientu tření ve válcovací mezeře

Pro určení koeficientu tření μ je potřeba určit rozložení kontaktních napětí ve válcovací mezeře. Dle Coulombova modelu (1.1) je hodnota koeficientu tření rovna podílu smykového a normálového napětí v kontaktu.

2.1.1 Měření průměrné hodnoty koeficientu tření

K měření průměrné hodnoty koeficientu tření na oblasti kontaktu válce s válcovaným materiálem při ustáleném válcování bylo popsáno několik metod [18]. Metody lze v zásadě rozdělit na dva přístupy.

Inverzní přístup využívá modely pro výpočet některých z parametrů válcování (válcovací síla, hodnotu předstihu ap.), kde koeficient tření je jedním ze vstupních hodnot. Inverzně je tento model využit na výpočet hodnoty koeficientu tření. Výsledky pak s velké částí závisí na kvalitě použitém modelu, respektive rozdílem mezi skutečností a předpoklady použitého modelu.



Obrázek 2.1: Situace při prokluzu válce [18]

Přímé měření průměrné hodnoty koeficientu tření využívá situaci při prokluzu válce. Pomocí vyvozeného tahového napětí ve vstupní nebo výstupní rovině, případně

zvětšením úběru se posouvá neutrální rovina (NN') směrem k výstupní nebo vstupní rovině. Při proklouznutí válce pak nastává situace, kdy třecí síly působí podél válcovací mezery v jednom směru (schéma na 2.1) a mohou být proto jednoduše započteny do silové rovnováhy ve válcovací mezeře.

V práci [25] Pavlov postupně zvyšuje tahové napětí na vstupu. Na druhou stranu Whitton a Ford [26] zvyšují tah ve výstupní rovině dokud neutrální rovina není za výstupem z válcovací mezery, koeficient tření pak lze vypočíst z válcovací síly F_v , momentu M_v a poloměru válce R (2.1).

Zvyšováním úběru nastane skluz válce tehdy, když tangenta záběrového úhlu dosáhne hodnoty koeficientu tření (2.2).

$$\mu = \frac{M_v}{F_v R} \quad (2.1)$$

$$\mu = \tan \alpha \quad (2.2)$$

2.1.2 Optické metody měření kontaktních napětí

Mezi metody měření kontaktních napětí můžeme zahrnout také modelové válcování s použitím fotoelastického materiálu, nebo s využitím kaustických efektů při odrazu nebo lomu světla. V šedesátých letech při studiu válcování [27, 28], byl použit pracovní válec vyroben z epoxidové pryskyřice při válcování vzorku z olova a celuloidu. Analýza výsledků však byla obtížná vzhledem vyvozenému trojosému stavu napjatosti v kontaktních tělesech.

Jinou optickou metodou měření kontaktních napětí je kaustická reflexní metoda [29]. Tako metoda analyzuje kaustické obrazce při odrazu světla na čele pracovního válce vyrobeného z plexiskla během válcování olověného vzorku.

Vzhledem k nemožnosti aplikovat tyto metody v podmínkách reálného válcování jsou tyto přístupy použitelné pouze v omezeném rozsahu pro srovnávací studie.

2.1.3 Měření lokální hodnoty tření pomocí pinu

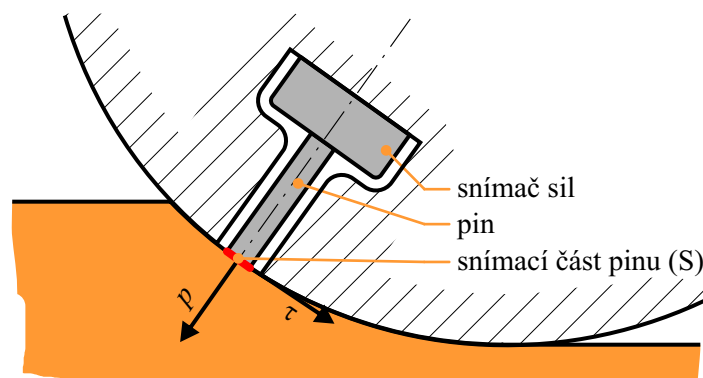
Metody měření s použitím pinu jsou nejstarší metodou měření lokální hodnoty napětí ve válcovací mezeře. Pin senzor¹ představuje vetknutý nosník umístěný uvnitř pracovního válce (viz. obr. 2.2). Na volném konci je nosník zatížen silami při kontaktu s válcovaným materiálem. V místě vetknutí jsou snímány reakční síly odpovídající silám na volném konci. Případně jsou síly získány na základě sledování deformace celého pinu. Získané hodnoty lokálních napětí jsou průměrnou hodnotou napětí na snímací ploše pinu, volbou jeho velikosti proto ovlivňujeme výsledné rozlišení měření.

¹Název pin senzor je převzat z anglické literatury ve významu definovaném výše. Doslovný český překlad je příliš obecný a nevystihuje podstatu měřicí metody

2.1. Měření koeficientu tření ve válcovací mezeře

K vlastnímu snímání sil je možno použít celou škálu fyzikálních principů. Mezi nejoblíbenější metody patří tenzometrické snímání deformace měřícího elementu s následným přepočtem na velikost síly. Jinou populární metodou je použití piezoelektrického jevu, kdy je snímán náboj generovaný na krystalu piezoelektricky aktivní látky jehož velikost je úměrná zatěžující síle. Ostatní metody testované při měření kontaktních napětí pro technologii tváření lze nalézt v literatuře [30].

Použitím vhodného převodníku sil a odpovídající konstrukce pinu je možno měřit kontaktní napětí ve třech nezávislých osách a vyhodnotit koeficient tření nejen v obvodovém, ale i příčném směru válcovací mezery.



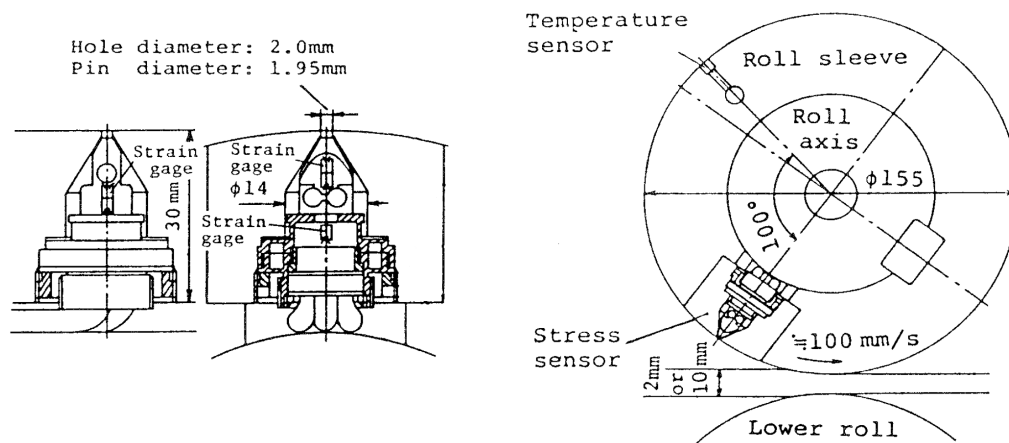
Obrázek 2.2: Schéma pin senzoru

V třicátých letech Siebel a Lueg [31] použili metodu měření pomocí pinu pro stanovení lokální hodnoty normálového napětí ve válcovací mezeře při válcování mědi. Pro měření síly byl použit piezoelektrický prvek a měřící element zabudovaný v testovacím válci byl čtvercový pin o rozměrech 2x2 mm. V roce 1948 se Hitchcock [32] pokusil o první implementaci pin senzoru schopného měřit normálové a tečné síly k určení koeficientu tření. Kontaktní plocha pinu měla kruhový průřez o průměru 2,6 mm. Pro snímání sil bylo tělo pinu osazeno tenzometry. Výsledky experimentů nebyly pro tečný směr příliš přesvědčivé, signál byl ovlivněn vytlačněním tvářeného materiálu do prostoru okolo pinu.

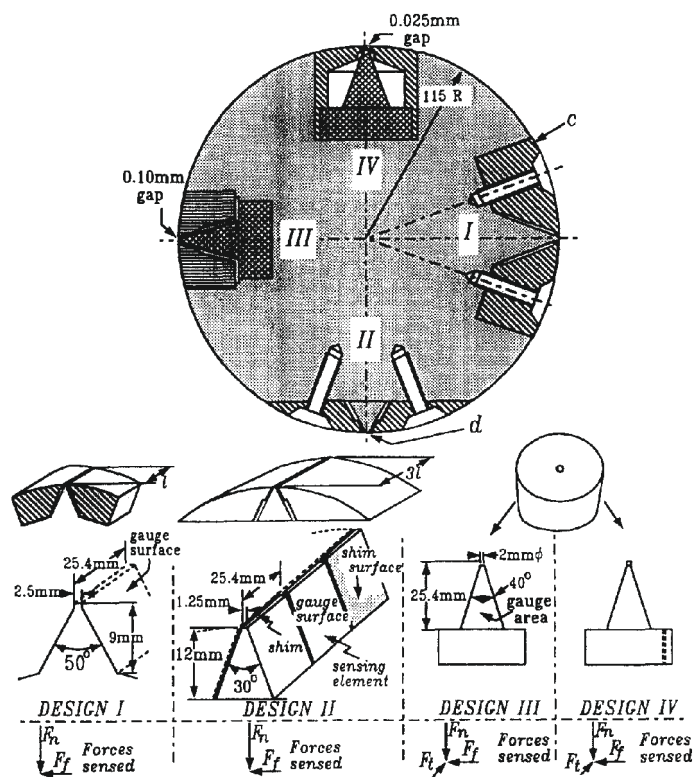
Ucelenou sérii měření podnikl Hatamura [33, 34, 35]. Pin senzor měl formu seříznutého kužele s kontaktní plochou o průměru 1,95 mm (obrázek 2.3). Základna pinu byla osazena tenzometry pro měření kontaktních napětí působících na vrcholu pinu. Ve válci byl zabodován také termočlánek pro měření součinitele přestupu tepla ve válcovací mezeře. Senzor vycházel z předchozího vývoje senzoru pro měření kontaktních napětí uvnitř formy pro kování v zápustce [36].

Nejrozsáhlejší výzkum v oblasti měření tření ve válcovací mezeře pomocí metody jednoho pinu podnikl Jeswiet se svým týmem na Queen's university v Kanadě [37, 38, 39]. Během let vyvinuli několik typu konických pinů (viz obrázek 2.4) využívající tenzometry pro snímání deformace ve třech osách. První generace ještě mají liniovou kontaktní plochou a jsou konstruovány jako klín. Tato konstrukce umožňovala snímat

2. Měření okrajových podmínek ve válcovací mezeře



Obrázek 2.3: Implementace pin senzoru do válce dle Hatamury [33]

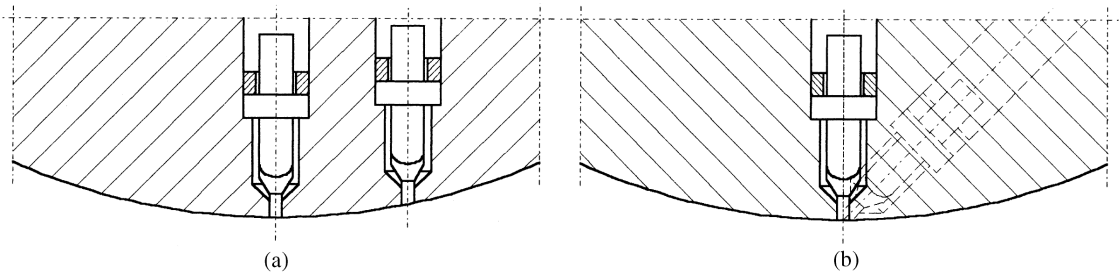


Obrázek 2.4: Schématické znázornění vývoje senzorů pro měření kontaktních napětí ve válcovací mezeře v pracích Jeswieta[37]

tečná napětí pouze v obvodovém směru válce. Rozdíly v konstrukci mezi generacemi jsou dány rozdílným uchycením základen kuželů ve válci, rozdílem průměrů pinů, optimalizací tvarů z pevnostního hlediska a zvětšení plochy pro umístění tenzometrů. Poslední generace pinu má tvar seříznutého kužele o výšce přibližně 25 mm s kontaktní plochou o průměru 2 mm. Na plášti kužele jsou nalepené snímací tenzometry pro určení kontaktních napětí ve třech osách.

Metody měření s více piny

K měření normálových a tečných napětí lze využít instalace více pinů, kde jeden zaznamenává pouze normálový tlak v kontaktu, ostatní piny pak měří mix normálového a tečného napětí. Rozdílem signálů můžeme separovat normálová a tečná napětí. Měřicí piny mohou být umístěny v jedné rovině válcování (a), případně ve dvou různých válcovacích rovinách (b), kdy jeden z pinů je natočen pod úhlem ϑ dle obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Umístění dvojice měřících pinů ve válci [40]

$$\mu = \left(\frac{O_{tp}}{O_p} - 1 \right) / \tan \vartheta \quad (2.3)$$

kde O_{tp} je výstupní signál z pinu měřícího mix normálového a tečného kontaktního napětí; O_p je výstupní signál z pinu měřícího normálové kontaktní napětí; ϑ úhel mezi piny.

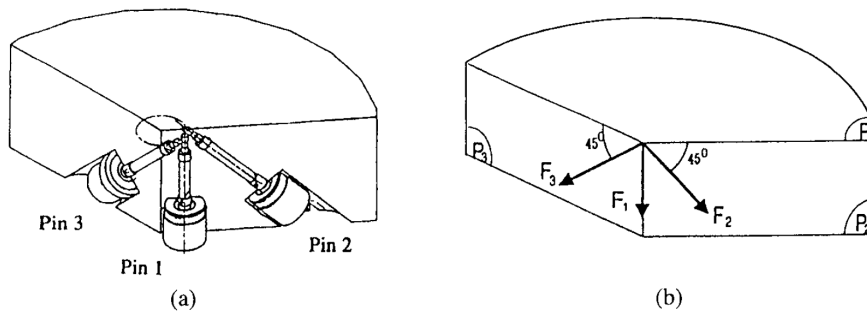
První použití dvojice pinů je zaznamenáno v padesátých letech. Van Rooyen [41] použil tuto techniku pro měření normálových a smykových napětí při válcování hliníku za studena. Průměr pinu při experimentech byl 1,6 mm. Poslední vývoj dvou pinové metody je zaznamenán u autorů Liu, Tieu [42], kteří využívají dvojici pinů instalovaných ve válci rovněž při válcování hliníku za studena. Hlavní parametry instalace jsou: průměr pinu 2 mm; velikost mezery mezi pinem a válcem 0,027 mm; úhel mezi piny je 25°.

Podpovrchová instalace pinu

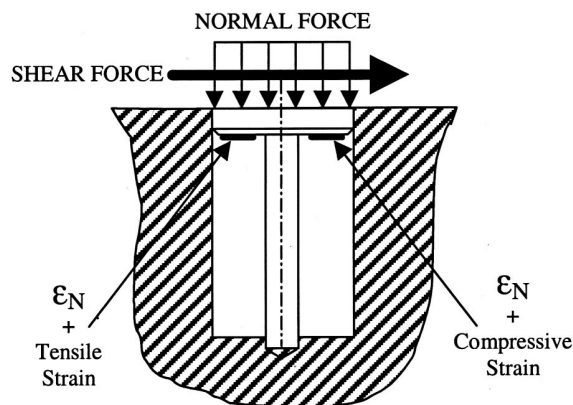
Mezi hlavní nedostatky pin senzoru patří vytlačování tvářeného materiálu do mezery mezi pinem a dírou. Pro odstranění těchto vlivů bylo testováno umístění pinu pod neporušeným povrchem.

Pro měření normálového napětí ve formách je užití této techniky poměrně běžné. Pin a vlastní snímač síly je umístě ve slepé díře. Deformace dna této díry přenáší vnější síly na snímací prvek který zaznamenává sílu úměrnou normálovému napětí ve formě.

Pro účely měření tečných napětí v kontaktu byl přístup modifikován použitím trojice podpovrchových snímačů sil ve třech osách [43, 44] (obrázek 2.6). Pomocí jednoduché úlohy pružnosti jsou zaznamenané síly přepočteny na povrchová normálové i tečná kontaktní napětí.



Obrázek 2.6: Trojice silových senzoru s piny umístěná pod povrchem [43]



Obrázek 2.7: Schéma zatížení měřicího disku s vyznačením umístění tenzometrických snímačů [45]

Jiný přístup využívá měřicí disk, který je z jedné strany zatížen silami v kontaktu a z druhé strany jsou umístěny tenzometrické snímače zaznamenávající jeho deformaci k vyhodnocení smykových napětí (obrázek 2.7). Tento snímač byl zatím testován pro malé síly a jeho vývoj se nachází ve stádiu „proof of concept“ [45].

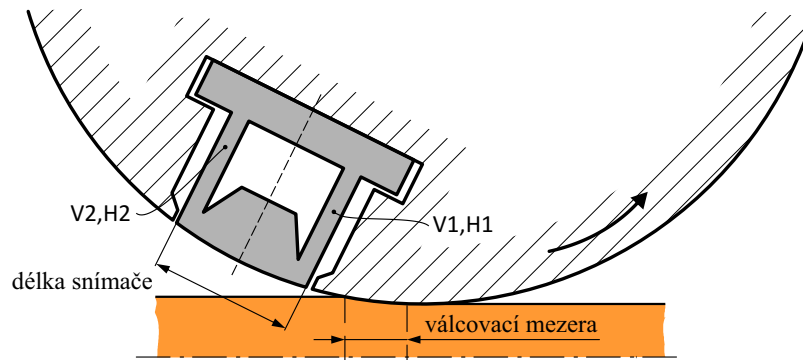
O podpovrchovou instalaci pin-senzoru pro válcování je zmínka v několika pracích [46], ale tato měření nebyla příliš úspěšná.

2.1.4 Integrovaní měření tření

Metoda spočívá v měření deformace měřicího elementu vstupujícího do válcovací mezery, kdy na rozdíl od metody měření pomocí pinu je velikost měřicího elementu větší než velikost válcovací mezery. Průběh normálových a tečných napětí podél válcovací mezery je vypočtena derivací záznamu síly na elementu během vstupu do mezery.

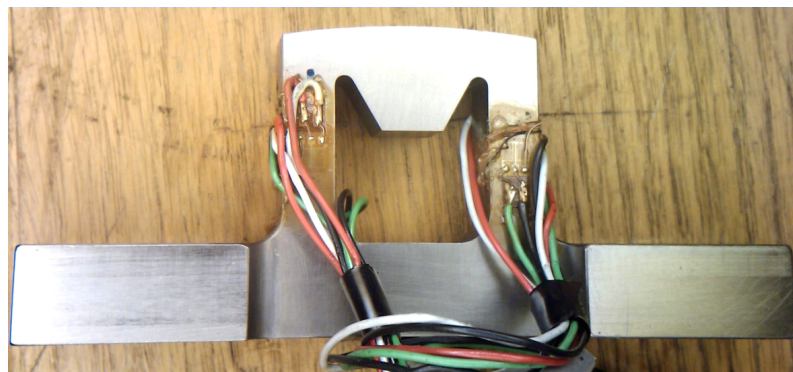
2.1. Měření koeficientu tření ve válcovací mezeře

Použitím této metody pro měření tření ve válcovací mezeře se věnuje Lagergren s Wanheimem. V sedmdesátých letech Wanheimem sestavili simulátor válcování schopný měřit lokální hodnoty napětí ve válcovací mezeře [47]. Vylepšená varianta senzoru (ROLLSURF) [48, 49] využívá stejného principu, ale snímač byl implementován do pracovního válce ve válcovací stolici a použit pro poloprovodní měření.



Obrázek 2.8: Integrovní snímač kontaktních napětí ve válcovací mezeře [48]

Snímač je složen z tuhého nosníku délky 40 mm umístěném na dvou oporách osazených tenzometry. Kontaktní plocha snímače vytváří souvislou plochu pracovního válce přerušovanou jen malou mezerou umožňující částečnou deformaci pod zatížením (obrázek 2.8). Osazené tenzometry snímají síly (deformaci) v jednotlivých oporách nosníku v horizontálním a vertikálním směru.

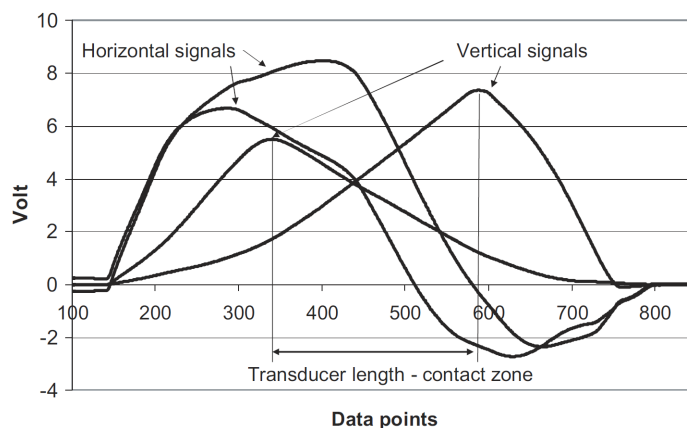


Obrázek 2.9: ROLLSURF - Měřicí nosník osazený tenzometry

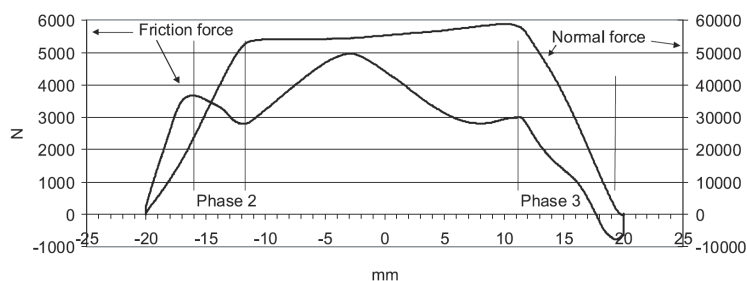
Ze čtveřice signálů pro jednotlivé opory a směry V1,H1,V2,H2 (obrázek 2.10) je pomocí kalibrační procedury vypočtena celková normálová a třecí síla na povrchu snímače (obrázek 2.11). Jejich derivací podle polohy následně získáme průběh normálového a tečného tlaku ve válcovací mezeře.

Z grafu na obrázku 2.11 jsou důležité jenom části, kde snímač vstupuje do válcovací mezery (phase 1–4). V oblasti od -12 až 12 mm je snímač v plném kontaktu s válcovací mezerou a neposkytuje užitečný signál.

2. Měření okrajových podmínek ve válcovací mezeře



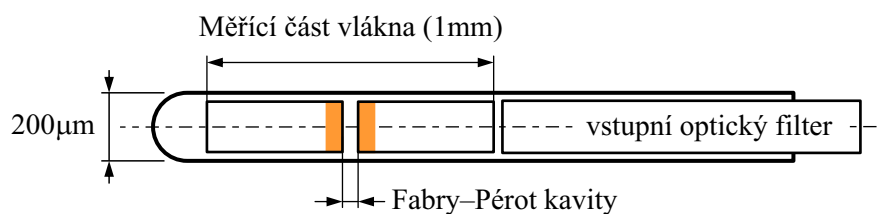
Obrázek 2.10: Výstupní signál z tenzometrů během průchodu snímače válcovací mezerou [48]



Obrázek 2.11: Průběh normálové a třecí síly na povrchu snímače během průchodu snímače válcovací mezerou [48]

2.1.5 Součinitel tření z inverzního výpočtu kontaktních napětí

Inverzní výpočet kontaktních napětí vychází z představy měření deformace válce ve známé hloubce pod povrchem. S použitím inverzní úlohy pružnosti můžeme následně vypočítat odpovídající napětí na povrchu válce. První aplikaci metody a testovací měření prováděl Meierhofer a Stelson na Minnesotské univerzitě [50, 51]. Byl zde sestaven testovací válec se zabudovanými tenzometry měřící radiální a tečnou deformaci ve dvou poloměrech válce (r_a, r_b). Jako válcovaný materiál bylo využito olovo. Změřený signál převedený na mechanické napětí je zapsán ve formě Fourierovy řady. Při řešení je poté vznesen předpoklad rovinné napjatosti ve válci. S využitím naměřených hodnot deformací ve dvou polohách ve válci lze nalézt řešení rozložení napětí na povrchu válce.



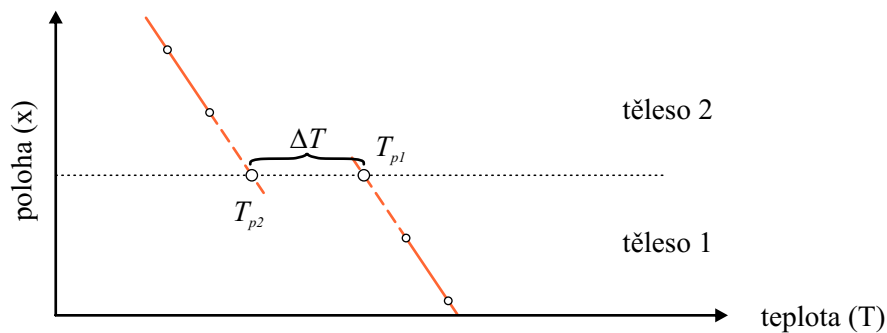
Obrázek 2.12: Schématická ukázka měřící části optického vlákna

Nová implementace inverzního výpočtu třecích sil podle Stelzona využívá optických vláken k měření deformace ve válci [52, 53]. Princip měření pomocí optických vláken je založen na změně optického prostředí vlivem měřené veličiny (teplota, deformace) a její detekci pomocí změny útlumu, frekvenčního posunu nebo časového zpoždění laserového paprsku. Velkou výhodou vláken je jejich netečnost vůči elektrickému rušení, vysoká přesnost měření a časová stálost. Vlákná jsou schopna měřit veličinu nejen v jednom místě, ale podél celé délky instalovaného vlákna.

2.2 Měření součinitele přestupu tepla v kontaktu

Měření součinitele přestupu tepla v kontaktu vychází z definice kontaktu dle rovnice 2.4. Pro určení hodnoty h_k je potřeba znát povrchové teploty těles v kontaktu T_{p1}, T_{p2} při známé hustotě tepelného toku q . Přímé měření povrchových teplot v kontaktu není možné. Teploty T_{p1}, T_{p2} jsou jen matematický konstrukt idealizovaného případu vycházející z použitého modelu kontaktu. Proto by vložený snímač měřil jen průměrnou teplotu v kontaktu navíc by hodnoty silně závisely na struktuře povrchu a instalovaných snímačích.

$$h_k = \frac{q}{T_{p1} - T_{p2}} \quad (2.4)$$



Obrázek 2.13: Teplotní pokles na rozhraní

Při statickém určování součinitele přestupu tepla jsou tělesa zatížena kontaktním tlakem a teplotním spádem vytvořeným ohřevem na jednom a chlazením na druhém konci [54]. Po ustavení teplotní rovnováhy je pomocí sady termočlánků určena hodnota hustoty tepelného toku q a pomocí extrapolace i teplota na povrchu těles v kontaktu T_{p1}, T_{p2} (viz. 2.13).

Při neustáleném vedení tepla se využívá komplexních numerických modelů k určení tepelných toků a povrchových teplot v kontaktních tělesech [55, 56]. V numerickém modelu je pomocí některé z metod minimalizace měněna neznámá hodnota součinitele přestupu tepla tak, aby průběh teplot v modelu odpovídal průběhu naměřených teplot.

3

Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování

Vývoj senzoru pro měření okrajových podmínek ve válcovací mezeře probíhal v rámci evropského projektu ROLLGAP v jehož rámci byly vyvíjeny různé senzory a přístupy pro popis válcování. V následující tabulce 3.1 jsou uvedeny základní limitní hodnoty pro návrh senzorů, zvláště pro válcování za tepla a za studena.

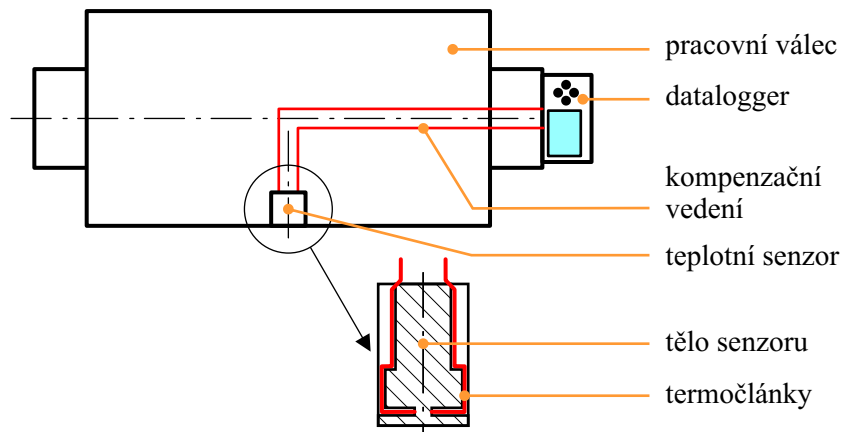
Tabulka 3.1: *Limitní hodnoty napětí a teplot pro návrh senzorů*

	Válcování za tepla	Válcování za studena
Maximální normálové kontaktní napětí ve válcovací mezeře	$p = 150 \text{ MPa}$	$p = 2000 \text{ MPa}$
Maximální smykové kontaktní napětí ve směru válcování	$\tau = 60 \text{ MPa}$ ($\mu = 0,4$)	$\tau = 100 \text{ MPa}$ ($\mu = 0,05$)
Válcovací teplota	$1100 \text{ }^\circ\text{C}$	$60 \text{ }^\circ\text{C}$

3.1 Teplotní senzor

Pro stanovení povrchových okrajových podmínek při řešení teplotních úloh vedení tepla byl v Laboratoři přenosu tepla a proudění pod Fakultou strojní, VUT v Brně (LPTaP) vyvinut algoritmus použitelný v různých průmyslových aplikacích [58, 59]. Metoda využívá experimentální měření podpovrchových teplot a řešení inverzní úlohy vedení tepla k výpočtu povrchové okrajové podmínky na zkoumaném objektu.

Základní měřicí řetězec je znázorněn na obrázku 3.1. Hlavní součástí je teplotní senzor složený z válcového těla a vložených termočlánků. Senzor je vložen do díry ve válci a termočlánek je přes kompenzační vedení připojen k dataloggeru. Signál s termočlánekem je také možno přenášet pomocí rotačních konektorů nebo bezdrátově. Zajištění senzoru v díře je realizováno pomocí lepidla nebo je senzor do díry zalisován. Po instalaci je povrch senzoru obroušen pomocí speciální brusky pro zajištění dokonalého válcovitého povrchu válce a čidlo je následně kalibrováno (více o kalibraci je uvedeno v kapitole 3.1.5).

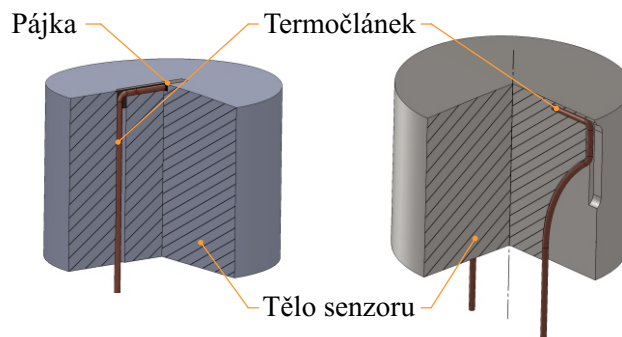


Obrázek 3.1: Schéma měřicího řetězce pro měření teplot v pracovním válci

Společným prvkem všech vyvinutých senzorů je použití plášťového termočláanky typu K o průměru pláště 0,5 mm. Termočláanek měl neuzemněný měřící konec z důvodu snížení šumů při měřeních.

Termočláanek byl umístěn paralelně s předpokládanou osou pracovního válce v malé hloubce pod povrchem. Podle typu instalace termočláanky rozeznáváme dva základní typy čidel.

- **Vrtaný senzor:** termočláanek je umístěn ve vrtané (případně vyjiskřené) díře
- **Pájený senzor:** termočláanek je umístěn v drážce a zalit pájkou



Obrázek 3.2: Základní rozdělení teplotních senzorů

Vývoj byl prováděn v několika etapách pro různé způsoby válcování. Následuje přehled teplotních senzorů vyrobených v jednotlivých etapách.

Teplotní senzory - etapa I.

Teplotní senzory pro tuto etapu byly vyvíjeny za účelem měření na testovací válcovací stolici. Pro osazení teplotními senzory byl vybrán starší pracovní válec s menší tvrdostí (240HV) oproti dnešním standardům pro snadnou výrobu potřebných děr. Pro válec byly připraveny čtyři teplotní senzory, dva vrtané a dva pájené senzory. Jeden z vrtaných senzorů navíc obsahoval dvojici termočláanek.

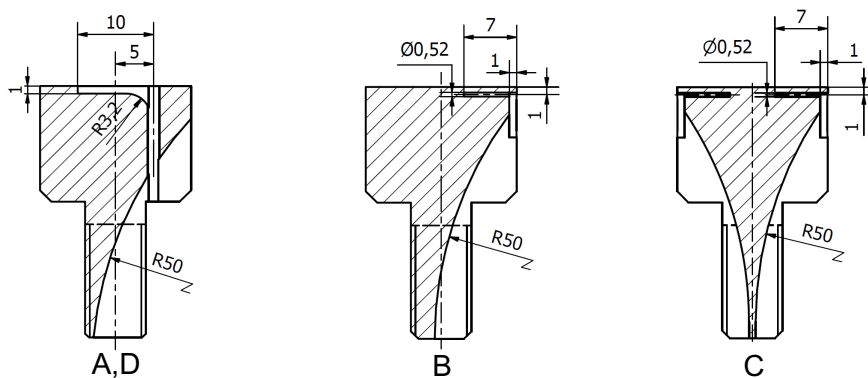
3.1. Teplotní senzor

Finální hloubka termočládku h_t u vrtaného čidla po přebroušení povrchu byla na základě předchozích pevnostních výpočtů ustanovena na hodnotu 0,8 mm. Pro pájené čidlo byla hloubka termočládku 0,5 mm. Pro materiál těla senzoru byla použita ocel R260 s podobným chemickým složením jako je materiál válce a obdobnou tvrdostí. K fixaci senzorů bylo použito epoxidové lepidlo ve spodní části, kde pro zvýšení adheze byla tato část čidla opatřena závitem.

Pájené čidlo bylo zapájeno pomocí niklové pájky Ni710.



Obrázek 3.3: Etapa I - vrtaný senzor se dvěma termočládky (A.2)



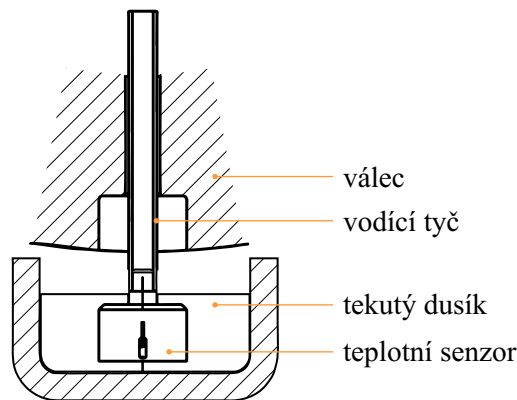
Obrázek 3.4: Etapa I - Teplotní senzory v řezu

Výrobní výkresy teplotních senzorů jsou obsaženy v příloze (A.1,A.2,A.3).

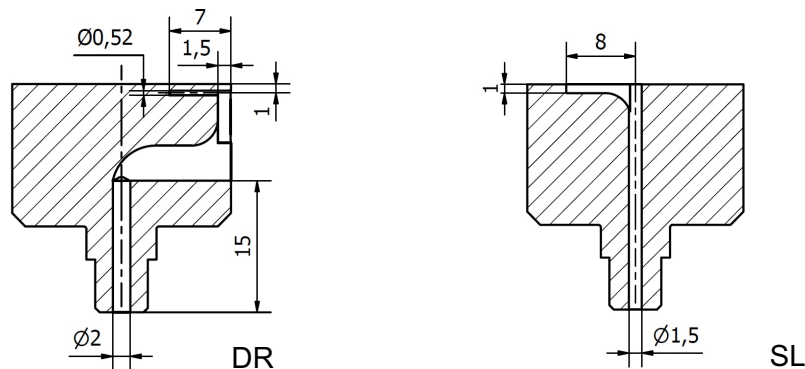
Teplotní senzory - etapa II.

Senzory pro tuto etapu využívají stejný válec jako etapa I. Původní čidla byla vyjmuta a díry převrtány pro umístění nových senzorů. Návrh počítal s podchlazením senzoru tekutým dusíkem a zalisováním do válce. Z toho důvodu je plášť těla senzoru nepřerušen podélnou drážkou pro termočlánek a vnitřní cesty byly vyrobeny pomocí elektroerozivního obrábění.

3. Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování



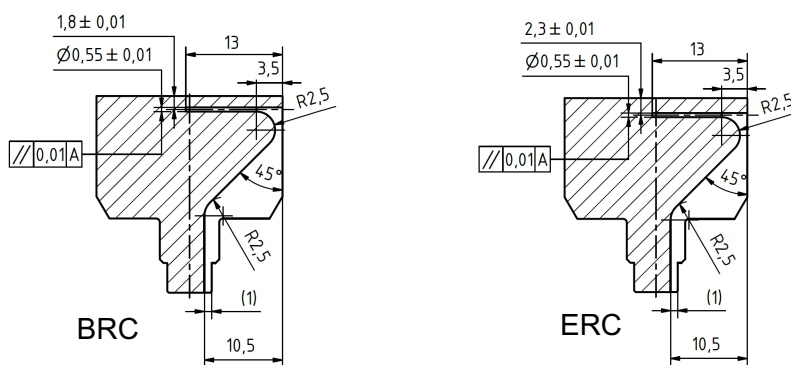
Obrázek 3.5: Etapa II - Instalace pomocí tekutého dusíku



Obrázek 3.6: Etapa II - Teplotní senzory v řezu

Při finálním osazování senzorů nebyl tekutý dusík využit a čidla byla do válce pouze zalisována. Výrobní výkresy teplotních senzorů jsou obsaženy v příloze (A.4,A.5).

Teplotní senzory - etapa III.

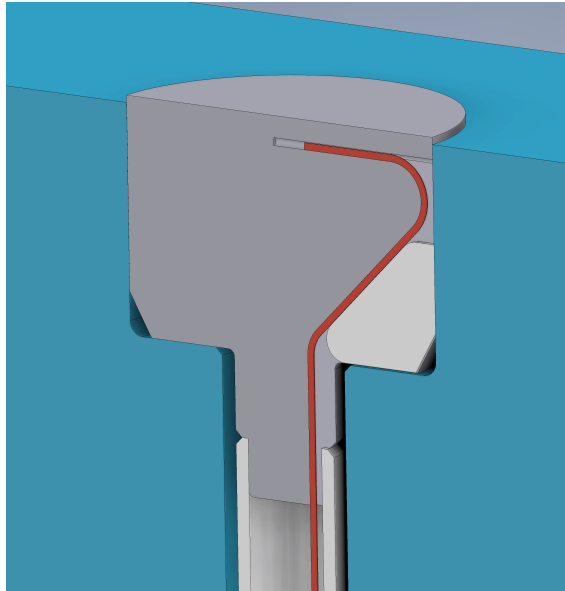


Obrázek 3.7: Etapa III - Teplotní senzory v řezu

Senzory určené pro válcovací trať do poloprovodního měření. Navržené snímače jsou vyrobeny metodou elektroerozivního obrábění z materiálu válce URMILLG3. Návrh vychází z konstrukce vrtného čidla, kde je navíc pro zvýšení teplotní odezvy díra s termočlánkem zalita pomocí niklové pájky Ni710 ve vakuové peci. Tím je vytvořeno dokonalé tepelné propojení mezi pláštěm termočlánku a tělem snímače.

3.1. Teplotní senzor

Drážky v těle respektují pozvolné ohýbání pláště termočlánku. Vzhledem k použité výrobní technologii se podařilo odstranit potřebu velké drážky a tím i kritické místo etapy I.

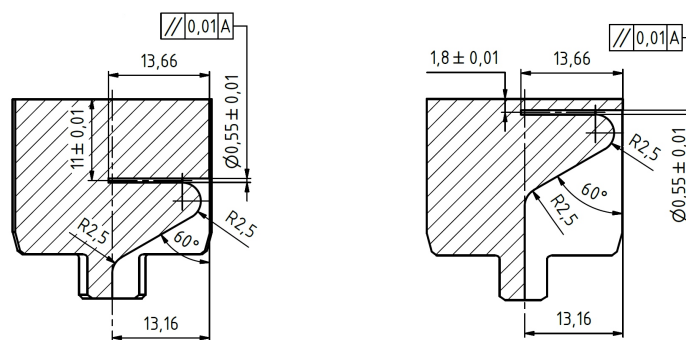


Obrázek 3.8: *Etapa III - řez válcem a instalovaným senzorem před broušením*

Vzhledem k určení senzoru do poloprovozu byly navrženy dva typy. První typ senzoru (BRC) je určen pro přežití na začátku válcovací kampaně (obrázek 3.7). Během opotřebování povrchu válce dojde k jeho postupné degradaci až do doby přerušování funkce. Druhý senzor (ERC) má proto termočlánek umístěn hlouběji k prodloužení životnosti. Postupným obrušování povrchu válce se u něho bude zlepšovat teplotní odezva.

Senzory jsou do válce zalisovány, přebroušeny a následně kalibrovány. Výrobní výkresy teplotních senzorů jsou obsaženy v příloze (A.6,A.7).

Teplotní senzory - etapa IV.



Obrázek 3.9: *Etapa IV - Teplotní senzory v řezu*

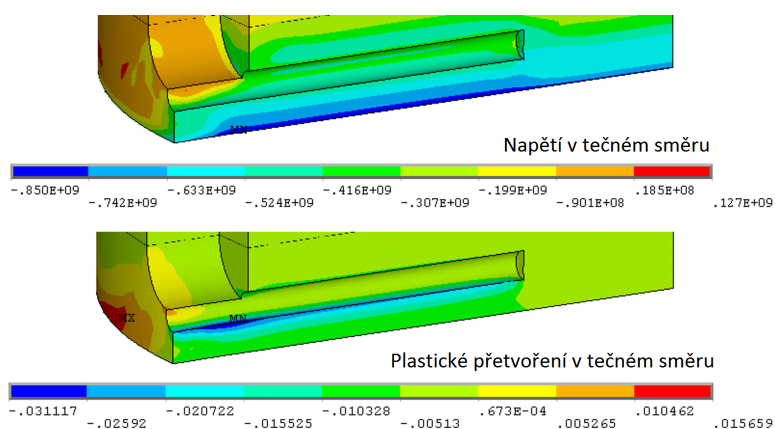
Senzory poslední etapy využívají stejný pracovní válec jako etapa III. Válec byl renovován a díry převrtány. Podstata návrhů senzorů je stejná jako v etapě III.

Některé senzory jsou navíc opatřeny termočlánkem ve větší hloubce pro měření celkového oteplení válce.

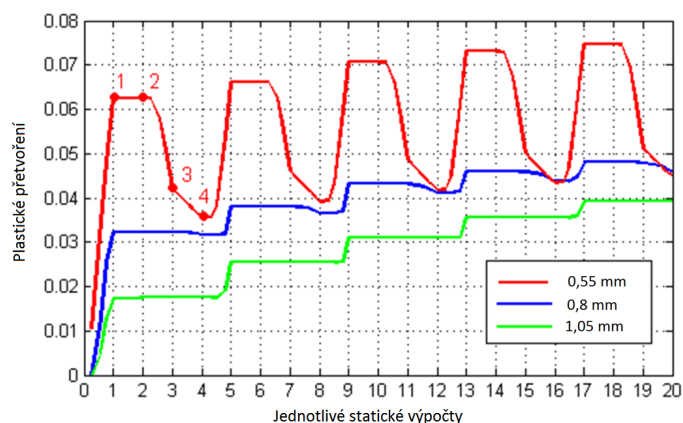
Výrobní výkresy teplotních senzorů jsou obsaženy v příloze (A.8,A.9,A.10).

3.1.1 Pevnostní kontrola teplotního senzoru

Konstrukce senzoru je založena na předchozích zkušenostech s měřením ve válci. V diplomové práci P. Nejedlého [60] byly tyto původní senzory podrobeny optimalizaci z hlediska teplotní cyklické zátěže během měření. Výsledkem práce je doporučená hloubka termočlánku 0,8 mm, která vykazuje malé cyklické plastické zatížení při slušné teplotní odezvě (obrázek 3.11).



Obrázek 3.10: *Napětí a plastické přetvoření v tečném směru pro hloubku termočlánku 0,8 mm [60]*

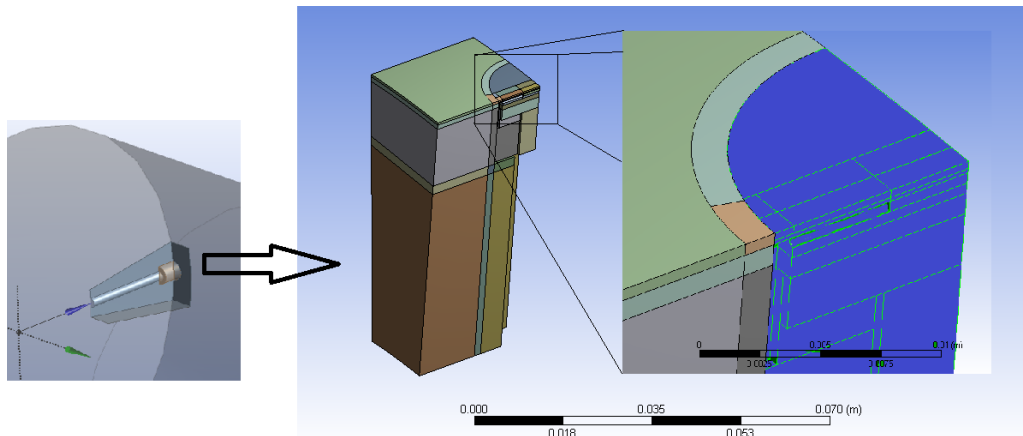


Obrázek 3.11: *Průběh plastického přetvoření v kritickém místě pro různé hloubky termočlánku [60]*

Původní geometrie teplotního senzoru byla upravena do podoby vrтанého senzoru etapy I (obrázek 3.4 - B). Podstatnou změnou je velikost drážky pro ohnutí termočlánku. V tomto místě bylo identifikováno kritické místo snímače. V novém návrhu byla hloubka drážky snížena na 1 mm. Navíc byla poloha díry pro termočlánek

3.1. Teplotní senzor

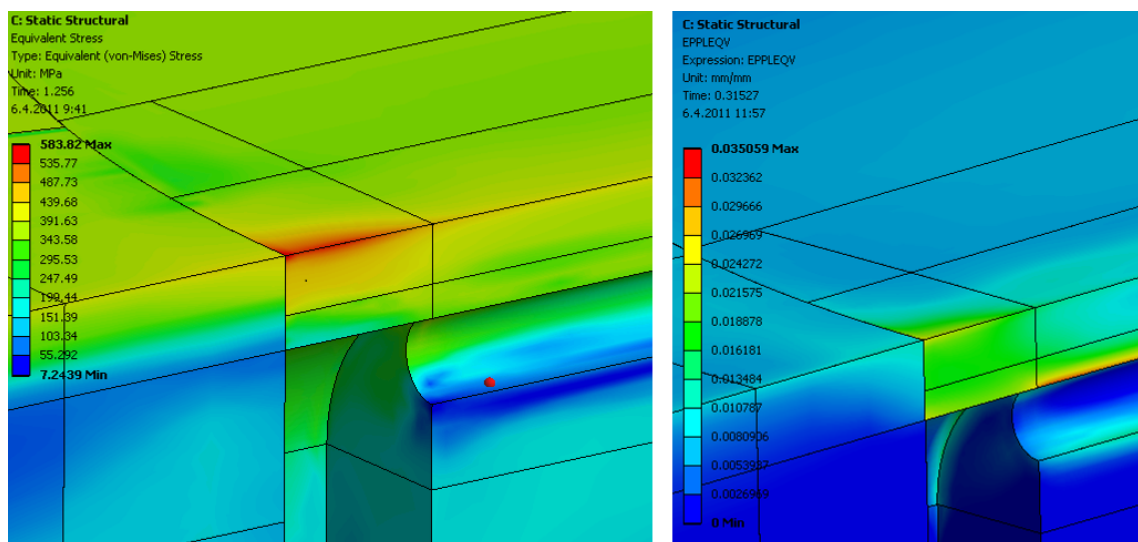
posunuta vůči drážce tak, aby se nevytvářel ostrý přechod. Po těchto modifikacích byl vytvořen nový výpočtový model pro simulaci teplotně mechanického zatížení.



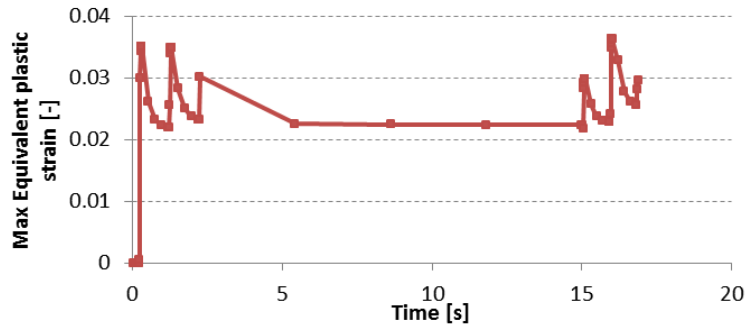
Obrázek 3.12: Geometrie modelu, výseč válce s válcovitým tělem teplotního senzoru (modrá)

Výpočtový model představuje výseč z válce, kde je povrch válce zatížen časově a prostorově proměnou okrajovou pomníkovou ve formě tepelného toku a povrchového normálového a tečného napětí. Okrajové podmínky byly získány ze samostatné simulace válcovací mini kampaně, která představovala maximální zatížení při pilotních testech 4.1.

Plášť válcového senzoru je oproti válci uložen volně bez tření, spodní část senzoru je pevně svázaná s válcem. Tímto způsobem se senzor může volně deformovat v radiálním směru. Při simulacích byla sledována plastická deformace v kritickém místě napojení díry pro termočlánek na drážku a srovnávána s původní simulací.



Obrázek 3.13: Průchod druhého provalku (maximální hodnoty), ekvivalentní napětí v okolí kritického místa senzoru (vlevo); ekvivalentní plastické přetvoření ve stejném místě (vpravo)



Obrázek 3.14: Průběh maxima ekvivalentní plastické deformace během simulované kampaně

3.1.2 Inverzní úloha vedení tepla

Pro výpočet okrajové podmínky se využívá inverzní úloha vedení tepla. Algoritmus výpočtu vychází z Beckova algoritmu [61], který umožňuje sekvenční řešení časově proměnné okrajové podmínky s využitím dopředných kroků pro stabilizaci úlohy. Algoritmus je založen na minimalizaci rozdílu mezi naměřenou a vypočtenou teplotou v místě umístění termočlánku

$$SSE = \sum_{f=m+1}^{m+n_f} \sum_{i=1}^{n_{T^*}} (T_i^{*,f} - T_i^f)^2 \quad (3.1)$$

kde $T_i^{*,f}$ jsou změřené teploty, T_i^f jsou teploty spočtené přímou úlohou vedení tepla ve stejných pozicích jako jsou teploty změřené. Hodnota n_{T^*} udává celkový počet diskrétních měření na zkoumaném objektu.

Po nalezení minima funkce (3.1) je možné spočítat hustotu tepelného toku q_m v čase t^m :

$$q_m = \frac{\sum_{f=m+1}^{m+n_f} \sum_{i=1}^{n_{T^*}} (T_i^{*,f} - T_j^f|_{\dot{q}_m=0}) \zeta_i^f}{\sum_{f=m+1}^{m+n_f} \sum_{i=1}^{n_{T^*}} (\zeta_i^f)^2} \quad (3.2)$$

kde $T_j^f|_{\dot{q}_m=0}$ je historie vypočtených teplot do \dot{q}_m (mimo něj). ζ_i^f je citlivost teplotního senzoru v čase t^f na impulsu tepelného toku v čase t^m a je dána výrazem:

$$\zeta_i^m = \frac{\partial T_i^m}{\partial \dot{q}_m} \quad (3.3)$$

Z výše popsané Beckovy metody vychází sekvenční identifikační metoda publikovaná M. Pohankou [62]. Metoda je vhodná ke stanovení časově závislých okrajových podmínek pomocí měření teplotní historie objektu v diskrétních bodech. Tato metoda je vhodná k určení součinitele přestupu tepla jakožto neznámé okrajové podmínky.

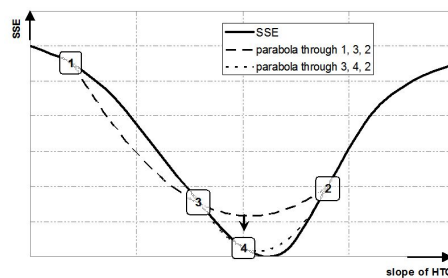
Při výpočtu se využívá sekvenčního odhadu okrajových podmínek měnících se v čase a dat spočtených v n dopředných krocích pro stabilizaci špatně podmíněné

3.1. Teplotní senzor

inverzní úlohy. Součinitel přestupu tepla na povrchu objektu v čase t_m se určí ze srovnání změřené teploty T_m^* s teplotou vypočtenou pomocí teplotního modelu T_m v n dopředných krocích. Hledá se minimum funkce SSE , která představuje součet čtverců rozdílu mezi naměřenou a vypočtenou teplotou z přímého výpočtu v n dopředných krocích.

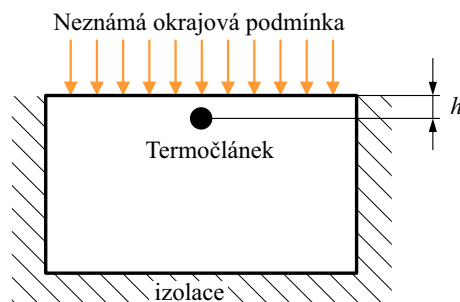
$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+n} (T_i^* - T_i)^2 \quad (3.4)$$

Funkce SSE má pouze jedno minimum, které závisí na sklonu součinitele přestupu tepla. Pro hledání minima této funkce je použita parabolická interpolace a metoda zlatého řezu.



Obrázek 3.15: Hledání minima funkce SSE [62]

Obě inverzních úlohy (Beck, Pohanka) vyžadují řešení přímé úlohy vedení tepla. Pro potřeby určení okrajové podmínky ve válcovací mezeře je geometrie teplotního modelu znázorněna na obrázku 3.16.



Obrázek 3.16: Schéma teplotního modelu použitého v inverzní úloze vedení tepla

Model je z jedné strany zatížen zvolenou okrajovou podmínkou, zbytek je tepelně izolován. V místě termočláneku je vytvořena jeho vnitřní geometrie (plášť, el. izolace, dráty). Jednotlivé výpočtové modely podle typu senzoru jsou popsány v kapitole 3.1.3. K řešení přímé úlohy je použita metoda konečných objemů včetně teplotně závislých materiálových vlastností všech částí.

3.1.3 Výpočtové modely teplotních senzorů

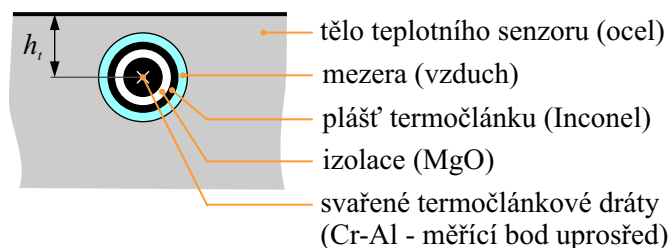
Pro projekt bylo vytvořeno několik návrhů teplotních senzorů představených na začátku této kapitoly. Každý senzor je reprezentován přímým výpočtovým modelem

3. Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování

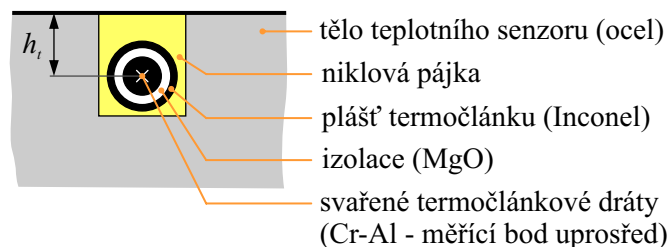
potřebným pro inverzní úlohu vedení tepla. Schématicky je model představen na obrázku 3.16. Hlavními rozdíly mezi modely jsou v poloze termočlánku (parametr h_t) a podle způsobu zabudování termočlánku v těle senzoru. Podle toho rozlišujeme tři typy výpočtových modelů:

- **DRILL**- Vrtaný teplotní senzor (obr. 3.17): měřící termočlánek je umístěn ve vrtané díře. Tepelný kontakt s tělem senzoru je špatný, závisí pouze na přímém kontaktu termočlánku v několika nespécifikovaných bodech v díře. Ve své podstatě je měřící část termočlánku obklopena tenkou izolující vrstvičkou vzduchu. Dalším parametrem modelu je průměr vrtané díry.
- **SLOT** - Teplotního senzor s drážkou (obr. 3.18): měřící termočlánek je umístěn v drážce a zalit pájkou, která vytvoří dokonalý tepelný kontakt mezi pláštěm termočlánku a tělem senzoru. Mezi parametry modelu musíme zařadit rozměry drážky.
- **DROT** - Vrtaný teplotního senzor se zapájeným termočlánkem (obr. 3.19): měřící termočlánek je umístěn v díře a pomocí vakuového pájení je prostor okolo něho vyplněn pájkou. Tím dochází k dokonalému a předem dobře definovanému tepelnému kontaktu s tělem senzoru. Dalším parametrem je průměr vrtané díry.

Společným prvkem všech modelů je vnitřní struktura termočlánku složená z pláště, izolace a termočlánekových drátů s měřícím místem v jejich středu. V simulacích je používán také model SOLID, který představuje plný materiál bez vnitřní struktury s měřícím bodem v hloubce h_t .

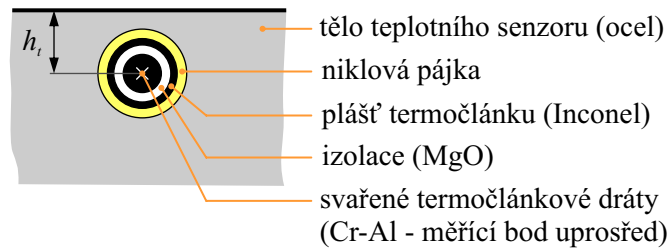


Obrázek 3.17: DRILL - schématické znázornění modelu vrtaného teplotního senzoru pro inverzní úlohu vedení tepla



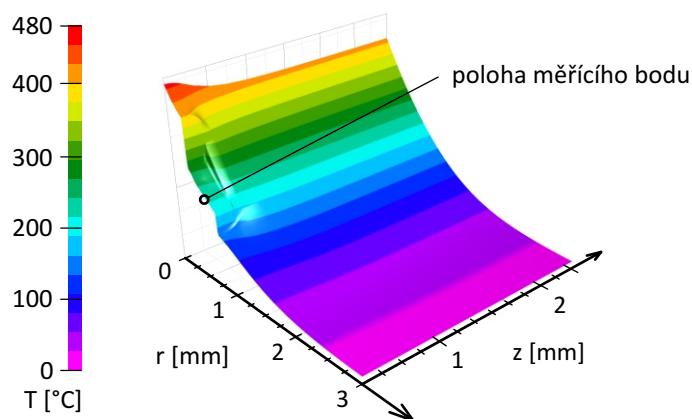
Obrázek 3.18: SLOT - schématické znázornění modelu teplotního senzoru s drážkou pro inverzní úlohu vedení tepla

3.1. Teplotní senzor



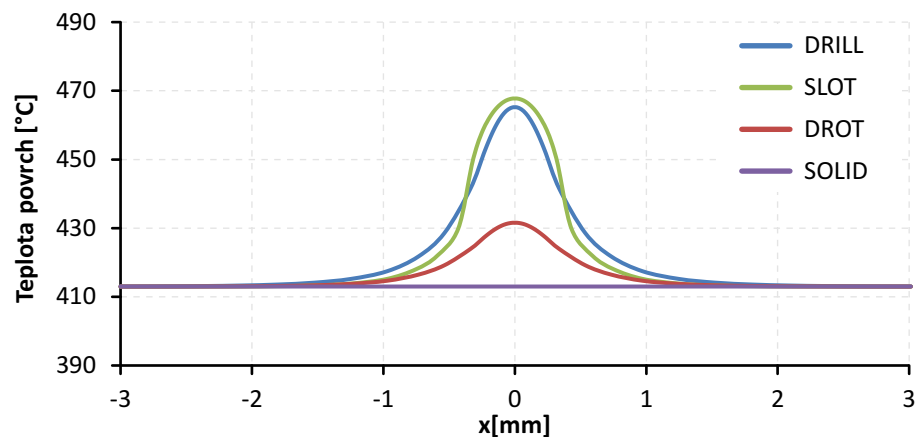
Obrázek 3.19: DROT - schématické znázornění modelu vrtaného teplotního senzoru se zapájeným termočládkem pro inverzní úlohu vedení tepla

Teplotní pole v okolí termočládku



Obrázek 3.20: Ovlivnění teplotního pole ve válci přítomností termočládku modelu DRILL. Hloubka termočládku $h_t = 0,5\text{mm}$

Přítomnost termočládku ovlivňuje teplotní pole v jeho okolí. Míra ovlivnění je závislá na typu senzoru a materiálových vlastnostech. Vrtaný senzor (DRILL) má největší nehomogenitu v nejbližším okolí termočládku (obrázek 3.20). Pokud se podíváme na povrchové teploty nad termočládkem (obrázek 3.21), senzor s drážkou (SLOT) vykazuje stejné zvýšená teploty povrchu.



Obrázek 3.21: Teplota povrchu nad termočládkem pro různé typy senzorů. Hloubka termočládku $h_t = 0,5\text{mm}$

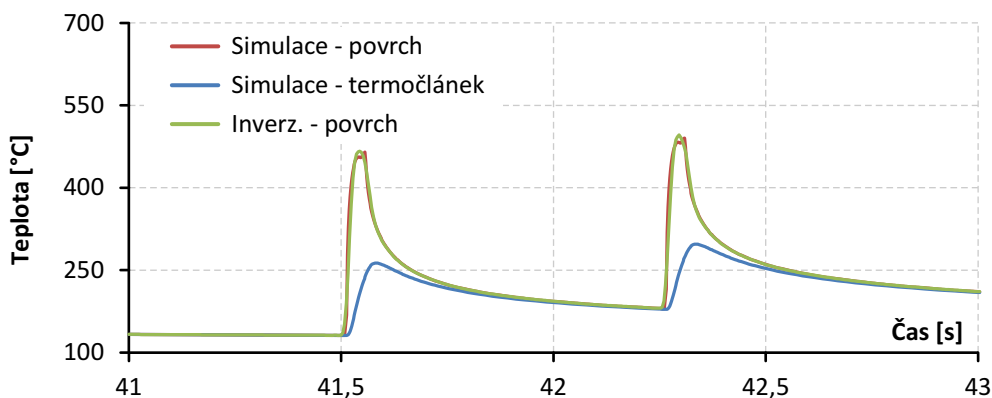
Pro inverzní úlohu je výhodné, aby míra distorze teplotního pole byla co nejmenší. To zajišťuje lepší stabilitu výpočtu a menší počet nutných iterací.

3.1.4 Testování inverzní úlohy v podmínkách plánovaných měření

V této kapitole jsou prezentovány výsledky ze simulací plánovaných měření s teplotními senzory pro různé parametry válcování s různými variantami senzorů. Při simulacích je sledován výsledný rekonstruovaný tepelný tok a jeho srovnání s původním průběhem. Některé simulace lze spojit se skutečně proběhlými měřeními prezentovanými v kapitole 4.

Pilotní měření: válcování za tepla

Pro test byla vytvořena teplotní simulace, kdy byl model válce a teplotního senzoru včetně vnitřní geometrie termočláneku zatížen pomocí pohyblivé okrajové podmínky na povrchu modelu. Okrajové podmínky byly získány z předchozích simulací v systému Cylscale určeného pro simulace rozsáhlých válcovacích kampaní. Parametry kampaně byly voleny s ohledem na následné pilotní testy teplotních senzorů (viz. kapitola 4.1). Použitý teplotní model senzoru odpovídá variantě DRILL (obrázek 3.17).



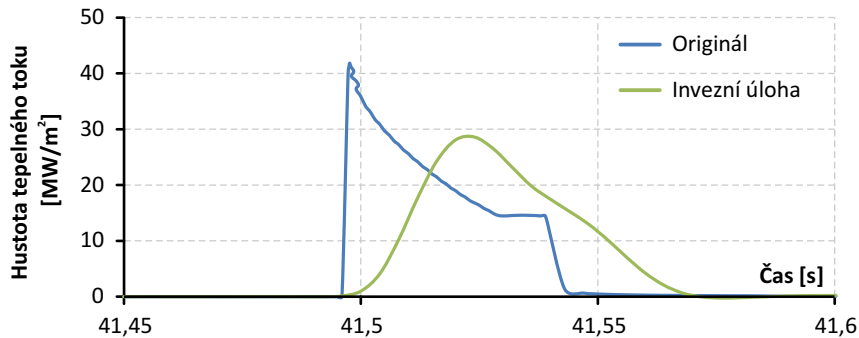
Obrázek 3.22: Porovnání teplot při simulaci válcování s výsledky z inverzní úlohy

Výsledky z teplotního modelu jsou využity jako vstupní data pro inverzní úlohu. Data byla převzorkovaná k přiblížení simulace k reálným podmínkám měření. Simulovaný měřicí systém se vyznačoval následujícími parametry:

- Měřicí frekvence byla zvolena s ohledem na požadavek deseti zaznamenaných teplot během kontaktu s válcem. Při průměrném kontaktním čase ve válcovací mezeře 0,044 s je minimální měřicí frekvence cca. 230 Hz.
- Bílý šum s amplitudou 0.5 °C byl přičten k záznamu teplot z přímé úlohy

3.1. Teplotní senzor

- Rozlišení měřicí elektroniky v simulaci: 14 bitů, průběh teplot bylo kvantováno po 0.05 °C



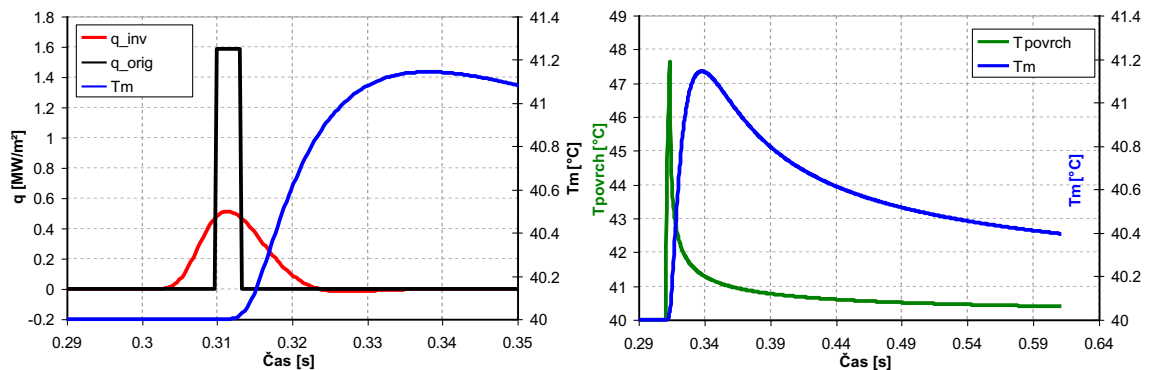
Obrázek 3.23: *Hustota tepelného toku, původní průběh pro teplotní simulaci a jeho rekonstrukce pomocí inverzní úlohy*

Okrajová podmínka rekonstruovaná pomocí inverzní úlohy je oproti originálu roztažená v čase (obrázek 3.23). Toto rozmazání způsobuje setrvačnost měření teplot v hloubce 0.5 mm pod povrchem a používání dopředných kroků v inverzní úloze.

Průmyslové testy: válcování za studena

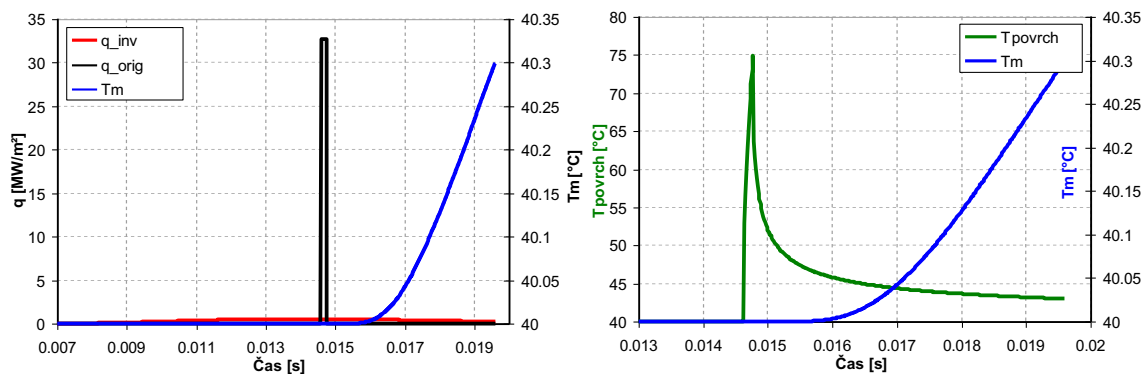
Pro měření teplot představuje válcování za studena extrémní případ. Teploty na válci jsou nízké a kontaktní čas je velmi krátký. Pro potřeby analýzy schopnosti inverzní úlohy správně zrekonstruovat okrajovou podmínku na povrchu válce byly v simulacích použity ideální podmínky (signál bez šumu, s maximálním možným rozlišením). Jako vstup do inverzní úlohy byly použity teploty z přímé simulace při podmínkách definovaných v tabulce 3.2. Ostatní parametry při simulaci:

- teplotní model senzoru: DRILL (obrázek 3.17)
- vzdálenostní měřicího bodu termočlánku k povrchu $h_t = 0,5$ mm
- materiál válce: $\rho = 7860$ kg/m³, $c = 460$ J/(kg.K), $\lambda_m = 45,87$ W/(m.K)

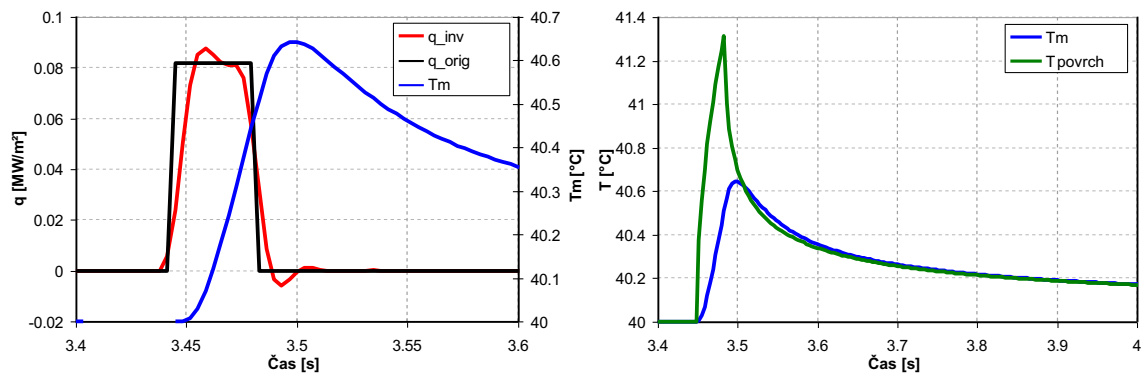


Obrázek 3.24: *I1 - Srovnání vypočtené q_{inv} a původní q_{org} hustoty tepelného toku (vlevo); Porovnání teplotní odezvy v hloubce 0,5 mm T_m s teplotou na povrchu T_{povrch} (vpravo)*

3. Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování



Obrázek 3.25: I5 - Srovnání vypočtené q_{inv} a původní q_{org} hustoty tepelného toku (vlevo); Porovnání teplotní odezvy v hloubce 0,5 mm T_m s teplotou na povrchu T_{povrch} (vpravo)



Obrázek 3.26: P1 - Srovnání vypočtené q_{inv} a původní q_{org} hustoty tepelného toku (vlevo); Porovnání teplotní odezvy v hloubce 0,5 mm T_m s teplotou na povrchu T_{povrch} (vpravo)

Tabulka 3.2: Válcování za studena, podmínky pro testování inverzní úlohy

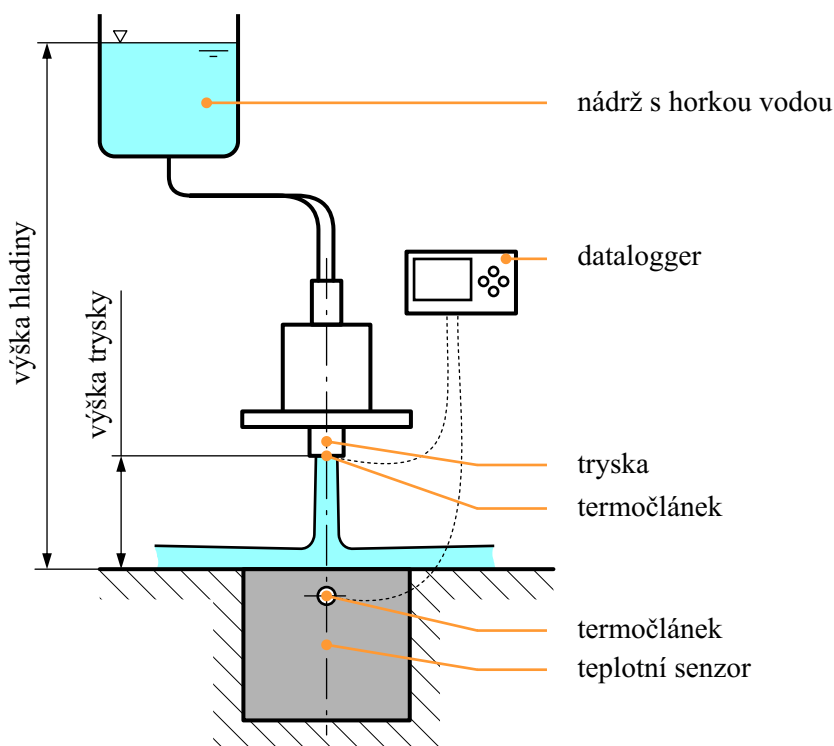
Studená válcovací trať						
Stolice	Válcovací rychlost [m/s]	Kontaktní úhel [°]	Čas kontaktu [ms]	Měřicí frekvence [kHz]	q v kontaktu [MW/m ²]	Dopředné kroky [-]
I1	4,64	3,1	3,11	3,2	1,58	31
I2	8,13	2,5	1,41	7,1	9,99	69
I3	14,1	2	0,66	15,2	17,36	150
I4	21,25	1,2	0,28	36	29,77	350
I5	27,02	0,8	0,15	68,4	32,71	660
Pilotní testy						
P1	0,416	3,74	34,5	0,3	81,83	3
P2	10	3,74	1,44	7	-	-

V tabulce 3.2

Ze simulací je patrné, že hlavním limitem úlohy je teplotní vodivost materiálu, respektive hloubka měřícího termočlátku. Rekonstruovaný tepelný tok je silně vyhlazen při pokusu inverzní úlohy o rekonstrukci okrajové podmínky. Proto nejde očekávat, že měření v podmínkách válcování za studena bude úspěšné, obzvláště v průmyslových podmínkách.

3.1.5 Kalibrace teplotních senzorů

Pro zpřesnění výsledků byla u teplotních čidel provedena kalibrace pomocí vodní laminární trysky a nádrže s horkou vodou. Tryska vytváří laminární proud vody působící na teplotní senzor dle obrázku 3.27. Pomocí analytických rovnic byla vypočítána teoretická hodnota součinitele přestupu tepla pro toto uspořádání. Ze záznamu teplot kalibrovaného senzoru je vypočten součinitel přestupu tepla proudící vody. Srovnání těchto dvou hodnot je optimalizován teplotní model použitého senzoru. Tímto postupem je možno minimalizovat vliv výrobních chyb teplotních čidel a nepřesnosti teplotního modelu.

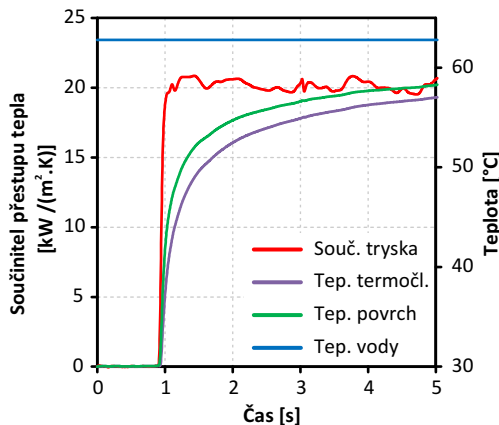


Obrázek 3.27: Kalibrace teplotního čidla

Během kalibrace je kalibrátor umístěn nad čidlo dle schematu. Horká voda začne proudit z nádrže do trysky odkud je proud vody dočasně odkloně mimo senzor. Po stabilizaci vodního paprsku a vyrovnání teplot je odvodní trubka prudce odkloněna

3. Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování

a vodní paprsek začne ohřívat senzor. Tento postup je opakován na každém čidle minimálně třikrát. Mezi měřeními je válec ochlazován vodou.

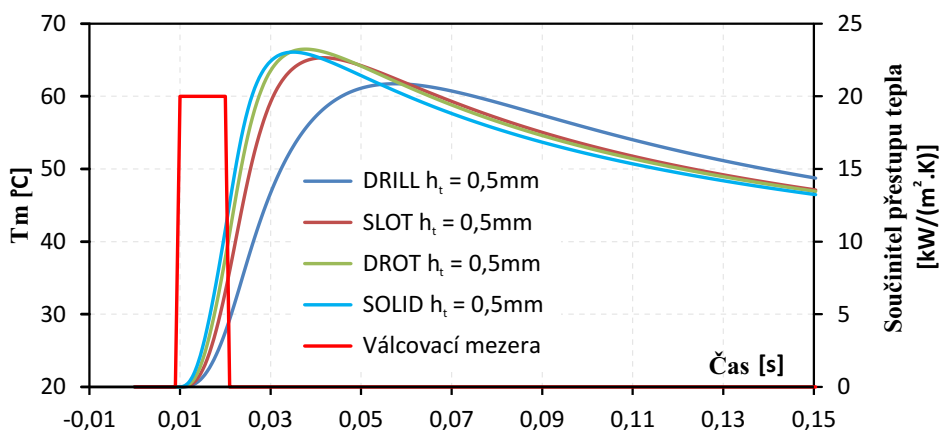


Obrázek 3.28: Průběh kalibrace (vlevo); záznam z kalibrace a inverzního výpočtu (vpravo)

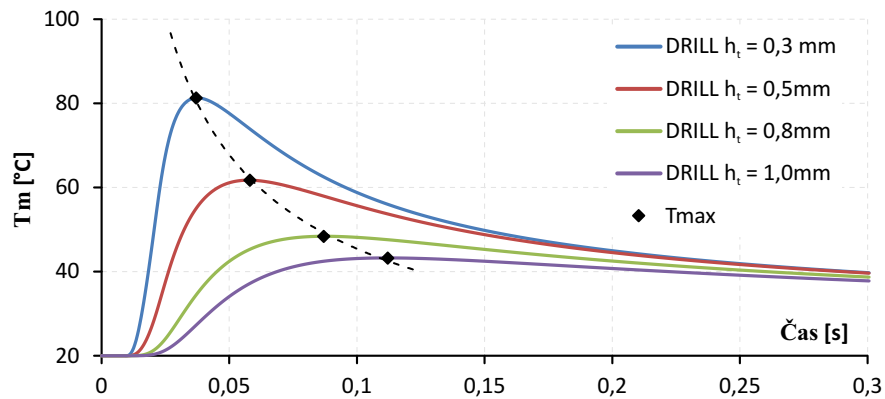
3.1.6 Teplotní odezva senzorů

Pro srovnání jednotlivých senzorů z hlediska teplotní odezvy byla vytvořena simulace, kde jsou jednotlivé teplotní modely zatíženy obdélníkovým impulzem ve formě součinitele přestupu tepla: $h = 20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{ok} = 1020^\circ\text{C}$. Šířka impulzu je 10 ms. Tyto podmínky mají blízko k poloprovodním testům 4.2.

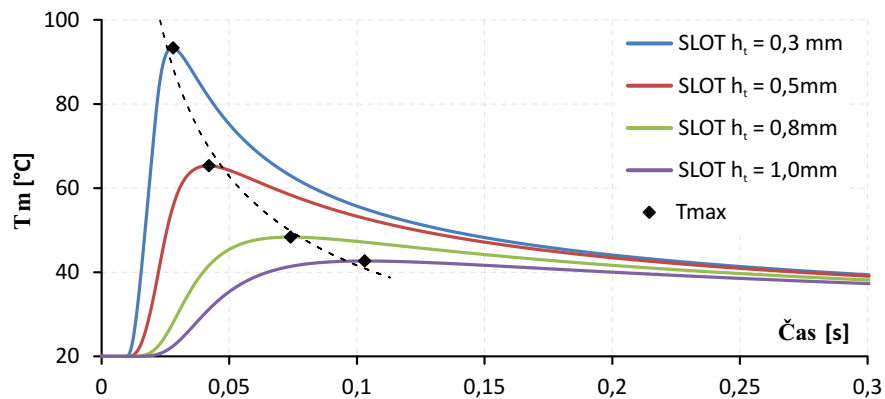
V obrázku 3.29 je rozdíl mezi plným (SOLID) materiálem a modelem DROT z hlediska teploty v hloubce 0.5 mm velice malý. V této simulaci se ukazuje, že použití pájky podstatným způsobem vylepšuje vrtaný senzor (model DRILL).



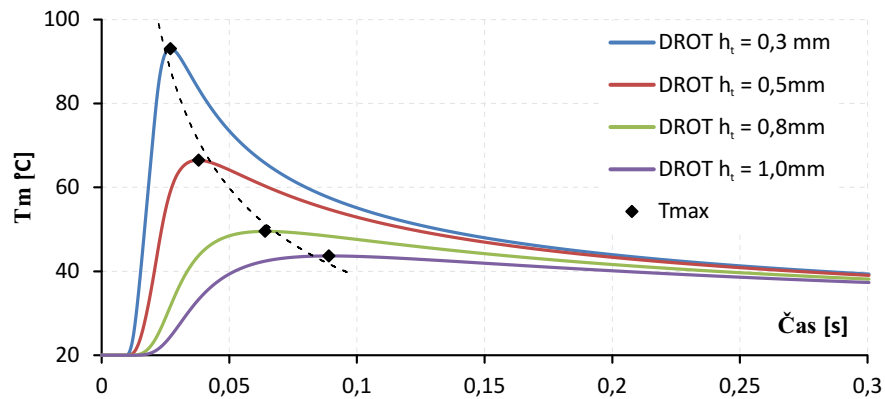
Obrázek 3.29: Porovnání teplotní odezvy jednotlivých typů senzorů pro stejnou hloubku termočlánku $h_t = 0,5 \text{ mm}$



Obrázek 3.30: Teplotní odezva modelu DRILL



Obrázek 3.31: Teplotní odezva modelu SLOT



Obrázek 3.32: Teplotní odezva modelu DROT

3.2 Pin senzor

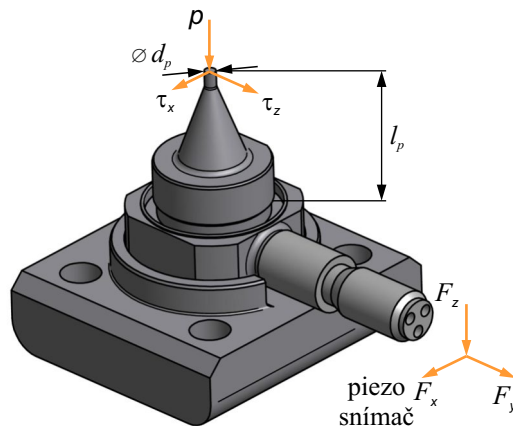
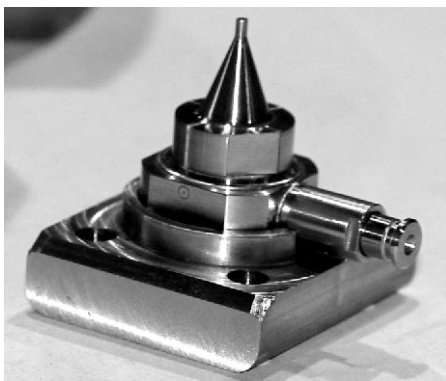
Měření tření pomocí pinu patří mezi přímé metody, některé úspěšné implementace jsou popsány v kapitole 2.1.3. Při návrhu je potřeba zohlednit některé specifické vlastnosti tohoto měřicího systému:

- Přítomnost pinu lokálně ovlivňuje tuhost válce a mění rozložení kontaktních napětí ve válcovací mezeře. Tomuto faktu se nelze zcela vyhnout, jeho význam je možno redukovat zmenšením prostoru pro pin.

3. Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování

- Mezera mezi válcem a pinem. Do této mezery může vnikat válcovaný materiál a ovlivňovat naměřené hodnoty.

Na velikost mezery okolo pinu jsou kladeny protichůdné požadavky. Vzhledem k měření třecích sil je částečná volnost pohybu nezbytná. Velikost horizontálního posuvu pro jednoduchý návrh pinu ve tvaru komolého kužele délky 25 mm, vrcholovém úhlu 40° s horním částí o průměr 2 mm je v závislosti na tečném napětí při limitních hodnotách z tabulky 3.1 70 μm pro válcování za tepla a 120 μm pro válcování za studena. Naproti tomu stojí fakt, že s velkou mezerou dochází k protlačení materiálu do mezery, ovlivněním naměřených hodnot a postupným zanášením mezery.



Obrázek 3.33: Pin senzor umístěný na upínací destičce s vyznačenými směry os

Konstrukce pin senzoru je založena na použití piezoelektrického snímače síly schopného měřit síly ve třech osách. Průměrné kontaktní napětí na vrcholu pinu vypočteme z měřených sil $F_{x,y,z}$ pomocí rovnic (3.5),(3.6).

$$p = \frac{4F_z}{\pi d_p^2} \quad (3.5)$$

$$\tau_{x,z} = \frac{4F_{x,y}}{\pi d_p^2} \quad (3.6)$$

kde τ_x je kontaktní smykové napětí v obvodovém směru válce, τ_z je kontaktní smykové napětí v příčném směru (směr osy válce) a d_p průměr měřící části pinu.

Pro určení koeficientu tření vycházíme z poměru tečného a normálového napětí. Abychom omezili jeho velikost pouze na kladné hodnoty vyjádříme poměr v absolutní hodnotě:

$$\mu_{x,z} = \left| \frac{\tau_{x,z}}{p} \right| \quad (3.7)$$

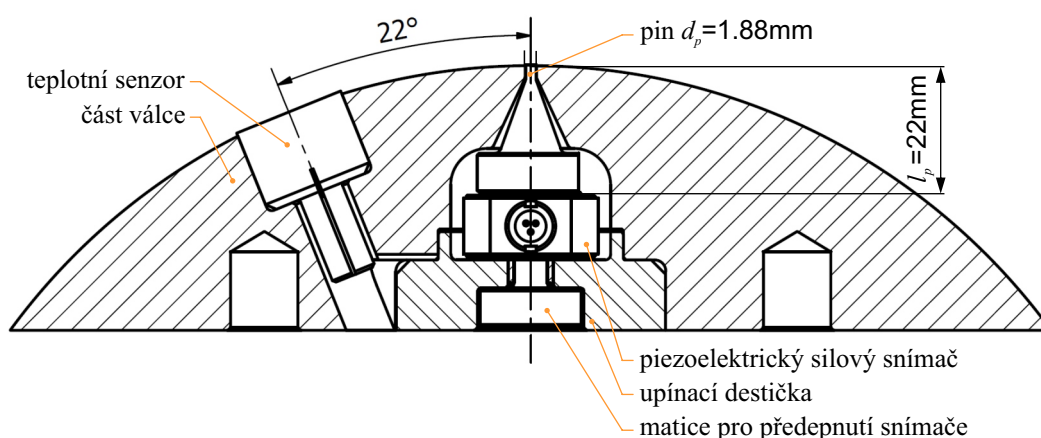
Nazývat tento poměr koeficient tření není zcela správné. Jak bylo ukázáno v kapitole 1.1.1 pro vysoká normálová napětí neplatí Coulombuv zákon tření.

Pro konstrukci senzoru byl vybrán měřící válec na pracovišti Swerea MEFOS. Základními parametry senzoru je průměr pinu $d_p = 1,88 \text{ mm}$ a jeho délka $l_p = 22 \text{ mm}$.

3.2. Pin senzor

Pro správnou funkci piezoelektrického snímače sil je potřeba při instalaci jeho předeprnutí stanovenou silou k vyvození dostatečných třecích sil mezi pinem a povrchem snímače. Z toho důvodu je pin a piezoelektrický snímač umístěn na upínací destičce a pomocí matice je vyvozena požadovaná síla předeprnutí v silové snímači (viz. obrázek 3.33). Tato konstrukce navíc umožňuje kalibraci pin senzoru před jeho umístěním do válce.

Sestava měřícího válce v řezu je zobrazena na obrázku 3.34. Spolu s pin senzorem je do válce instalován také teplotní senzor. Výkresy jednotlivých součástí lze nalézt v příloze (A.11, A.12, A.13, A.14)



Obrázek 3.34: Teplotní senzor a pin senzor ve válci zobrazený v řezu

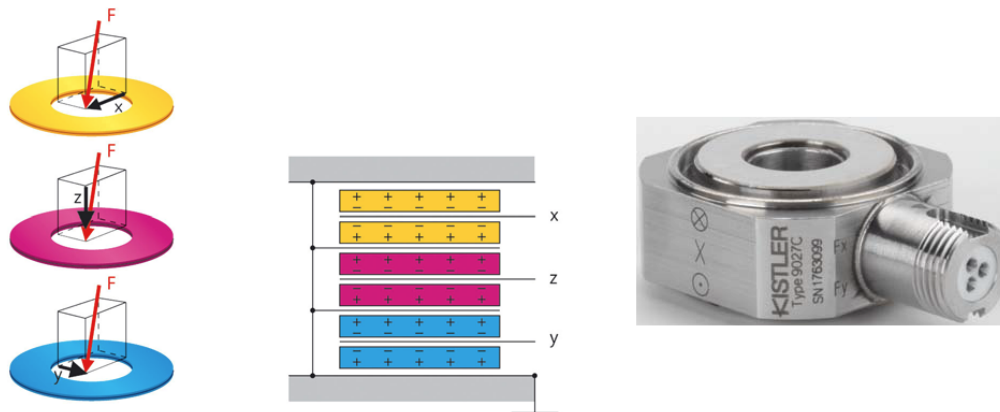
3.2.1 Tříosý piezoelektrický snímač sil

Piezoelektrické snímače sil pracují na principu generování elektrického náboje v závislosti na zatížení krystalu. Tříosý snímač sil obsahuje tři páry plátek z piezoelektrického materiálu řezaných pod specifickým úhlem a oddělených napařenými sběrnými elektrodami (viz. obrázek 3.35). Podle úhlu seříznutí krystal reaguje na specifický směr aplikovaného zatížení.

Základní charakteristikou snímače je jeho citlivost udávající velikost generovaného náboje na krystalu při zatížení jednotkovou silou. Obvykle je uváděna v jednotkách pC/N, typická citlivost křemíku je 4 pC/N v závislosti na módu zatížení. Některé snímače mohou využívat umělé keramické materiály, kde může citlivost být v řádu stovek pC/N. Tyto snímače mají horší teplotní stabilitu a odezva není tak lineární jako u krystalu křemíku. V následujících podkapitolách jsou vyspány parametry, které byly brány v potaz při konstrukci pin senzoru a používání snímače.

Základní parametry pro použitý snímač KISTLER 9028 lze nalézt v příloze B.1.

3. Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování

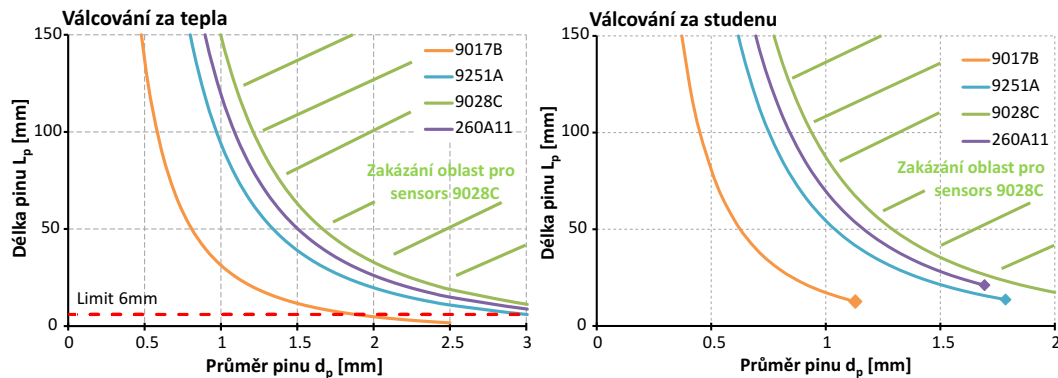


Obrázek 3.35: Tříosý piezoelektrický snímač sil KISTLER

Mechanické limity snímače

Mechanické limity snímače určují limity délky pinu L_p a průměru měřící části pinu d_p při uvažovaných maximálních konáních napětích vyplývajících z úvodní tabulky limitních podmínek pro konstruované snímače. Maximální délka pinu je vypočtena z povoleného momentu na snímači. Limity velikosti kontaktní plochy pinu jsou odvozeny od dovolených sil na snímači. Křivky v grafech níže představují limitní hodnoty kombinací průměru pinu a jeho délky. Oblast nad touto křivkou je nepovolenou kombinací. Limit maximálního normálového zatížení je znázorněn ukončením křivky.

Do grafu pro válcování za tepla je přidán limit 6 mm pro teplotní limitaci snímačů.



Obrázek 3.36: Limitace velikosti pin senzoru na základě mechanických limitu snímačů pro extrémní případy válcování

Povolené hodnoty zatížení silových senzorů jsou převzaty z katalogových listů výrobce. Pro finálně zvolený snímač jsou specifikace uvedeny v příloze B.1.

Teplotní odolnost

Piezoelektrické krystaly vykazují změnu citlivosti se změnou teploty. U křemíkového krystalu výrobce zaručuje správnost měření v rozsahu -40 až 120 °C, kdy je změna

citlivosti pod 1%. Ze simulací válcování za tepla, při použití limitních podmínek, se ukazuje, že teplota 6 mm pod povrchem nepřekročí 120 °C. Umístěním snímače ve větší hloubce zaručí výrobcem předepsaný teplotní rozsah. Pro zvětšení přesnosti měření je možno kalibrovat snímače pro různé teplotní rozsahy.

Vzájemné ovlivňování měřících kanálů

Vzájemné ovlivňování měřících kanálů, přeslechy (crosstalk), vznikají jako nežádoucí jev vlivem nepřesnosti výroby a nedokonalostí použitých materiálů. Při přeslechu dochází ke generování náboje na kanále, který není reálně zatěžován, například pokud zatěžíme snímač pouze v ose Z na kanálech pro osy X a Y naměříme malý signál. Velikost přeslechů je pro tříosé piezoelektrické snímače okolo jednoho procenta.

Při aplikaci měření sil ve válcovací mezeře mohou být tečná napětí 10x menší než normálová a vzájemné přeslechy mezi kanály pak nejsou stejná. To může způsobovat větší chyby při měření v tečném směru. Pro kompenzaci tohoto jevu je využita kalibrace a sestavením přenosové matice mezi měřenými signály 3.2.2.

Ztráta elektrického náboje

Piezoelektrické snímače trpí ztrátou náboje v průběhu času z důvodu nedokonalé elektrické izolace snímače. Typická hodnota ztráty náboje je 0.05 pC/s což odpovídá asi 5 mN/s pro běžnou citlivost krystalu křemíku. Při přepočtu na napětí u pinu o průměru 1 mm se jedná o posun 20 kPa/s. Tato hodnota nepředstavuje problém při jednorázovém měření ve válcovací mezeře, kde jsou kontaktní časy krátké. Při kontinuální měření během velké válcovací kampaně v délce minut je třeba zajistit resetování zesilovače při nezatíženém stavu snímače, kdy je pin senzor mimo kontakt s válcovaným materiálem.

3.2.2 Kalibrace pin senzoru

Piezoelektrický snímač sil je z výroby kalibrován za standardních podmínek výrobce. Pro správné měření sil při nestandardním použití je potřeba snímač kalibrovat v místě instalace. Druhým důvodem kalibrace je kompenzace přeslechů mezi kanály.

Ke kalibraci byl sestaven dvuosý kalibrační přístroj 3.37. Předepnutý pin senzor je umístěn na otočnou základnu a pomocí dvou pneumatických válců může být zatěžován ve dvou osách. Síly působící na pin, snímané externě pomocí tenzometrických snímačů, a signály z piezoelektrického snímače jsou zaznamenány a použity k sestavení přenosové matice **K**. Kalibrátor je schopen vyvodit sílu 2000 N ve vertikálním a 500 N v horizontálním směru.

3. Vývoj senzorů pro měření okrajových podmínek při válcování

K určení měřených sil \mathbf{F} z elektrických signálů snímače \mathbf{O} využíváme inverzní matici \mathbf{K}^{-1} :

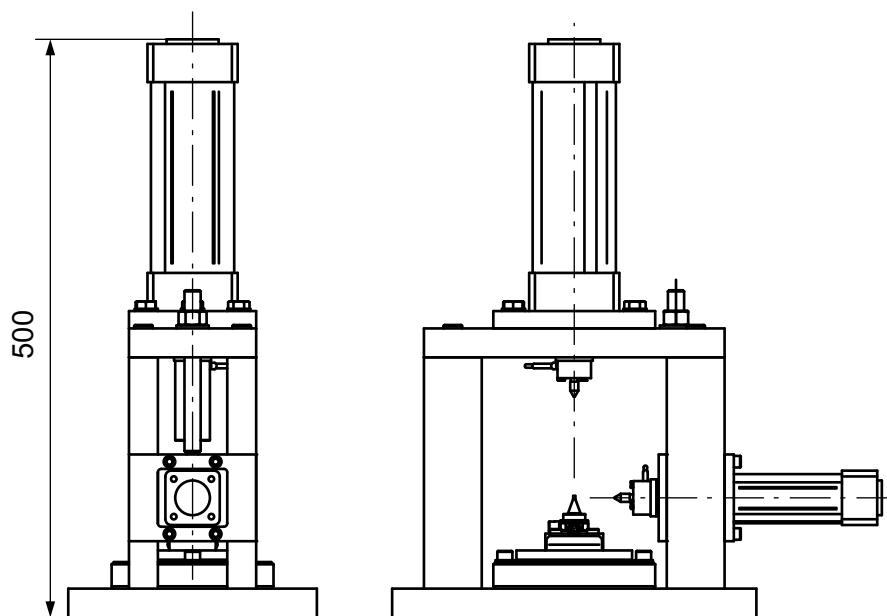
$$\begin{bmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{O} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{F} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{O} \quad (3.10)$$

kde O_i je výstupní signál snímače pro směr i , F_j je zatěžující síla ve směru j a $K_{i,j}$ je poměr mezi výstupním signálem pro směr i při zatížení silou ve směru j .

Sestavením plné přenosové matice je možno částečně kompenzovat přeslechy mezi měřícími signály (3.10). Teto postup předpokládá lineární chování snímače.



Obrázek 3.37: Kalibrátor pro pin senzor

4

Experimentální měření

4.1 Teplotní měření na experimentální válcovací stolici

4.1.1 Pilotní měření - etapa I

Pro měření byly použity teplotní senzory popsané v kapitole 3.1. Čtveřice senzorů byla umístěna ve střední rovině pracovního válce o průměru 469 mm v rozteči 90°. Dle typu, se jednalo o dvojici pájených a dvojici vrтанých teplotních senzorů (obrázek 3.4). Pro záznam teplot byl použit měřicí systém s vzorkovací frekvencí 10 kHz při 16 bitovém rozlišení (5 kHz pro redukci 20%).

Jako testovací materiál byly používány ocelové pásy o počáteční tloušťce 60 mm, a šířce 100 mm. Během jednoho testu prošel zkušební vzorek několikrát válcovací mezerou. Nominální redukce byla pro každý průchod stejná, její reálná hodnota se mohla lišit.

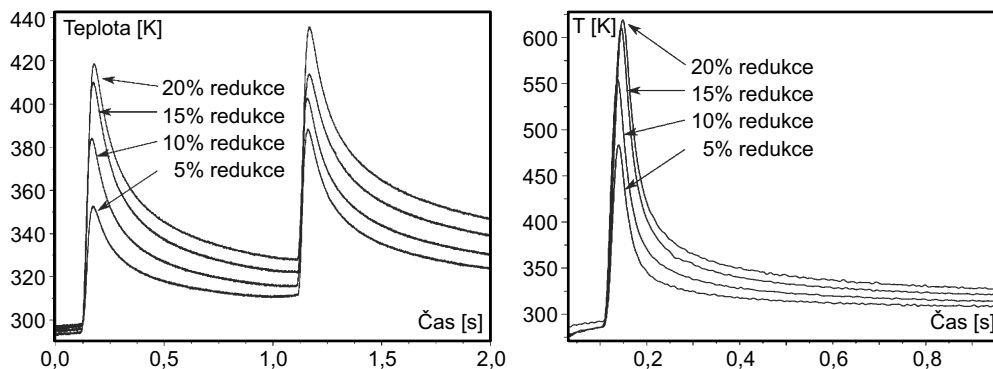
Tabulka 4.1: *Tabulka měření pro etapu I*

Test	Nominální redukce ε [%]	$v_{obv.}$ [m/s]	Teplota v peci [°C]	α [°]	t_k [ms]
P1	5	1,5	1150	6,5	17,7
P2	10	1,5	1150	8,4	22,9
P3	15	1,5	1150	10,6	28,9
P4	20	1,5	1150	12	32,7

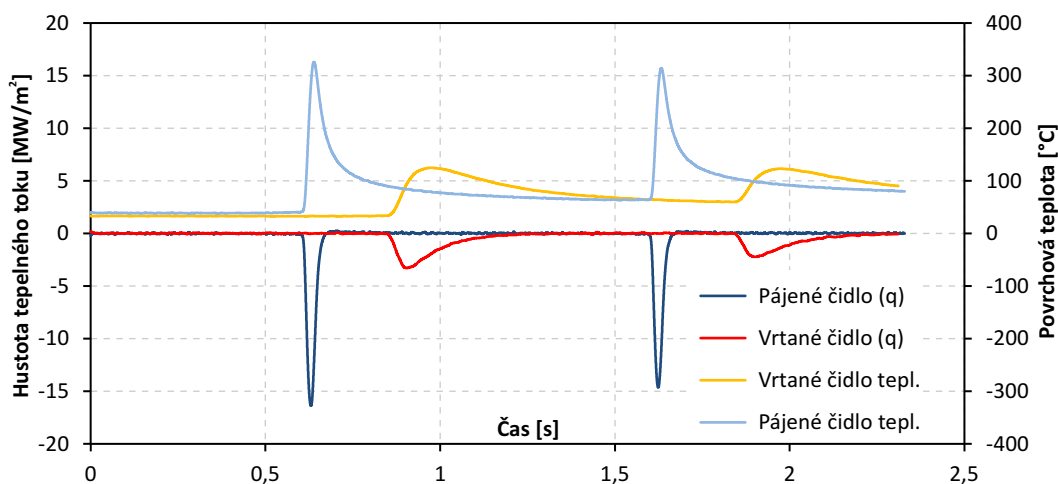
Výsledky měření pro pájený senzor byly publikovány v článku [63], kde byly srovnány teplotních záznamy a vypočtené tepelné toky a povrchové teploty pro různé redukce (obrázek 4.1). Obrázek 4.2 ukazuje hustotu tepelného toku a povrchovou teplotu jako výsledek z inverzní úlohy vedení tepla pro případ 10% redukce. Graf zachycuje dva kontakty teplotního senzoru s provalkem.

Při srovnání měřených teplot a vypočtené okrajové podmínky (obrázek 4.3) je na první pohled zřejmé, že vrтанý teplotní senzor má horší teplotní odezvu a rekonstruovaný tepelný tok se výrazně liší svou šířkou oproti teoretickém času kontaktu ve válcovací mezeře t_k .

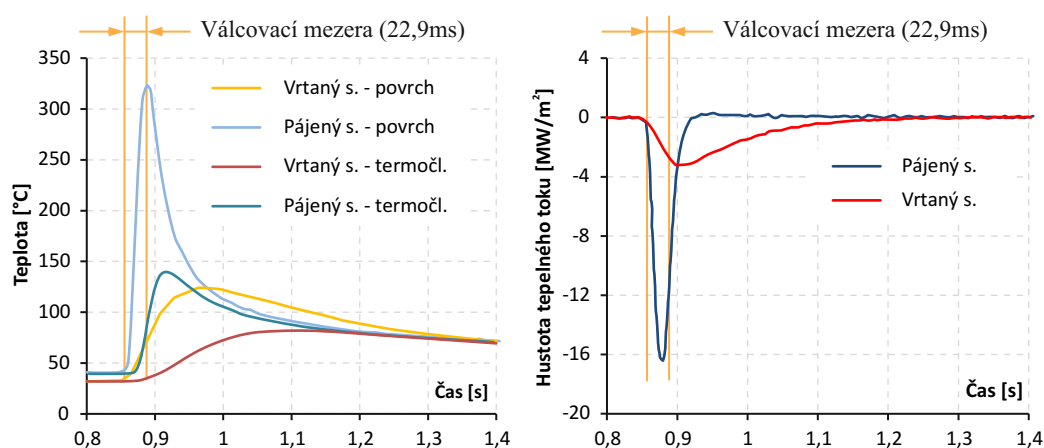
4. Experimentální měření



Obrázek 4.1: Měřené teploty (vlevo) a teploty povrchu (vpravo) pro pájený senzor při různé redukci vzorku [63]



Obrázek 4.2: Test P2, srovnání pájeného a vrtaného senzoru - výsledky z inverzní úlohy pro druhý průchod válcovaného vzorku stolicí



Obrázek 4.3: Přímé srovnání pájeného a vrtaného senzoru v porovnání s válcovací mezerou, test P2, druhý průchod válcovaného vzorku stolicí

4.1.2 Pilotní měření - etapa II

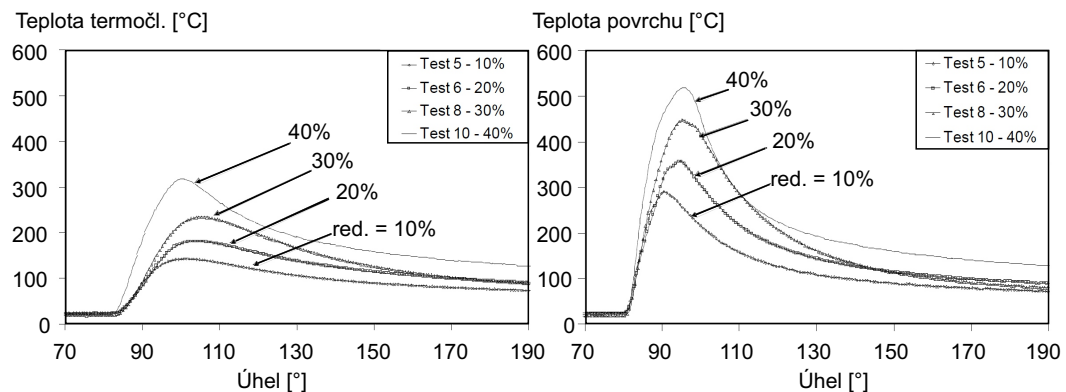
Měření využívá stejný pracovní válec jako etapa I. Válec byl přebroušen na průměru 465 mm a osazen novými senzory (obrázek 3.6). Pro záznam teplot byl použit měřicí

4.1. Teplotní měření na experimentální válcovací stolici

systém s nižší vzorkovací frekvencí 3,6 kHz při 16 bitovém rozlišení. Jako testovací materiál byly používány stejné ocelové pásy o počáteční tloušťce 60 mm, a šířce 100 mm. Během jednoho testu prošel zkušební vzorek několikrát válcovací mezerou. Nominální redukce byla pro každý průchod stejná, její reálná hodnota se mohla lišit.

Tabulka 4.2: *Tabulka měření pro etapu II*

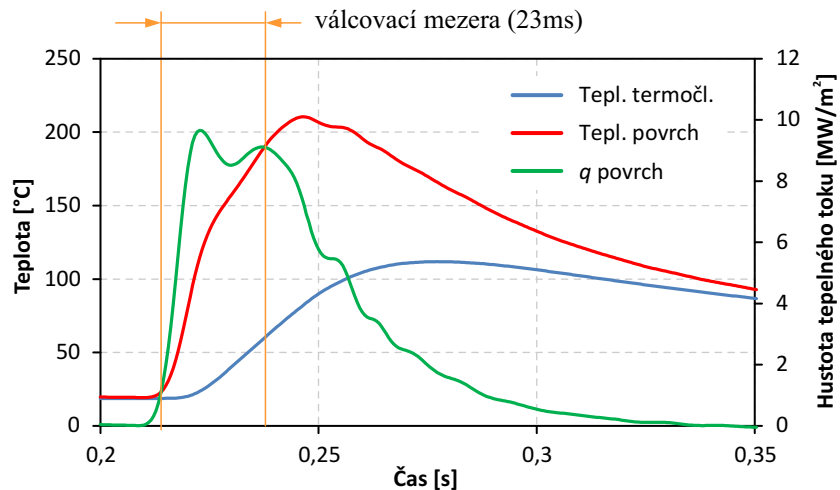
Test č.	Nominální redukce ε [%]	$v_{obv.}$ [m/s]	Teplota v peci [°C]	α' [°]	t_k [ms]	F_v [kN]
5	10	1,5	1050	8,4	22,7	346
6	20	1,5	1050	12	32,4	610
8	30	1,5	1050	14	37,8	875
10	40	0,73	1050	17,4	96,7	1150
11	40	0,35	1050	17,4	201,7	1162
12	40	0,77	1050	17,4	91,6	1000
13	40	0,41	1050	17,4	172,2	1000
14	10	1,5	1050	8,4	22,7	361
15	10	0,5	1050	8,4	68,1	323
16	10	1,5	1050	8,4	22,7	404
17	10	1,5	1050	8,4	22,7	422



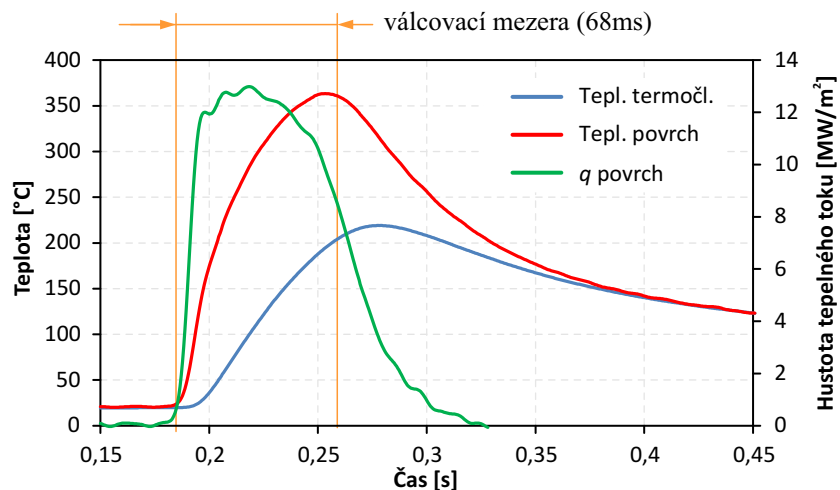
Obrázek 4.4: *Měřené teploty (vlevo) a teploty povrchu (vpravo) pro pájený senzor při různé redukci, testy č.5–10, hodnoty pro první průchod [64]*

Výsledky z měření byly publikovány v článcích [64, 65]. Okrajová podmínka ve formě součinitele přestupu tepla byla použita ve výpočtu životnosti válce. Závěrem článku je, že nehomogenní průběh přestupu tepla výrazně ovlivňuje životnost válců zrychlenou kumulací plastického přetvoření.

Výsledky inverzní úlohy závisí nejen na hloubce termočládku, ale také na válcovací rychlosti. Při stejné redukci byly provedeny dva testy s rozdílnou rychlostí (obrázek 4.5, 4.6). Pro válcování rychlostí 0,5 m/s má tepelný tok v mezeře realistickou šířku.

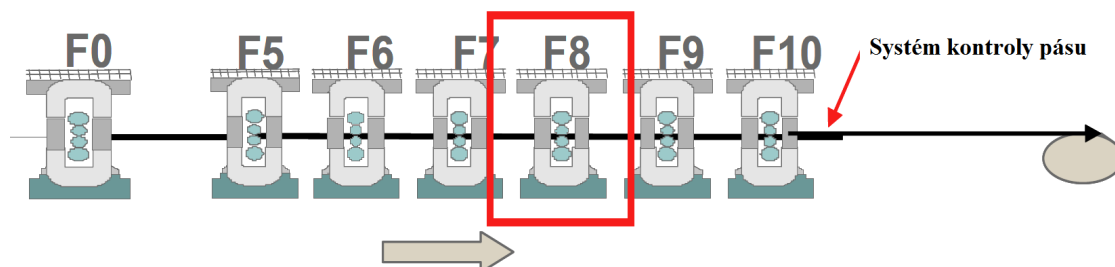


Obrázek 4.5: Test č. 14 - vliv válcovací rychlosti na rekonstrukci hustoty tepelného toku inverzní úlohou, $v_{obv.} = 1,5 \text{ m/s}$, první průchod



Obrázek 4.6: Test č. 15 - vliv válcovací rychlosti na rekonstrukci hustoty tepelného toku inverzní úlohou, $v_{obv.} = 0,5 \text{ m/s}$, první průchod

4.2 Teplotní měření na válcovací trati - etapa III

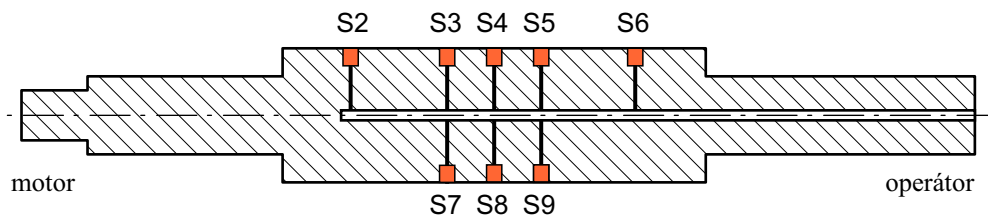


Obrázek 4.7: Schéma válcovací tratě

Pro poloprovodní měření byla vybrána válcovací trat ArcelorMittal v Seremange schématicky znázorněné výše. Horní válec stolice F8 byl osazen osmi vrtnými teplotními senzory BRC (obrázek 3.7). Senzory BRC mají termočlánek umístěný

4.2. Teplotní měření na válcovací trati - etapa III

blíže povrchu válce pro záznam teplot během začátku válcovací kampaně. Oproti tomu senzory ERC navržené pro konec válcovací kampaně nebyly při tomto měření osazeny. Po instalaci senzorů byl celý povrch válce přebroušen a jednotlivá čidla kalibrována pomocí laminární trysky a horké vody. Výsledná poloha termočlánků vůči povrchu válce je uvedena v tabulce 4.4 spolu se slovním hodnocení kvality povrchu po skončení měření.



Obrázek 4.8: Pozice senzorů ve válci

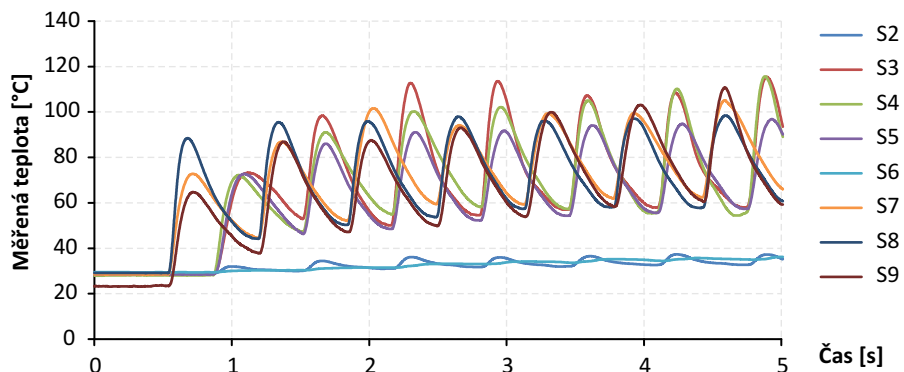
Během měření zanechávají teplotní senzory na povrchu válcovaného materiálu otisk jehož velikost byla měřena systémem kontroly kvality na konci tratě. Velikost otisku nesměla být větší než nastavený limit po celou dobu válcování, jinak byl test přerušen.

Tabulka 4.3: Tabulka měření pro etapu III

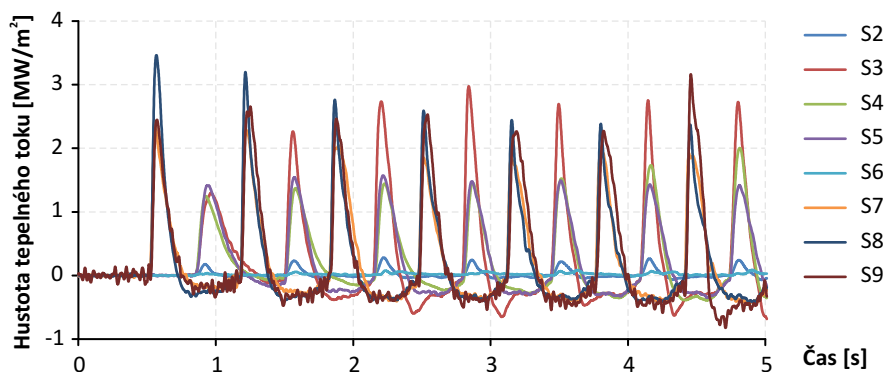
Svitku č.	h_0 [mm]	h_1 [mm]	Teplota pásu [°C]	Materiál	$v_{obv.}$ [m/s]	l'_d [mm]	t_k [ms]	F_v [ton]
1	9,9	6,9	950	M424	3,2	31,7	8,7	1114
2	9,9	6,9	938	M424	3,5	31,7	7,8	1105
3	9,8	6,9	949	M424	3,1	31,3	8,7	1065
4	10,0	7,0	944	M424	3,2	32,2	8,5	1038
5	9,4	6,5	943	M424	3,4	31,1	8	1046
6	7,9	5,2	950	U73S	4,7	29,8	5,4	1286
7	6,6	4,3	950	M323	5,4	27,6	4,9	1371
13	8,3	5,7	955	U73S	4,3	29,7	6	1285
14	8,2	5,7	959	L41T	4,5	29,2	5,6	1339
15	8,0	5,6	960	L41T	4,5	28,6	5,7	1192
16	7,5	5,1	960	L20T	4,7	28,4	5,3	1420
17	7,4	5,1	959	L20T	4,7	28,3	5,4	1307
18	7,7	5,3	960	L41B	4,5	28,6	5,6	1266
19	7,7	5,3	961	L41B	4,4	28,7	5,7	1290
20	7,4	5,0	958	L20T	4,8	28,1	5,3	1333
21	7,2	4,9	956		5,1	28,3	5,2	1393

4. Experimentální měření

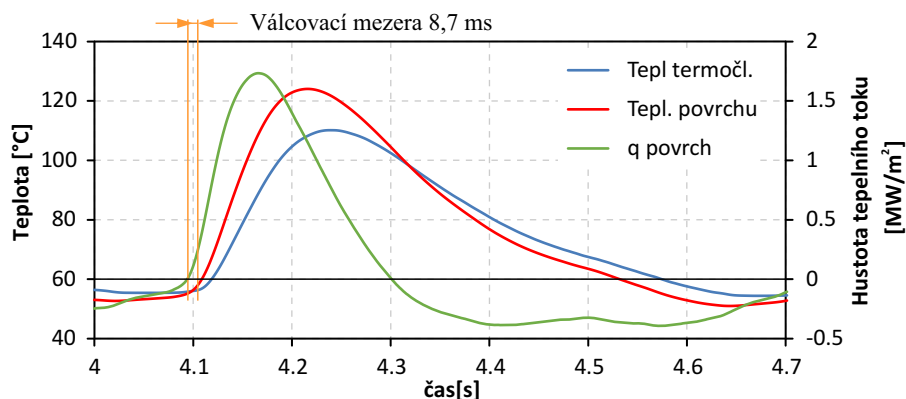
Graf na obrázku 4.9 ukazuje záznam teplot ze všech senzorů na počátku válcování svitku č.1. Teploty se po nárůstu dostanou do pseudostabilního režimu, kde je odvod tepla chlazením a ohřev v mezeře v rovnováze. K tomuto režimu docházelo obvykle po 15 až 20 sekundách.



Obrázek 4.9: Svitek č.1, měřené teploty v jednotlivých senzorech, začátek válcování



Obrázek 4.10: Svitek č.1, výsledky z inverzní úlohy, začátek válcování



Obrázek 4.11: Svitek č.1, sensor S4, srovnání teplot a hustoty tepelného toku s velikostí válcovací mezeře

V grafu na obrázku 4.11 je zobrazen průběh teplot během jedné otáčky válce pro sensor S4 umístěný ve středu šířky válce (viz umístění senzorů na obrázku 4.8). Graf

4.2. Teplotní měření na válcovací trati - etapa III

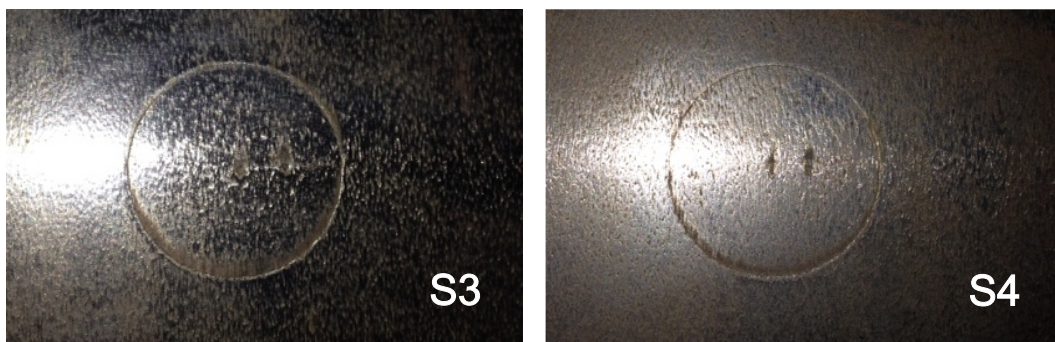
zobrazuje nejen nárůst teploty ve válcovací mezeře, ale také chlazení na vstupu a výstupu z válcovací mezery.

Celkem bylo úspěšně vyválcováno 15 svitků. Stopy od senzorů na pásu byly během celého měření akceptovatelné, pod mezní hodnotou inspekčního systému. Testy byly zastaveny z důvodu detekce povrchové vady pásu působenou silným poškozením povrchu jednoho ze senzorů senzoru během válcování 16. svitku.

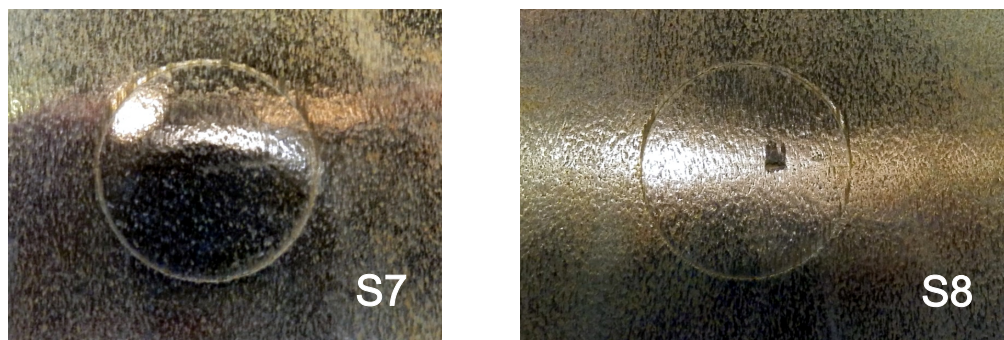
Povrch senzoru vykazoval na konci testů průměrné opotřebení podobně jako okolní povrch válce. Výjimkou bylo několik úzce lokalizovaných hlubokých trhlin (obrázek 4.12, 4.13). Jejich vzhled a umístění ukazuje na oslabení vlivem přítomnosti dutiny termočládku, kde byl materiál z povrchu vytržen. Poloha těchto defektu byla podobná. Jedním místem byl prostor nad měřícím koncem termočládku, druhé místo bylo asi v polovině hloubky díry pro termočlánek.

Tabulka 4.4: Poškození senzorů po konci válcovací kampaně v závislosti na hloubce termočládku z kalibrace

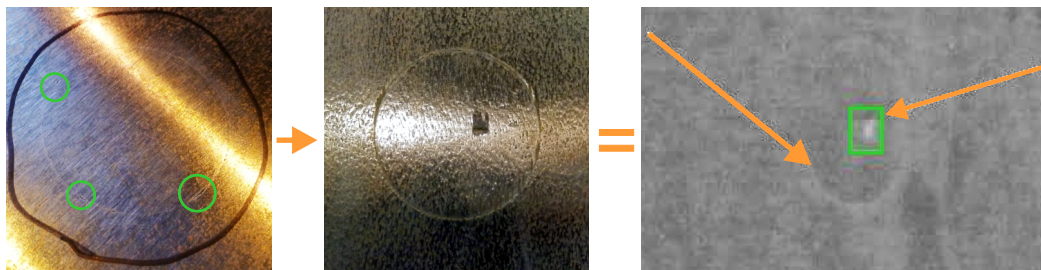
	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Poškození	malé	střední	silné	střední	žádné	žádné	silné	malé
Kalibrace h_t [mm]	0,49	0,43	0,23	0,42	0,64	0,59	0,53	0,67



Obrázek 4.12: Povrch senzorů S3, S4 po vyválcování 15 svitků



Obrázek 4.13: Povrch senzorů S7, S8 po vyválcování 15 svitků

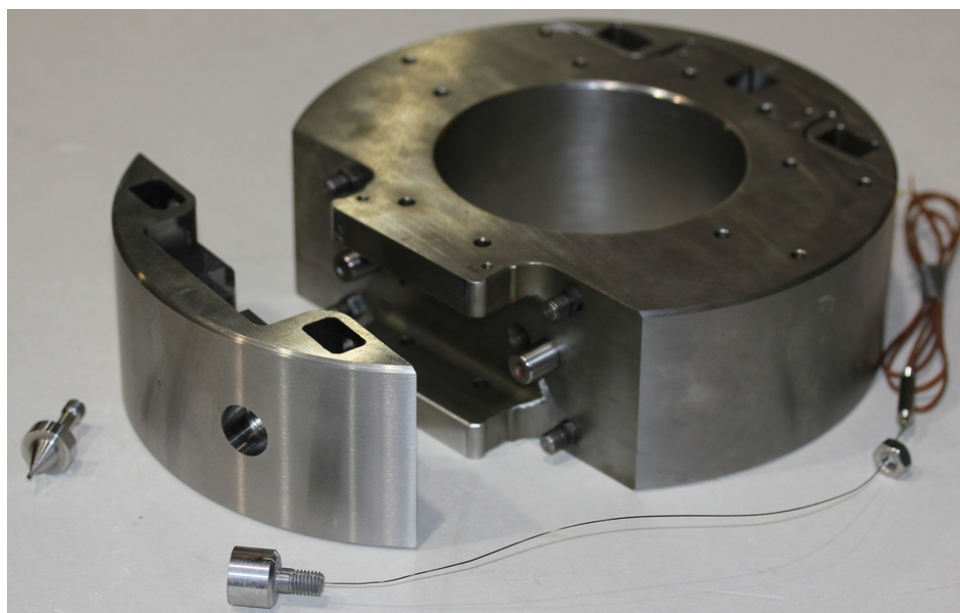


Obrázek 4.14: Povrch senzoru po přebroušení (vlevo), po vyválnování 15 svitků (uprostřed), obraz jeho otisku ve válcovaném materiálu v detekčním systému (vpravo)

4.3 Měření tření - MEFOS

Pro měření koeficientu tření pomocí pin senzoru byl připraven experimentální pracovní válec na pracovišti Swerea MEFOS (v dalším testu je tato fáze měření označována jako měření MEFOS).

Pracovní válec ve formě prstence o průměru 230 mm je rozdělen na tři části (obrázek 4.15). Dvě kruhové výseče válce („půlměsíce“) byly osazeny různými typy senzorů. První „půlměsíc“ obsahuje senzor ROLLSURF měřící kontaktní napětí pomocí sledování změn zatížení měřicího elementu při vstupu a výstupu z válcovací mezery (viz. kapitola 3.2). V druhém „půlměsíci“ je instalován pin senzor s piezoelektrickým snímačem sil (obrázek 3.34). Jako doplňkový senzor je ve válci umístěn také pájený teplotní senzor (obrázek A.11).

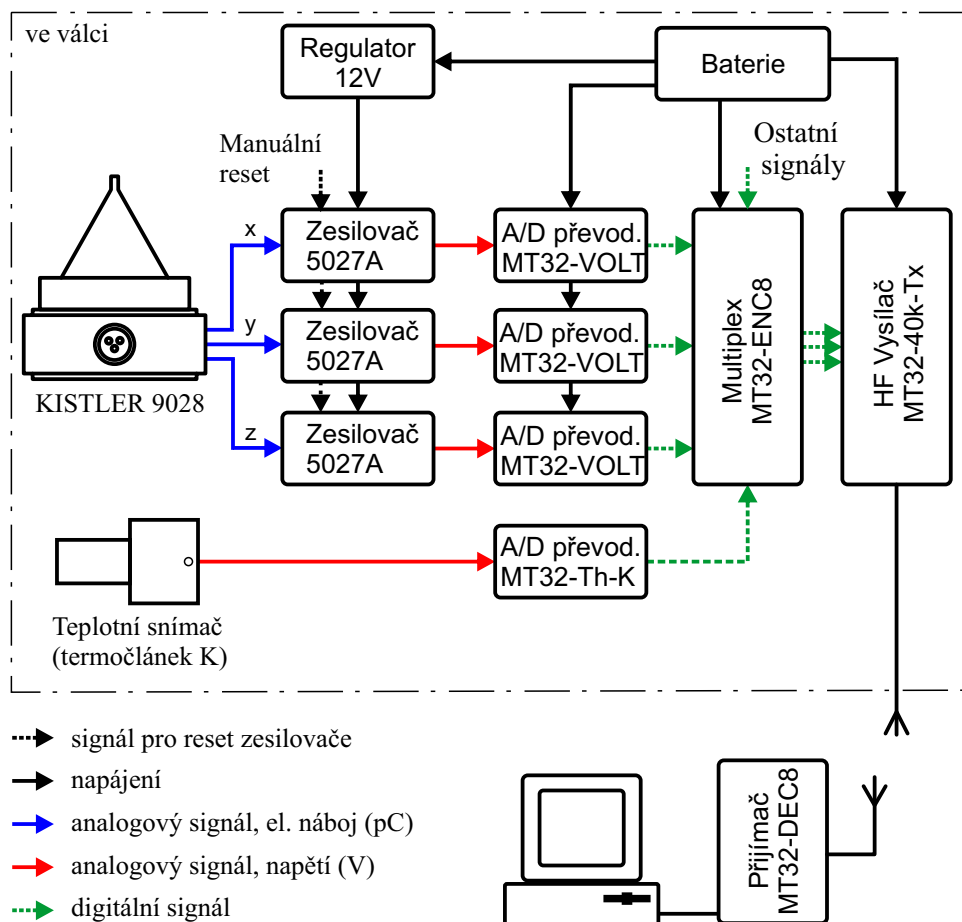


Obrázek 4.15: Pracovní válec určený pro instalaci senzorů

Signály ze senzorů jsou do měřicího počítače přenášeny bezdrátově, schématicky je měřicí systém zobrazen na obrázku 4.16. Výstupy ze senzorů jsou přímo ve válci zesíleny a převedeny na digitální formu pomocí jednotlivých modulů a následně

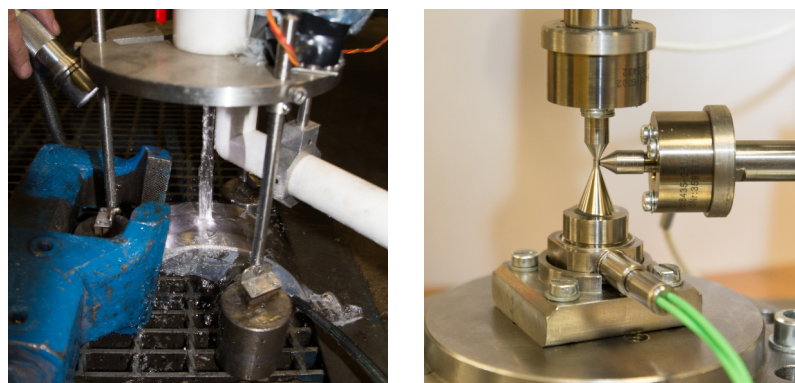
4.3. Měření tření - MEFOS

indukčním přenosem vyveden ven z rotujícího válce a uloženy v počítači. Měřicí frekvence systému je 3 kHz při 12 bitovém rozlišení a využití všech měřicích kanálů.



Obrázek 4.16: Blokové schém přenosu signálu z měřícího válce

Po osazení senzoru byl povrch válce přebroušen pomocí speciální brusky na válcové povrchy. Následovala kalibrace jednotlivých senzorů (obrázek 4.17).



Obrázek 4.17: Kalibrace teplotního a pin senzoru

Jako válcovaný materiál posloužily ocelové (S235JR) a hliníkové tyče (6060-T6) obdélníkového průřezu. Šířka tyče byla konstantní 30 mm, délka okolo 2 m. Tloušťka

4. Experimentální měření

materiálu byla proměnná a je uvedena v tabulce měření 4.5.

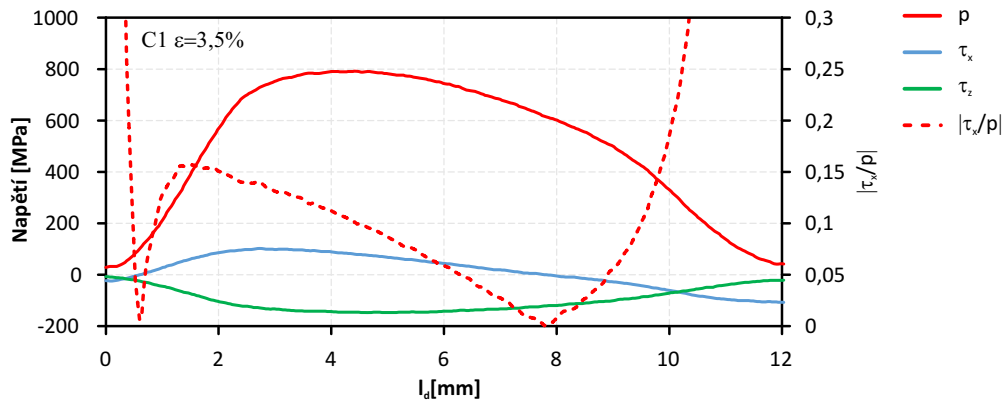
Tabulka 4.5: Základní parametry měření MEFOS

Test	h_0 [mm]	h_1 [mm]	ε [%]	Teplota [°C]	Materiál	$v_{obv.}$ [m/s]	l'_d [mm]	t_k [ms]	F_v [kN]	
Válcování za studena	C1	8,30	8,01	3,5	17	6060-T6	0,94	6,4	6,8	89
	C2	8,30	7,89	4,9	17	6060-T6	0,94	7,4	7,9	108
	C3	8,30	7,76	6,5	17	6060-T6	0,94	8,3	8,8	127
	C4	5,00	4,81	3,9	18	6060-T6	0,94	5,3	5,7	71
	C5	5,00	4,73	5,5	18	6060-T6	0,94	5,6	6	87
	C6	5,00	4,55	9,1	18	6060-T6	0,94	7,9	8,4	128
	C7	5,00	4,49	10,3	18	6060-T6	1,00	8,4	8,4	137
	C8	5,00	4,46	10,9	18	6060-T6	1,00	8,8	8,8	128
	C9	5,00	4,46	10,8	18	6060-T6	1,00	8,7	8,7	126
Válcování za tepla	H1	10,30	9,61	6,7	1068	S235JR	0,94	9,1	9,7	31
	H2	10,30	8,12	21,2	1133	S235JR	0,94	16,1	17,2	71
	H3	10,30	7,27	29,4	1101	S235JR	0,94	18,9	20,1	101
	H4	10,30	6,84	33,6	1116	S235JR	0,94	20,2	21,5	122
	H5	5,45	5,03	7,7	1084	S235JR	0,94	7,1	7,6	26
	H6	5,45	4,30	21,1	1087	S235JR	0,94	11,8	12,6	76
	H7	10,30	8,65	16	980	S235JR	1,00	14	14	79
	H8	10,30	7,41	28,1	985	S235JR	1,00	18,6	18,6	139
	H9	10,30	7,80	24,3	998	S235JR	1,00	17,3	17,3	139
	H10	10,30	8,90	13,6	985	S235JR	1,00	12,9	12,9	68
	H11	5,47	4,36	20,3	985	S235JR	1,00	11,7	11,7	88
	H12	5,47	4,23	22,7	985	S235JR	1,00	12,3	12,3	101
H13	5,47	4,02	26,5	985	S235JR	1,00	13,4	13,4	125	
H14	5,47	5,13	6,2	983	S235JR	1,00	5,8	5,8	23	
H15	8,00	7,48	6,5	1002	S235JR	1,00	7,9	7,9	31	
H16	8,00	6,31	21,1	995	S235JR	1,00	14,3	14,3	97	
H17	8,00	6,34	20,8	996	S235JR	2,00	14,2	7,1	102	
H18	8,00	6,36	20,5	985	S235JR	3,00	14,1	4,7	103	
H19	8,00	6,00	25	999	S235JR	1,00	15,5	15,5	113	
H20	8,00	5,78	27,8	990	S235JR	1,00	16,4	16,4	133	

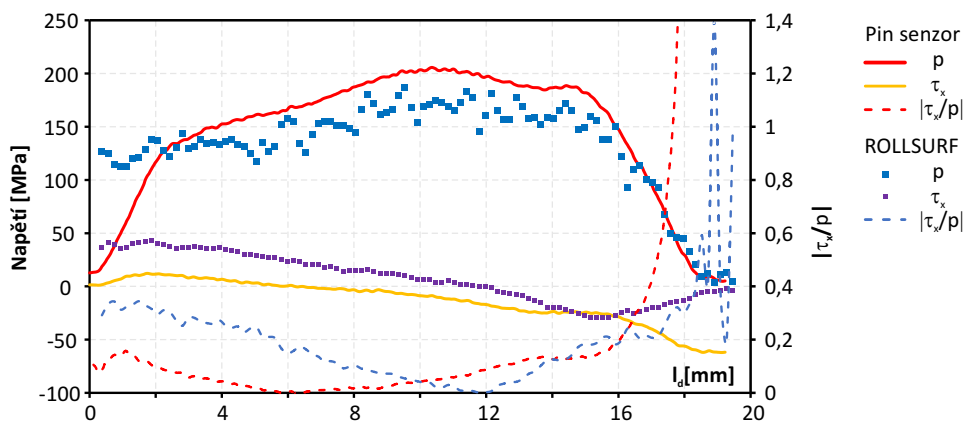
Výsledky z měření byly publikovány v časopise [66], následující grafy ukazují vybraná měření a porovnávají senzory mezi sebou. Grafy ze všech měření jsou součástí přílohy C.

4.3.1 Výsledky ze silových senzorů

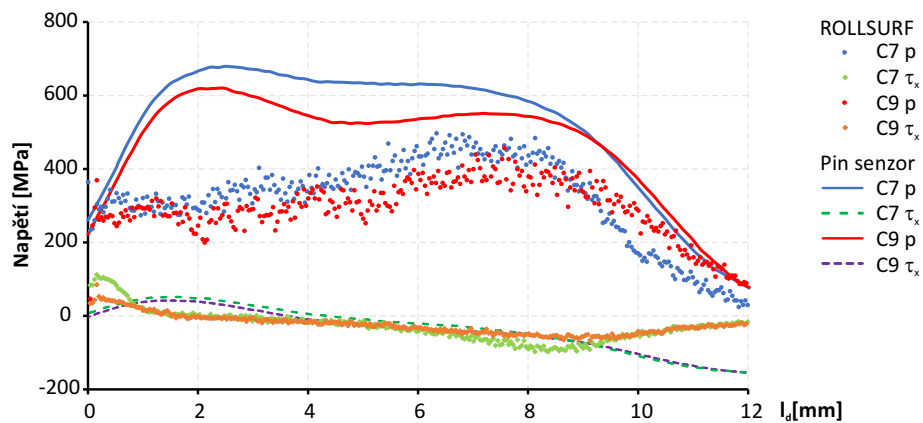
Typický průběhy kontaktních napětí z pin senzoru a ROLLSURF senzoru ukazují grafy níže.



Obrázek 4.18: C1 - pin senzor, kontaktní napětí ve válcovací mezeře, poměr $|\tau_x/p|$



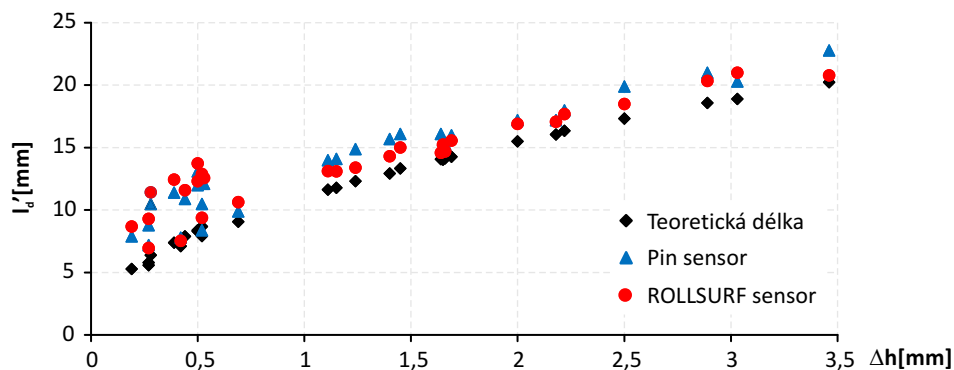
Obrázek 4.19: H2 - kontaktní napětí ve válcovací mezeře, poměr $|\tau_x/p|$, porovnání senzoru ROLLSURF a pin senzoru



Obrázek 4.20: Srovnání kontaktních napětí pro válcování s mazáním (C9) a bez (C7)

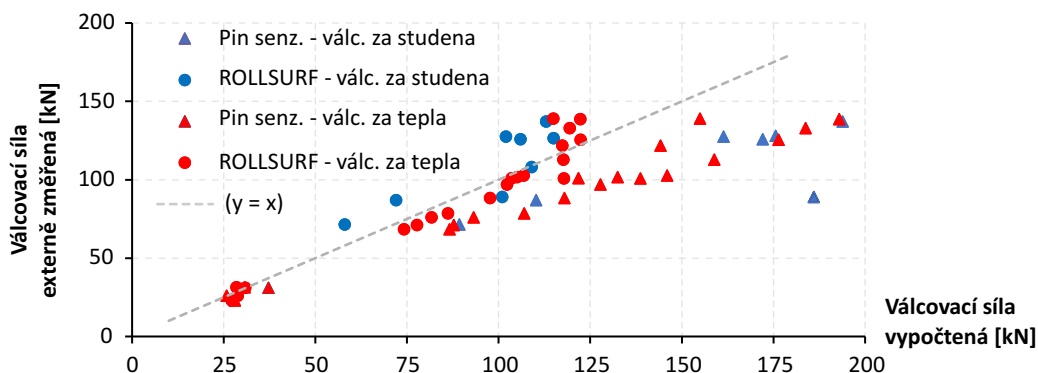
4. Experimentální měření

Délka kontaktu vyhodnocená z průběhu signálu pro jednotlivé silové senzory byla vykreslena v závislosti na absolutní deformaci Δh a porovnána s teoretickou délkou pásma deformace l'_d (obrázek 4.21).



Obrázek 4.21: Srovnání teoretické délky pásma deformace a délky kontaktu pro jednotlivé senzory při různé redukci

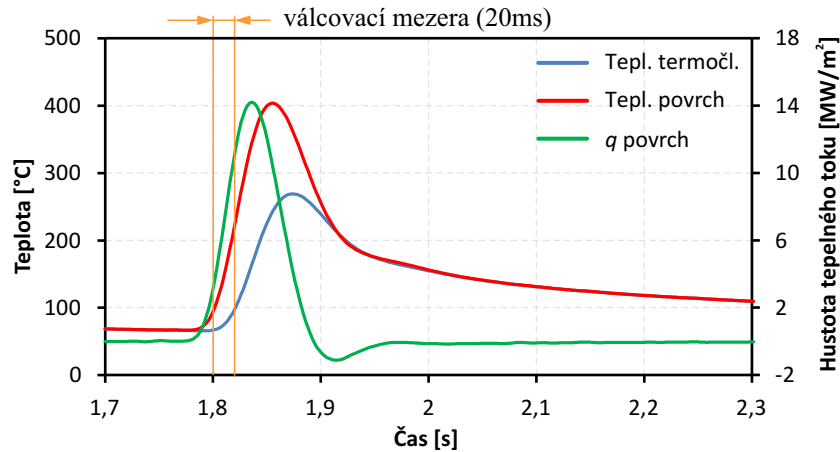
Z průběhu normálového kontaktního napětí p lze získat celkovou válcovací sílu a porovnat se silou měřenou v ložiskách válcovací stolice (obrázek 4.22). Při tomto srovnání dává pin senzor větší válcovací síly než externě změřené. ROLLSURF senzor se drží relativně dobré schody, mírně válcovací sílu podhodnocuje.



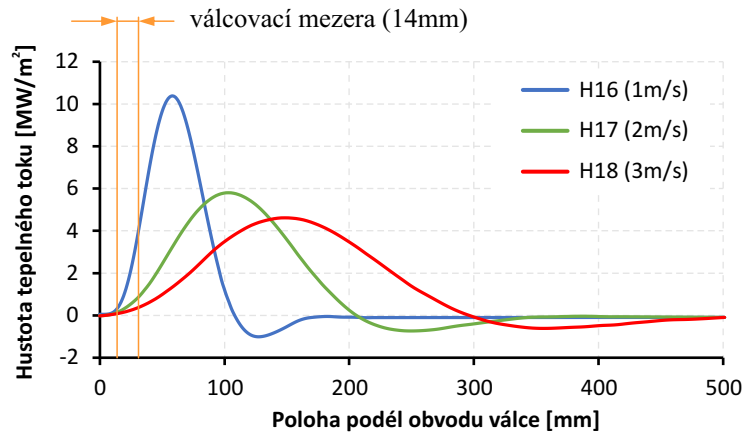
Obrázek 4.22: Celková válcovací síla vypočtena z průběhu kontaktních tlaků dle pin senzoru a ROLLSURF senzoru v porovnání s válcovací silou z externího měření

4.3.2 Výsledky z teplotního senzoru

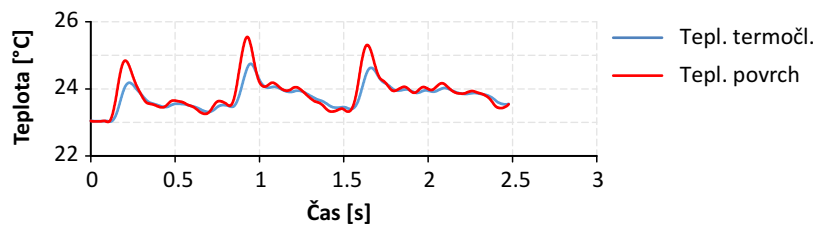
Změřené teploty a výsledky z inverzní úlohy vedení tepley vykazují silnou teplotní setrvačnost respektive slabou teplotní odezvu senzoru. Šířka tepelných toků silně závisí na rychlosti válcování (obrázek 4.24). Výsledky z válcování za studena ukazují slabý teplotní signál, u měření C7 byl maximální nárůst teploty $1,2^{\circ}\text{C}$ (obrázek 4.25).



Obrázek 4.23: H3 - Výsledky z inverzní úlohy pro druhou otáčku válcování



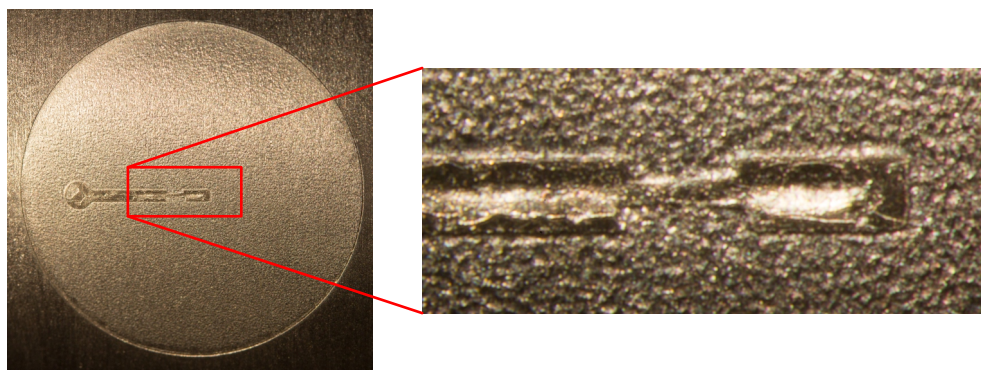
Obrázek 4.24: Vypočtená hustota teplého toku ve válcovací mezeře v závislosti na rychlosti válcování



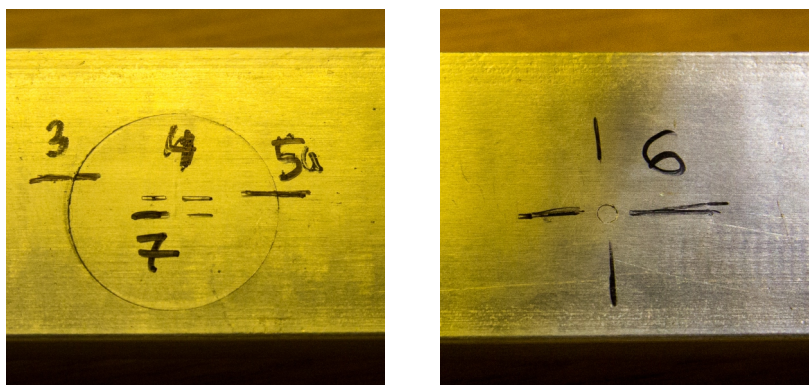
Obrázek 4.25: Měřená teplota v termočláncu a povrchová teplota pro případ válcování za studena C7

4.3.3 Kontrola povrchu

Během válcování byla vizuálně sledována velikost otisků senzorů na provalku (obrázek 4.27), na konci testu se kontroloval kvalita povrchu senzorů (obrázek 4.26).



Obrázek 4.26: Propad pájky nad termočlánkem



Obrázek 4.27: Otisk senzoru na povrchu provalku; teplotní senzor vlevo, pin vpravo

5

Hodnocení výsledků měření

5.1 Teplotní senzory

Prezentované výsledky ve všech etapách měření ukazují hustotu tepelného toku a teplotu na povrchu válce. Pro vyhodnocení součinitele přestupu tepla je potřeba znát teplotu povrchu válcování materiálu (viz. kapitola 2.2). Tato informace však není přímo k dispozici. Můžeme využít teplotu materiálu T_{p_mat} před vstupem do válcovací mezery:

$$h_k = \frac{q}{T_{p_mat} - T_{p_val}} \quad (5.1)$$

Při tomto způsobu výpočtu se jedná pouze o dolní limit hodnoty h_k , protože teplota povrchu válcovaného materiálu se během průchodu válcovací mezerou mění, u válcování za tepla klesá. Pro korektní zjištění součinitele přestupu tepla v kontaktu je potřeba teplotní model nejen válce, ale také provalku.

U všech měření s krátkým časem v kontaktu vychází délka tepelného kontaktu s válcem delší než je ve skutečnosti možná. Z hlediska aplikace v modelech je možné tento údaj „zaostřit“ výpočtem ekvivalentní hustoty tepelného toku q_{eq} na skutečné délce válcovací mezery. Vycházíme z energetického předpokladu, že množství tepla v kontaktu je vypočteno pomocí inverzní úlohy korektně :

$$q_{eq} = \frac{1}{l_d} \int_0^{l_d q+} q(x) dx \quad (5.2)$$

Integraci provádíme na délce $l_d q+$, kde je kladný tepelný tok.

Měření na testovací stolici

Pilotní testy (kapitola 4.1) byly použity pro verifikaci inverzní úlohy a ověření konstrukce teplotních senzorů. Při dostatečně dlouhém kontaktním čase byla rekonstrukce hustoty tepelného toku správná (viz. obrázek 4.6). S nárůstem rychlosti válcování a snižováním redukce (obecně zkracování času v kontaktu) je jeho velikost v maximu podhodnocována a čas kontaktu ve válcovací mezeře je nerealistický dlouhý (viz. obrázek 4.5). Toto má úzkou vazbu na hloubku termočlánu respektive jeho teplotní citlivost (viz. obrázek 4.3, simulovaný příklad válcování za studena a jeho citlivost na čas kontaktu viz. kapitola 3.1.4).

Poloprovozní měření na válcovací trati

Teplotní senzory v pracovním válci zanechávají na povrchu svitku kruhový otisk vyznačující hranici těla senzoru. Jeho velikost je pod limity systému kontroly kvality povrchu na konci tratě (4.14). Na rozhraní senzoru a povrchu válce se již po kalibraci objevili drobné vady, během válcování se rozhraní více zviditelnilo. Některé senzory navíc vykazovaly silné poškození povrchu (obrázky 4.12, 4.13). Poškození poměrně dobře korelovalo s hloubkou zjištěnou pomocí kalibrace. Při hloubce větší než 0.6 mm senzory vykazují malé poškození povrchu (tabulka 4.4).

Hloubka termočlánu okolo 0,5 mm je pro správnou rekonstrukci součinitele přestupu tepla pro dané parametry válcování nedostatečná. Rekonstruovaná hustota tepelného toku je silně roztažená v čase (obrázek 4.11). U zobrazeného příkladu má kladná hodnota q ve směru z provalku do válce šířku ≈ 200 ms což oproti teoretickému kontaktnímu času 8,7 ms je nárůst více než 20násobný. Proti menší hloubce termočlánu silně vystupuje mechanické poškození senzoru. Jak bylo uvedeno výše pro válcovací kampaň etapy III. je bezpečná hloubka větší než 0,6 mm.

Teplotní senzor při měření MEFOS

Výsledky z měření teplot jsou nedostatečné pro detailní rekonstrukce tepelných toků ve válcovací mezeře. Ačkoli teplotní senzor vycházel ze stejné konstrukce jako senzory pro fázi I., kde se podařilo válcovací mezeru poměrně dobře popsat, parametry válcování u měření MEFOS, hlavně rychlost a menší poloměr válce zkrátily čas kontaktu a tím zmenšili teplotní signál měřený senzorem.

Při válcování za studena byl zaznamenán teplotní nárůst na senzoru od plastické deformace materiálu (viz. obrázek 4.25).

Povrch teplotního senzoru byl během válcování poškozen. Na obrázku 4.26 je vidět zborcení pájky v oblasti termočlánu a podélné praskliny. K poškození došlo pravděpodobně při počátečních testech během válcování za studena. Navzdory poškození povrchu senzor stále dával dobrý teplotní signál.

5.2 Měření tření pomocí pin senzoru

Během měření byly zaznamenány problémy se zanášením mezery okolo pinu. Na průběhu tečného napětí v příčném směru τ_z se objevuje neočekávaně vysoká hodnota napětí. A to navzdory umístění měřicích senzorů ve střeně rovině válcovaného materiálu, kde by případné vlivy příčného šíření měly být nulové. Možným vysvětlením je uvíznutí materiál v mezeře, který může způsobovat přenos normálové síly do tečných směrů.

Pokud se zaměříme čistě na normálové napětí p , které je ovlivněno ucpáváním nejméně, vidíme při porovnání s ROLLSURF senzorem podobný průběh napětí (obrázek 4.19). Bohužel u vyšších redukcí vykazuje pin senzor vyšší hodnoty napětí než ROLLSURF (obrázek 4.20). Toto se objevuje i při porovnání válcovací síly vypočtené z průběhu normálového kontaktního napětí s externím měřením na válcovací stoličce (obrázek 4.22). Pin senzor vykazuje až o 50% větší válcovací sílu. Naproti tomu ROLLSURF senzor indikuje o něco menší válcovací sílu, než je hodnota externě změřená.

Tato práce prezentuje konstrukci a měření s pomocí teplotních a silových senzorů pro popis okrajových podmínek ve válcovací mezeře. Práce byla rozdělena na samostatnou konstrukci teplotního senzoru a jeho aplikace a vývoj silového senzoru pro měření tření ve válcovací mezeře.

Prezentované výsledky ukazují několik úspěšných realizací teplotních senzorů při různých podmínkách válcování. Kritickým parametrem teplotních čidel, pro správnou rekonstrukci tepelných toků ve válcovací mezeře, je jeho teplotní odezva. Ta je definována hlavně hloubkou zabudovaného termočlásku v těle senzoru. Otázka životnosti teplotních čidel představuje důležitou otázku, která však jde proti předchozímu požadavku na dobrou teplotní odezvu. Z prezentovaných výsledků válcování v poloprovozních podmínkách válcovací tratě byla, z hlediska životnosti, identifikována hloubka termočlásku 0,6 mm jako limitní. Od této hodnoty hlouběji nebylo pozorováno výrazné poškození povrchu teplotního senzoru. Tato hloubka však není dostatečná pro správnou rekonstrukci tepelných toků v mezeře při daných parametrech válcování. Výsledky i přesto je možno použít pro stanovení celkových tepelných toku procházejících válcovací mezerou.

Silový senzor pro měření kontaktních napětí a koeficientu tření ve válcovací mezeře byl úspěšně implementován v testovacím válci na pracovišti Swerea MEFOS. Ačkoliv výsledky nebyly tak přesvědčivé jako v případě teplotních senzorů, vzhledem k problémům s ucpáváním mezery okolo pinu, použití piezoelektrického snímače sil prokazuje z hlediska měřicího systému velmi dobré vlastnosti. Výsledky z pin senzoru byly srovnány s měřením pomocí senzoru ROLLSURF, kde pro malou redukci a válcovací síly ukázaly oba senzory dobrou shodu.

Seznam použitých symbolů a zkratek

symbol	rozměr	význam
(x, y, z)	mm; –	pravoúhle souřadnice, index odpovídajícího směru
(r, φ, z)	mm, °; –	válcové souřadnice, index odpovídajícího směru
b_0	mm	šířka materiálu před válcováním
b_1	mm	šířka materiálu po válcování
b_s	mm	střední šířka materiálu ve válcovací mezeře
c	J/(kg.K)	měrná tepelná kapacita
d_t	mm	průměr měřící části pinu
E	MPa	modul pružnosti v tahu
f	–	třecí faktor
F_n	N	normálová síla
F_t	N	třecí síla
F_v	N	válcovací síla
h, h_k	W/(m ² .K)	součinitel přestupu tepla
h_t	mm	vzdálenost osy termočlánku od povrchu
h_0	mm	výška materiálu před válcováním
h_1	mm	výška materiálu po válcování
h_m	mm	tloušťka vrstvy mazadla
h_s	mm	střední výška materiálu ve válcovací mezeře
K		převodní koeficient čidla
l_0	mm	délka materiálu před válcováním
l_1	mm	délka materiálu po válcování
l_d	mm	délka geometrického pásma deformace
l_{dc}	mm	délka skutečného pásma deformace
l'_d	mm	délka geometrického pásma deformace při zploštění válce
l_o	mm	délka pásma opožďování
l_p	mm	délka pásma předstihu
L_p	mm	délka pinu
m	–	třecí faktor
M_v	N.m	válcovací moment
O		elektrický signál z měřících čidel
p	MPa	normálový kontaktní tlak (napětí)

symbol	rozměr	význam
q	W/m ²	hustota tepelného toku
Q	W	tepelný výkon
R	mm	poloměr pracovního válce
R_k	K/W	tepelný odpor v kontaktu
R'	mm	poloměr pracovních válců při zploštění
S	m ²	plocha
S_a	m ²	zdánlivá kontaktní plocha
S_r	m ²	reálná kontaktní plocha
t	s	čas
T	°C, K	teplota
t_k	s	čas kontaktu, průchodu válcovací mezerou
T_m, T_m	°C, K	teplota měřená daným snímačem (termočlánek)
T_p, T_p	°C, K	povrchová teplota
v	m/s	rychlost
v_0	m/s	rychlost materiálu vstupujícího do válcovací mezery
v_1	m/s	rychlost materiálu opouštějící válcovací mezeru
v_{ob}	m/s	obvodová rychlost pracovního válce
α	°	záběrový úhel
α'	°	záběrový úhle při zploštění válce
α_k	–	poměr reálné a zdánlivé kontaktní plochy
α_n	°	úhel neutrální roviny
β	–	součinitel šíření
γ	–	součinitel stlačení
Δb	mm	absolutní deformace šířky válcovaného materiálu
Δh	mm	absolutní deformace výšky válcovaného materiálu
Δl	mm	absolutní deformace délky válcovaného materiálu
$\varepsilon, \varepsilon_h$	–, %	poměrná deformace výšky válcovaného materiálu
ε_l	–, %	poměrná deformace délky válcovaného materiálu
ε_b	–, %	poměrná deformace šířky válcovaného materiálu
ζ		citlivostní koeficient
η	Ns/m ²	dynamická viskozita
ϑ	°	úhel mezi měřicími piny
λ	–	součinitel prodloužení
λ_m	W/(m.K)	tepelná vodivost
μ	–	koeficient tření
ν	–	Poissonovo číslo
ρ	kg/m	hustota materiálu
σ	MPa	normálové napětí

symbol	rozměr	význam
σ_k	MPa	mez kluzu
τ	MPa	smykové napětí
τ_k	MPa	smykové napětí meze kluzu

Seznam obrázků

1.1	Striebeckův diagram s vyznačenými druhy tření	8
1.2	Porovnání modelu konstantního tření s modelem Coulombovým. Vy- mezení maximální hodnoty koeficientu tření μ	10
1.3	Tepelný odpor v kontaktu ve válcovací mezeře	12
1.4	Poměr reálné a zdánlivé kontaktní plochy α_k jako funkce přetvoření ε_{11} pro případ kování v zápustce, porovnání s experimentem [12]	13
1.5	Základní rozměry pro podélné válcování hladkými válci [5]	15
1.6	Schéma pásem deformace ve válcovací mezeře	17
1.7	Síly a napětí na elementárním prvku ve válcovací mezeře [5]	19
1.8	Tření ve válcovací mezeře pro různá řešení [18]	19
1.9	Rozložení napětí ve válcovací mezeře podle různých autorů [18]	20
1.10	Schéma teplotních toků při válcování: (1) – Odvod tepla z válcovaného materiálu mimo válcovací mezeru, (2) – přenos tepla mezi válcem a provalkem, generování tepla třením, (3) - generování tepla plastickou deformací [24]	21
2.1	Situace při prokluzu válce [18]	23
2.2	Schéma pin senzoru	25
2.3	Implementace pin senzoru do válce dle Hatamury [33]	26
2.4	Schématické znázornění vývoje senzorů pro měření kontaktních napětí ve válcovací mezeře v pracích Jeswieta[37]	26
2.5	Umístění dvojice měřících pinů ve válci [40]	27
2.6	Trojice silových senzorů s piny umístěná pod povrchem [43]	28
2.7	Schéma zatížení měřícího disku s vyznačením umístění tenzometric- kých snímačů [45]	28
2.8	Integrační snímač kontaktních napětí ve válcovací mezeře [48]	29
2.9	ROLLSURF - Měřicí nosník osazený tenzometry	29
2.10	Výstupní signál z tenzometrů během průchodu snímače válcovací mezerou [48]	30
2.11	Průběh normálové a třecí síly na povrchu snímače během průchodu snímače válcovací mezerou [48]	30
2.12	Schématická ukázka měřící části optického vlákna	30

2.13	Teplotní pokles na rozhraní	31
2.14	Termočlánek instalovaný v pin senzoru [36]	32
3.1	Schéma měřicího řetězce pro měření teplot v pracovním válci	34
3.2	Základní rozdělení teplotních senzorů	34
3.3	Etapa I - vrtaný senzor se dvěma termočláanky (A.2)	35
3.4	Etapa I -Teplotní senzory v řezu	35
3.5	Etapa II - Instalace pomocí tekutého dusíku	36
3.6	Etapa II -Teplotní senzory v řezu	36
3.7	Etapa III -Teplotní senzory v řezu	36
3.8	Etapa III - řez válcem a instalovaným senzorem před broušením . . .	37
3.9	Etapa IV -Teplotní senzory v řezu	37
3.10	Napětí a plastické přetvoření v tečném směru pro hloubku termočláanky 0,8 mm [60]	38
3.11	Průběh plastického přetvoření v kritickém místě pro různé hloubky termočláanky [60]	38
3.12	Geometrie modelu, výseč válce s válcovitým tělem teplotního senzoru (modrá)	39
3.13	Průchod druhého provalku (maximální hodnoty), ekvivalentní napětí v okolí kritického místa senzoru (vlevo); ekvivalentní plastické přetvoření ve stejném místě (vpravo)	39
3.14	Průběh maxima ekvivalentní plastické deformace během simulované kampaně	40
3.15	Hledání minima funkce SSE [62]	41
3.16	Schéma teplotního modelu použitého v inverzní úloze vedení tepla . .	41
3.17	DRILL - schématické znázornění modelu vrtaného teplotního senzoru pro inverzní úlohu vedení tepla	42
3.18	SLOT - schématické znázornění modelu teplotního senzoru s drážkou pro inverzní úlohu vedení tepla	42
3.19	DROT - schématické znázornění modelu vrtaného teplotního senzoru se zapájeným termočláankem pro inverzní úlohu vedení tepla	43
3.20	Ovlivnění teplotního pole ve válci přítomností termočláanky modelu DRILL. Hloubka termočláanky $h_t = 0,5mm$	43
3.21	Teplota povrchu nad termočláankem pro různé typy senzorů. Hloubka termočláanky $h_t = 0,5mm$	43
3.22	Porovnání teplot při simulaci válcování s výsledky z inverzní úlohy . .	44
3.23	Hustota tepelného toku, původní průběh pro teplotní simulaci a jeho rekonstrukce pomocí inverzní úlohy	45

3.24	I1 - Srovnání vypočtené q_{inv} a původní q_{org} hustoty tepelného toku (vlevo); Porovnání teplotní odezvy v hloubce 0,5 mm T_m s teplotou na povrchu T_{povrch} (vpravo)	45
3.25	I5 - Srovnání vypočtené q_{inv} a původní q_{org} hustoty tepelného toku (vlevo); Porovnání teplotní odezvy v hloubce 0,5 mm T_m s teplotou na povrchu T_{povrch} (vpravo)	46
3.26	P1 - Srovnání vypočtené q_{inv} a původní q_{org} hustoty tepelného toku (vlevo); Porovnání teplotní odezvy v hloubce 0,5 mm T_m s teplotou na povrchu T_{povrch} (vpravo)	46
3.27	Kalibrace teplotního čidla	47
3.28	Průběh kalibrace (vlevo); záznam z kalibrace a inverzního výpočtu (vpravo)	48
3.29	Porovnání teplotní odezvy jednotlivých typů senzorů pro stejnou hloubku termočládku $h_t = 0,5mm$	48
3.30	Teplotní odezva modelu DRILL	49
3.31	Teplotní odezva modelu SLOT	49
3.32	Teplotní odezva modelu DROT	49
3.33	Pin senzor umístěný na upínací destičce s vyznačenými směry os . . .	50
3.34	Teplotní senzor a pin senzor ve válci zobrazený v řezu	51
3.35	Tříosý piezoelektrický snímač sil KISTLER	52
3.36	Limitace velikosti pin senzoru na základě mechanických limitů snímačů pro extrémní případy válcování	52
3.37	Kalibrátor pro pin senzor	54
4.1	Měřené teploty (vlevo) a teploty povrchu (vpravo) pro pájený senzor při různé redukci vzorku [63]	56
4.2	Test P2, srovnání pájeného a vrtaného senzoru - výsledky z inverzní úlohy pro druhý průchod válcovaného vzorku stolicí	56
4.3	Přímé srovnání pájeného a vrtaného senzoru v porovnání s válcovací mezerou, test P2, druhý průchod válcovaného vzorku stolicí	56
4.4	Měřené teploty (vlevo) a teploty povrchu (vpravo) pro pájený senzor při různé redukci, testy č.5–10, hodnoty pro první průchod [64]	57
4.5	Test č. 14 - vliv válcovací rychlosti na rekonstrukci hustoty tepelného toku inverzní úlohou, $v_{obv.} = 1,5 m/s$, první průchod	58
4.6	Test č. 15 - vliv válcovací rychlosti na rekonstrukci hustoty tepelného toku inverzní úlohou, $v_{obv.} = 0,5 m/s$, první průchod	58
4.7	Schéma válcovací tratě	58
4.8	Pozice senzorů ve válci	59
4.9	Svitek č.1, měřené teploty v jednotlivých senzorech, začátek válcování	60

4.10	Svítek č.1, výsledky z inverzní úlohy, začátek válcování	60
4.11	Svítek č.1, senzor S4, srovnání teplot a hustoty tepelného toku s velikostí válcovací mezery	60
4.12	Povrch senzorů S3, S4 po vyvácování 15 svitků	61
4.13	Povrch senzorů S7, S8 po vyvácování 15 svitků	61
4.14	Povrch senzoru po přebroušení (vlevo), po vyvácování 15 svitků (uprostřed), obraz jeho otisku ve válcovaném materiálu v detekčním systému (vpravo)	62
4.15	Pracovní válec určený pro instalaci senzorů	62
4.16	Blokové schém přenosu signálu z měřicího válce	63
4.17	Kalibrace teplotního a pin senzoru	63
4.18	C1 - pin senzor, kontaktní napětí ve válcovací mezeře, poměr $ \tau_x/p $	65
4.19	H2 - kontaktní napětí ve válcovací mezeře, poměr $ \tau_x/p $, porovnání senzoru ROLLSURF a pin senzoru	65
4.20	Srovnání kontaktních napětí pro válcování s mazáním (C9) a bez (C7)	65
4.21	Srovnání teoretické délka pásma deformace a délky kontaktu pro jednotlivé senzory při různé redukci	66
4.22	Celková válcovací síla vypočtena z průběhu kontaktních tlaků dle pin senzoru a ROLLSURF senzoru v porovnání s válcovací silou z externího měření	66
4.23	H3 - Výsledky z inverzní úlohy pro druhou otáčku válcování	67
4.24	Vypočtená hustota teplého toku ve válcovací mezeře v závislosti na rychlosti válcování	67
4.25	Měřená teplota v termočláncu a povrchová teplota pro případ válcování za studena C7	67
4.26	Propad pájky nad termočláncem	68
4.27	Otisk senzoru na povrchu provalku; teplotní senzor vlevo, pin vpravo	68
A.1	Teplotní senzor (etapa I) pro pilotní testy, tělo vrtaného snímače pro jeden termočlánek	V
A.2	Teplotní senzor (etapa I.) pro pilotní testy, tělo vrtaného snímače pro dva termočlánci	VI
A.3	Teplotní senzor (etapa I.) pro pilotní testy, tělo pájeného snímače pro jeden termočlánek	VII
A.4	Teplotní senzor (etapa II) pro pilotní testy, tělo vrtaného snímače pro jeden termočlánek	VIII
A.5	Teplotní senzor (etapa II.) pro pilotní testy, tělo pájeného snímače pro jeden termočlánek	IX

A.6	Teplotní senzor (etapa III.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro začátek válcovací kampaně	XI
A.7	Teplotní senzor (etapa III.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro konec válcovací kampaně	XII
A.8	Teplotní senzor (etapa IV.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro začátek válcovací kampaně	XIII
A.9	Teplotní senzor (etapa IV.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro konec válcovací kampaně	XIV
A.10	Teplotní senzor (etapa IV.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro měření ohřívání válce během válcovací kampaně	XV
A.11	Teplotní senzor pro pilotní testy MEFOS, tělo pájeného snímače pro jeden termočlánek	XVII
A.12	Upínací destička pin senzoru	XVIII
A.13	Dutina ve válci pro pin senzor	XIX
A.14	Měřicí pin	XX
B.1	Parametry tříosého piezoelektrického snímače sil KISTLER 9028 . . .	XXI
C.1	C1: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXIII
C.2	C2: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXIII
C.3	C3: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXIII
C.4	C4: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXIV
C.5	C5: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXIV
C.6	C6: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXIV
C.7	C7: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXIV
C.8	C8: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXV
C.9	C9: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXV
C.10	H1: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXV
C.11	H2: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXV
C.12	H3: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVI
C.13	H4: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVI
C.14	H5: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVI
C.15	H6: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVI
C.16	H7: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVII
C.17	H8: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVII
C.18	H9: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVII
C.19	H10: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVII
C.20	H11: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVIII
C.21	H12: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válc. mezeře . . .	XXVIII

C.22 H13: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře . . .	XXVIII
C.23 H14: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře . . .	XXVIII
C.24 H15: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře . . .	XXIX
C.25 H16: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře . . .	XXIX
C.26 H17: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře . . .	XXIX
C.27 H18: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře . . .	XXIX
C.28 H19: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře . . .	XXX
C.29 H20: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře . . .	XXX

Seznam tabulek

3.1	Limitní hodnoty napětí a teplot pro návrh senzorů	33
3.2	Válcování za studena, podmínky pro testování inverzní úlohy	46
4.1	Tabulka měření pro etapu I	55
4.2	Tabulka měření pro etapu II	57
4.3	Tabulka měření pro etapu III	59
4.4	Poškození senzorů po konci válcovací kampaně v závislosti na hloubce termočlánku z kalibrace	61
4.5	Základní parametry měření MEFOS	64

Seznam použitých zdrojů

- [1] LABBE, N. et al. *Advanced roll gap sensors for enhanced hot and cold rolling processes*. 2015. ISBN 978-92-79-53957-2. Dostupné z DOI: 10.2777/90436.
- [2] PIETRZYK, M.; CSER, L.; LENARD, J.G. *Mathematical and physical simulation of the properties of hot rolled products*. Elsevier Science, 1999. ISBN 978-0080525686. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=LtnHhaKnAmIC>.
- [3] BLAŠKOVIČ, Pavel. *Tribológia*. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00633-0.
- [4] SCHEY, John A. *Tribology in metalworking: friction, lubrication, and wear*. American Society for Metals, 1984. ISBN 978-0871701558. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=Qd5SAAAAMAAJ>.
- [5] POČTA, B. *Základy teorie tváření kovů*. Praha: SNTL, 1966.
- [6] TAN, Xincan. Comparisons of friction models in bulk metal forming. *Tribology International*. 2002, roč. 35, č. 6, s. 385–393. ISSN 0301679X. Dostupné z DOI: 10.1016/S0301-679X(02)00020-8.
- [7] PETERSEN, S.B.; MARTINS, P.A.F.; BAY, N. Friction in bulk metal forming: a general friction model vs. the law of constant friction. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997, roč. 66, č. 1-3, s. 186–194. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02518-6.
- [8] BAY, N.; WANHEIM, T. Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact. *Wear*. 1976, roč. 38, č. 2, s. 201–209. ISSN 00431648. Dostupné z DOI: 10.1016/0043-1648(76)90069-7.
- [9] BLAU, Peter. *Friction Science and Technology*. 2nd editio. CRC Press, 2008. ISBN 978-1420054040.
- [10] BOWDEN, F.P.; TABOR, D. *The Friction and Lubrication of Solids*. New York: Oxford University Press, 1954. ISBN 9780198507772.
- [11] MADHUSUDANA, C.V. *Thermal contact conductance*. New York: Springer-Verlag, 1996. Mechanical engineering series. ISBN 0387945342.

- [12] STUPKIEWICZ, Stanisław; MRÓZ, Zenon. Phenomenological model of real contact area evolution with account for bulk plastic deformation in metal forming. *International Journal of Plasticity*. 2003, roč. 19, č. 3, s. 323–344. ISSN 07496419. Dostupné z DOI: 10.1016/S0749-6419(01)00037-7.
- [13] HU, Shi-cheng; MA, Wei-ce; DU, Lei; LI, Xiao-qian; ZHONG, Jue. Thermal contact conductance at continuous roll-casting interface. *Journal of Central South University of Technology*. 2007, roč. 14, č. 3, s. 374–379. ISSN 1005-9784. Dostupné z DOI: 10.1007/s11771-007-0074-4.
- [14] MIKIĆ, B.B. Thermal contact conductance; theoretical considerations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1974, roč. 17, č. 2, s. 205–214. ISSN 00179310. Dostupné z DOI: 10.1016/0017-9310(74)90082-9.
- [15] HITCHCOCK, J.H. Roll Neck Bearings. *ASME Research Publication*. 1935.
- [16] ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: SNTL, 1992. ISBN 80-03-00651-1.
- [17] KÁRMÁN, Theodore von. On the Theory of Rolling. *Journal for Applied Mathematics and Mechanics (German)*. 1925, roč. 5, s. 139–141.
- [18] GINZBURG, Vladimir B; BALLAS, Robert. *Flat rolling fundamentals*. New York: Marcel Dekker, 2000. ISBN 0-8247-8894-X.
- [19] SIEBEL, E. Resistance and deformation and the flow material during rolling. *Stahl und Eisen*. 1930, roč. 50, s. 1769.
- [20] NADAI, A. The Forces Required for Rolling Steel Strip Under Tension. *Journal of Applied Mechanics*. 1939, s. A54–A62.
- [21] OROWAN, A. The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling. *Proc. Instn. Mech. Eng.* 1943, roč. 150, s. 140–167.
- [22] TSELIKOV, A.I. Present State of Theory of Metal Pressure upon Rolls in Longitudinal Rolling. *Stahl*. 1958, roč. 18, č. 5, s. 434–441.
- [23] HU, Pei-Hua; EHMANN, Kornel F. A dynamic model of the rolling process. Part II: inhomogeneous model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000, roč. 40, č. 1, s. 21–31. ISSN 08906955. Dostupné z DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00050-4.
- [24] LI, Y.H.; SELLARS, C.M. Comparative investigations of interfacial heat transfer behaviour during hot forging and rolling of steel with oxide scale formation. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998, roč. 80-81, s. 282–286. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00112-5.
- [25] PAVLOV, I.M. *Theory of rolling and principles of plastic deformation of metals*. Moscow: GONTI, 1938.

-
- [26] WHITTON, P W; FORD, Hugh. Surface friction and lubrication in cold strip rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1955, roč. 169, s. 123–140. Dostupné z DOI: 10.1243/PIME_PROC_1955_169_024_02.
- [27] KHAYYAT, F.A.; LANCASTER, P.R.. A photoelastic examination of the stresses in rolls during rolling. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1969, roč. 4, č. 4, s. 245–260. ISSN 0309-3247. Dostupné z DOI: 10.1243/03093247V044245.
- [28] OHASHI, Y.; MURAKAMI, S.; NISHIKIORI, K. A photoelastic analysis for the stress distribution in roller-dies for strip drawing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1964, roč. 6, č. 6, s. 461–IN6. ISSN 00207403. Dostupné z DOI: 10.1016/S0020-7403(64)80007-2.
- [29] THEOCARIS, P.S.; STASSINAKIS, C.A.; MAMALIS, A.G. Roll-pressure distribution and coefficient of friction in hot-rolling by caustics. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1983, roč. 25, č. 11, s. 833–844. ISSN 0020-7403.
- [30] TUNCER, C.; DEAN, T.A. Surface stress measurement techniques in metal forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1988, roč. 28, č. 4, s. 417–428. ISSN 08906955. Dostupné z DOI: 10.1016/0890-6955(88)90055-7.
- [31] SIEBEL, E.; LUEG, W. Untersuchungen über die Spannungsverteilung im Walzspalt. *Mitteilungen aus dem Kaiser Wilhelm Institut Für Eisenforschung*. 1933, č. 15, s. 1–14.
- [32] HITCHCOCK, J.H.; MACGREGOR, C.W.; PALME, R.B. Contact stresses in the rolling of metals. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme*. 1949, roč. 16, č. 1, s. 103. ISSN 0021-8936.
- [33] HATAMURA, Yotaro; YONEYAMA, Takesi. Measurement of actual stress and temperature on a roll surface during rolling. (Development of a sensor for detecting pressure and frictional stress). *JSME international journal*. 1988, roč. 31, č. 2, s. 465–469. ISSN 0914-8825. Dostupné z DOI: 10.1299/jsmec1988.31.465.
- [34] HATAMURA, Yotaro; YONEYAMA, Takesi. Measurement of actual stress and temperature on the roll surface during rolling. Measurement of temperature and heat flux distribution on the roll surface in cold rolling. *JSME international journal*. 1989, roč. 32, č. 4, s. 676–680. ISSN 0914-8825. Dostupné z DOI: 10.1299/jsmec1988.32.676.

- [35] YONEYAMA, Takesi; HATAMURA, Yotaro. Measurement of actual stress and temperature on the roll surface during rolling. (Frictional stress distribution and pressure distribution in cold rolling). *JSME international journal*. 1989, roč. 32, č. 1, s. 113–117. ISSN 0914-8825. Dostupné z DOI: 10.1299/jsmec1988.32.113.
- [36] YONEYAMA, Takesi; HATAMURA, Yotaro. The development of a die-sensor. *JSME international journal*. 1987, roč. 30, č. 262, s. 670–677. ISSN 0913-185X. Dostupné z DOI: 10.1299/jsme1987.30.670.
- [37] JESWIET, J.; NYAHUMWA, C. A sensor for measuring metal deformation interface forces. *Journal of Materials Processing Technology*. 1993, roč. 39, č. 3-4, s. 251–268. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/0924-0136(93)90162-Y.
- [38] NYAHUMWA, C. The evolution of a cantilever sensor to measure normal and frictional forces in the roll gap during cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, roč. 56, č. 1-4, s. 463–474. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/0924-0136(96)85108-9.
- [39] NYAHUMWA, C.; JESWIET, J. A Friction Sensor for Sheet-Metal Rolling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1991, roč. 40, č. 1, s. 231–233. ISSN 00078506. Dostupné z DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61975-1.
- [40] MISCHKE, Jerzy; SWIATONIOWSKI, Andrzej; PIETRZYKOWSKI, Andrzej; SOBKOWIAK, Przemyslaw. Contributory study on error estimation in measurements of stress distributions on the contact surface for plastically deformed metal. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999, roč. 95, č. 1-3, s. 97–106. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00274-5.
- [41] BACKOFEN, W A; VAN ROOYEN, G T. Friction in cold rolling. *Iron Steel Inst.* 1957, roč. 186.
- [42] LIU, Y.J.; TIEU, A. Kiet; WANG, D.D.; YUEN, W.Y.D. Friction measurement in cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001, roč. 111, č. 1-3, s. 142–145. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00541-6.
- [43] OSMAN, F.H.; POTEL, F.; LOVEDAY, M.S. Measurement of friction characteristics using a three pin system. *Key Engineering Materials*. 2000, roč. 177-180, s. 583–588. ISSN 1662-9795. Dostupné z DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.177-180.583.

-
- [44] LUPOI, R.; OSMAN, F.H. Under surface pressure sensing technique for the evaluation of contact stresses. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, roč. 164-165, s. 1537–1543. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.022.
- [45] DELLAH, A.; WILD, P.M.; MOORE, T.N.; SHALABY, M.; JESWIET, J. An Embedded Friction Sensor Based on a Strain-Gauged Diaphragm. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2002, roč. 124, č. 3, s. 523–527. ISSN 10871357. Dostupné z DOI: 10.1115/1.1461839.
- [46] JESWIET, J.; ARENTOFT, Mogens; HENNINGSEN, P. Methods and Devices Used to Measure Friction in Rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2006, roč. 220, č. 1, s. 49–57. ISSN 0954-4054. Dostupné z DOI: 10.1243/095440506X77580.
- [47] WANHEIM, T.; ZEUTHEN, O. *Konstruktion af sektorvalse*. 1963. MSc.thesis. Technical University of Denmark.
- [48] LAGERGREN, J.; WANHEIM, T.; PRECZ, W.; HENNINGSEN, P.; ARENTOFT, M.; JONSSON, N.G. A new transducer for local load measurements of friction and roll pressure in cold flat rolling. *Steel Research International*. 2006, roč. 77, č. 6, s. 430–438. ISSN 1611-3683.
- [49] HENNINGSEN, P.; ARENTOFT, Mogens; WANHEIM, T. Measurements of Normal and Frictional Forces in a Rolling Process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2006, roč. 220, č. 1, s. 59–64. ISSN 0954-4054. Dostupné z DOI: 10.1243/095440505X32814.
- [50] STELSON, K A. A new method to measure friction and normal pressure and frictional stresses in the roll gap during cold rolling. *Eleventh North American manufacturing research conferences proceedings*. 1983.
- [51] MEIERHOFER, D.J.; STELSON, K.A. Measurement of the Interfacial Stresses in Rolling Using the Elastic Deformation of the Roll. *Journal of Engineering for Industry*. 1987, roč. 109, č. 4, s. 362–369. ISSN 00220817. Dostupné z DOI: 10.1115/1.3187140.
- [52] LEGRAND, N.; LAVALARD, Thomas; MARTINS, A. New concept of friction sensor for strip rolling: Theoretical analysis. *Wear*. 2012, roč. 286-287, s. 8–18. ISSN 00431648. Dostupné z DOI: 10.1016/j.wear.2011.11.002.

- [53] WEISZ-PATRAULT, D.; EHRLACHER, A.; LEGRAND, N. A new sensor for the evaluation of contact stress by inverse analysis during steel strip rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, roč. 211, č. 9, s. 1500–1509. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.03.025.
- [54] SINGHAL, Vishal; LITKE, Paul J.; BLACK, Anthony F.; GARIMELLA, Suresh V. An experimentally validated thermo-mechanical model for the prediction of thermal contact conductance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005, roč. 48, č. 25-26, s. 5446–5459. ISSN 00179310. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.028.
- [55] NSHAMA, W.; JESWIET, J. Evaluation of Temperature and Heat Transfer Conditions at the Metal-Forming Interface. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1995, roč. 44, č. 1, s. 201–204. ISSN 00078506. Dostupné z DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62307-5.
- [56] MALINOWSKI, Z.; LENARD, J.G.; DAVIES, M.E. A study of the heat-transfer coefficient as a function of temperature and pressure. *Journal of Materials Processing Technology*. 1994, roč. 41, č. 2, s. 125–142. ISSN 09240136. Dostupné z DOI: 10.1016/0924-0136(94)90057-4.
- [57] STEVENS, P.G.; IVENS, K.P.; HARPER, P. Increasing work-roll life by improved roll-cooling practice. *Journal of The Iron and Steel Institute*. 1971, roč. 62, č. 713.
- [58] POHANKA, Michal. *Technical experiment based inverse tasks in mechanics*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of mechanical engineering, 2006. 148 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
- [59] POHANKA, M.; HORSKÝ, J. Inverse algorithms for time dependent boundary reconstruction of multidimensional heat conduction model. *Thermophysics 2007*. 2007, s. 14–23. ISBN 978-80-227-2746-4.
- [60] NEJEDLÝ, P. *Návrh a pevnostní kontrola senzoru pro měření teplot a sil přiválcování za tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Horský, CSc. Vysoké učení technické v Brně.
- [61] BECK, J.V.; BLACKWELL, Ben; ST. CLAIR, Charles R. *Inverse heat conduction : ill-posed problems*. New York: Wiley, 1985. ISBN 0471083194.
- [62] POHANKA, Michal; KOTRBACEK, Petr. Design of Cooling Units for Heat Treatment. In: *Heat Treatment - Conventional and Novel Applications*. InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0768-2. Dostupné z DOI: 10.5772/50492.

-
- [63] WEISZ-PATRAULT, D.; EHRLACHER, A.; LEGRAND, N.; LABBE, N.; HORSKÝ, J.; LUKS, T. Experimental study of interfacial heat flux and surface temperature by inverse analysis with thermocouple (fully embedded) during hot steel strip rolling. *Advanced Materials Research*. 2012, roč. 452-453, s. 959–963. ISBN 9783037853511. ISSN 10226680. Dostupné z DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.452-453.959.
- [64] LEGRAND, N.; LABBE, N.; WEISZ-PATRAULT, D.; EHRLACHER, A.; LUKS, T.; HORSKY, J. Analysis of Roll Gap Heat Transfers in Hot Steel Strip Rolling through Roll Temperature Sensors and Heat Transfer Models. *Key Engineering Materials*. 2012, roč. 504-506, s. 1043–1048. ISSN 1662-9795. Dostupné z DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.504-506.1043.
- [65] LEGRAND, N.; WEISZ-PATRAULT, D.; HORSKY, J.; LUKS, T.; LABBE, N.; PICARD, M.; EHRLACHER, A. Characterization of Roll Bite Heat Transfers in Hot Steel Strip Rolling and their Influence on Roll Thermal Fatigue Degradation. *Key Engineering Materials*. 2013, roč. 554-557, s. 1555–1569. ISBN 9783037857199. ISSN 1662-9795. Dostupné z DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1555.
- [66] LUKS, T.; HORSKÝ, J.; NILSSON, A.; JONSSON, N. G.; LAGERGREN, J. Contact stress distribution and roll surface temperatures in the roll gap analyzed with different sensors. *Metallurgia Italiana*. 2014, roč. 106, č. 1, s. 19–25. ISSN 00260843.

Vlastní publikace vztahující se k tématu dizertační práce

- (A1) LUKS, T.; HORSKÝ, J.; NILSSON, A.; JONSSON, N. G.; LAGERGREN, J. Contact stress distribution and roll surface temperatures in the roll gap analyzed with different sensors. *Metallurgia Italiana*. 2014, roč. 106, č. 1, s. 19–25. ISSN 00260843.
- (A2) LEGRAND, N.; WEISZ-PATRAULT, D.; HORSKY, J.; LUKS, T.; LABBE, N.; PICARD, M.; EHRLACHER, A. Characterization of Roll Bite Heat Transfers in Hot Steel Strip Rolling and their Influence on Roll Thermal Fatigue Degradation. *Key Engineering Materials*. 2013, roč. 554-557, s. 1555–1569. ISBN 9783037857199. ISSN 1662-9795.
- (A3) LEGRAND, N.; LABBE, N.; WEISZ-PATRAULT, D.; EHRLACHER, A.; LUKS, T.; HORSKY, J.. Analysis of Roll Gap Heat Transfers in Hot Steel Strip Rolling through Roll Temperature Sensors and Heat Transfer Models. *Key Engineering Materials*. 2012, roč. 504-506, s. 1043–1048. ISSN 1662-9795.
- (A4) WEISZ-PATRAULT, D; EHRLACHER, A; LEGRAND, N; LABBE, N; HORSKÝ, J; LUKS, T. Experimental study of interfacial heat flux and surface temperature by inverse analysis with thermocouple (fully embedded) during hot steel strip rolling. *Advanced Materials Research*. 2012, roč. 452-453, s. 959–963. ISBN 9783037853511. ISSN 10226680.
- (A5) LUKS, T.; HORSKÝ, J.; BARTULI, E. Experimentální stanovení teplotních a silových poměrů ve válcovací mezeře. *Hutnické listy*, 2015, roč. LXVIII, č. 4, s. 9–14. ISSN: 0018-8069.
- (A6) LABBE, N. et al. Advanced roll gap sensors for enhanced hot and cold rolling processes. 2015. ISBN 978-92-79-53957-2. Dostupné z DOI: 10.2777/90436.

Ostatní vlastní publikace

- (B1) BROŽOVÁ, T.; LUKS, T.; ASTROUSKI, I.; RAUDENSKÝ, M. Fatigue Testing of Polymeric Hollow Fibre Heat Transfer Surfaces, by Pulsating Pressure Loads. In Engineering Mechanics 2015. *Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2016. s. 3–9. ISBN: 978-3-03835-700-1. ISSN: 1660-9336.
- (B2) BROŽOVÁ, T.; LUKS, T.; ASTROUSKI, I.; RAUDENSKÝ, M. Fatigue Testing of Polymeric Hollow Fibre Heat Transfer Surfaces, by Pulsating Pressure Loads., 21st *International Conference Engineering Mechanics 2015*. Engineering mechanics 2014. 1. Svratka: Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 2015. s. 30-31. ISBN: 978-80-86246-42-0. ISSN: 1805-8248.
- (B3) KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; LUKS, T.; POHANKA, M. Numerical simulation and verification of roll, temperature history during rolling campaign. *Roll5 2015*. London, United Kingdom: IOM Communicatiins Ltd, 2015. s. 1-11.
- (B4) HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; LUKS, T. Thermal Load and Fatigue of Rolls in Hot Rolling. *AISTech Conference Proceedings*. AIST Association for Iron& Steel Technology. Atlanta (GA, U.S.A.): AISTech 2012, s. 2149-2157. ISBN: 978-1-935117-24-7. ISSN: 1551-6997.
- (B5) LUKS, T.; ONDROUŠKOVÁ, J.; HORSKÝ, J. Nozzle cooling of hot surfaces with various orientations. *Experimental fluid Mechanics 2011*. Proceedings of the International conference. Jičín: 2011. s. 337-346. ISBN: 978-80-7372-784-0.
- (B6) LUKS, T.; ONDROUŠKOVÁ, J.; HORSKÝ, J. Nozzle cooling of hot surfaces with various orientations. EPJ Web of Conferences, 2012, roč. 25, č. 4, s. 01063-p.1 01063-p.10, ISSN: 2100-014X.

Přílohy

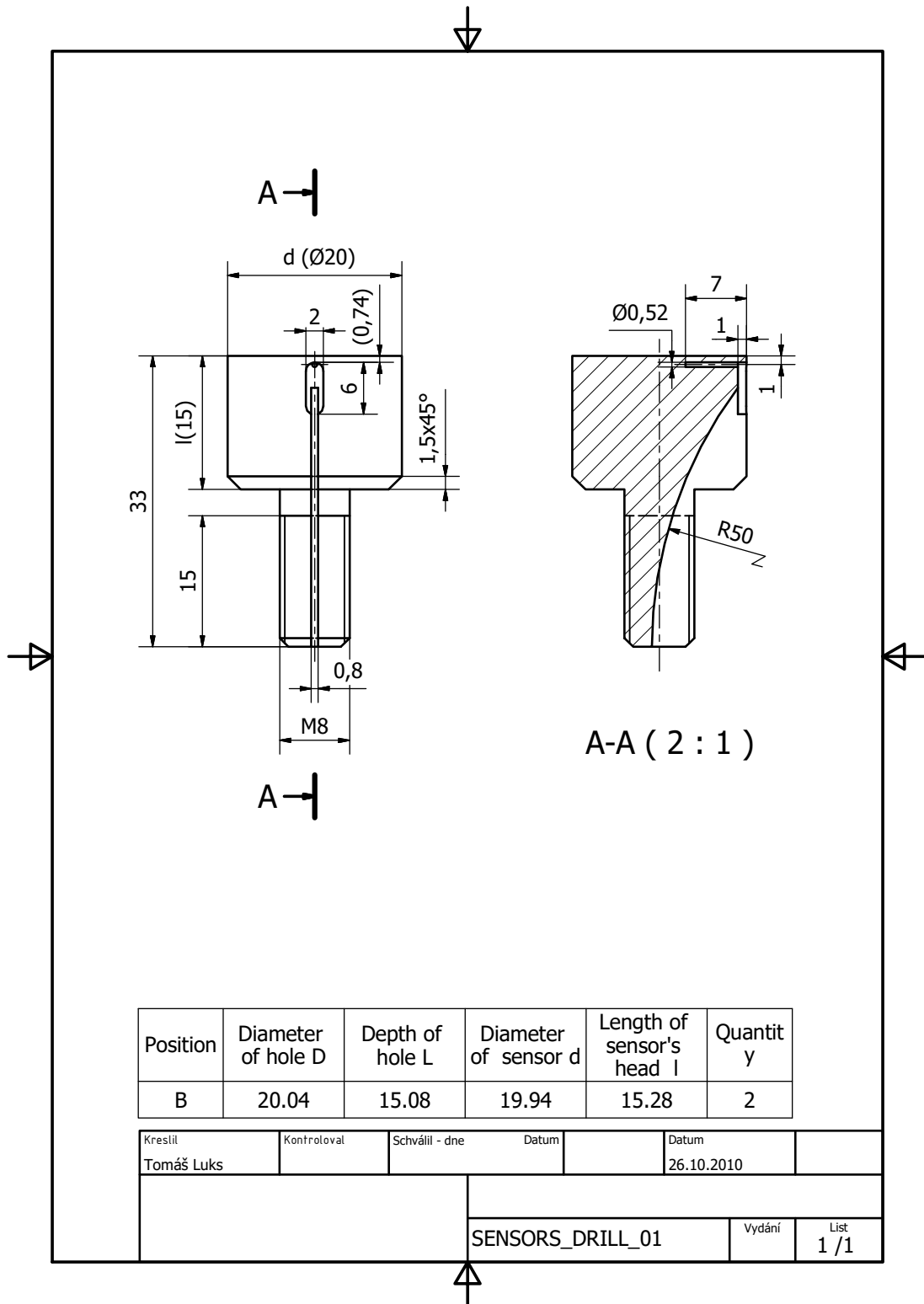
A

Výkresová dokumentace

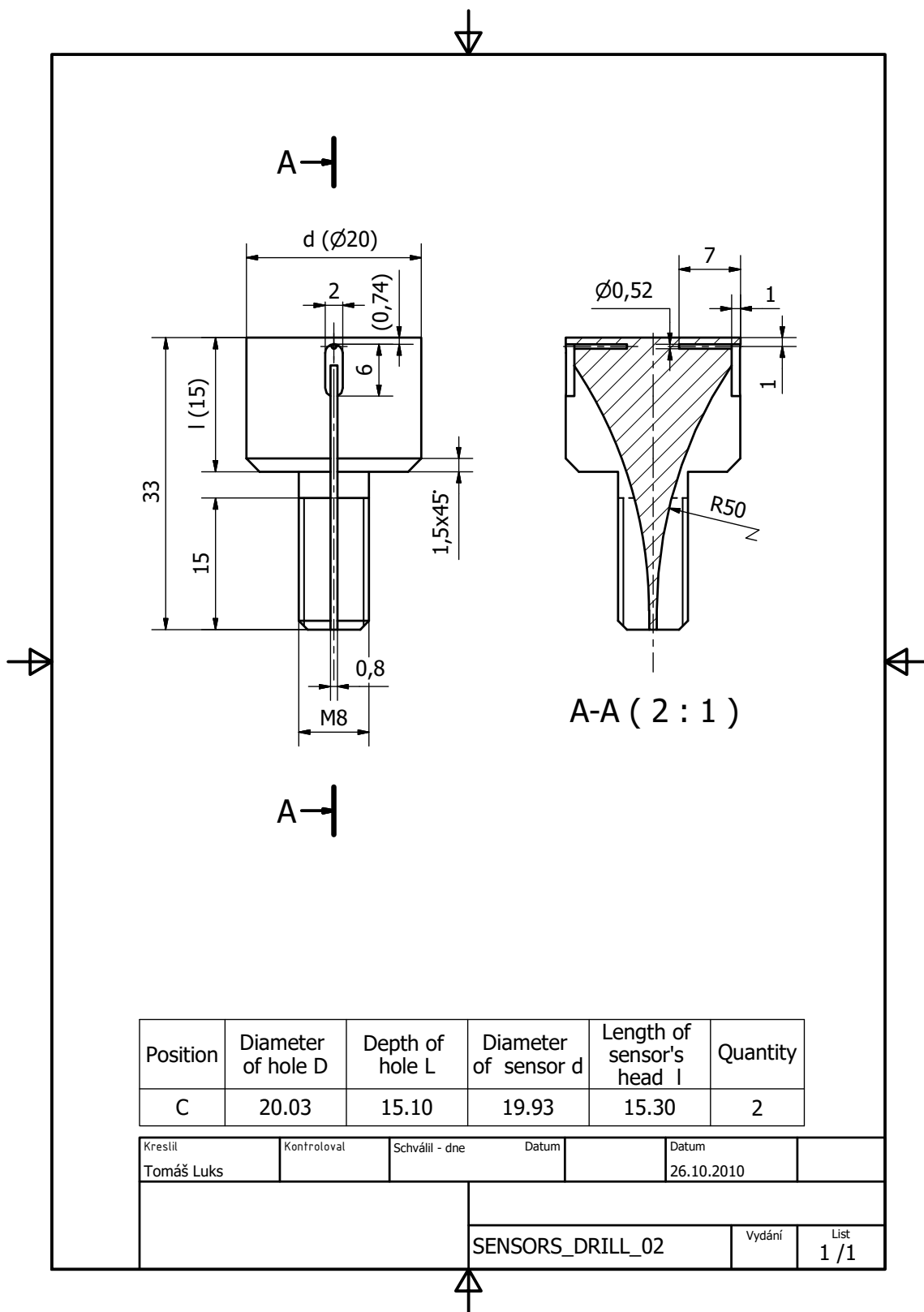
Součástí výkresové dokumentace jsou výrobní výkresy teplotních senzorů a senzoru pro měření tření.

- **Teplotní senzory etapa I.:** Teplotní senzory pro zkušební válcovací stolici
- **Teplotní senzory etapa II.:** Teplotní senzory pro zkušební válcovací stolici
- **Teplotní senzory etapa III.:** Teplotní senzory určené pro instalaci v podmínkách válcovací tratě
- **Teplotní senzory etapa IV.:** Teplotní senzory určené pro instalaci v podmínkách válcovací tratě
- **Senzory pro měření MEFOS:** Teplotní a silové senzory pro zkušební válcovací stolici

A.1 Teplotní senzory pro pilotní testy

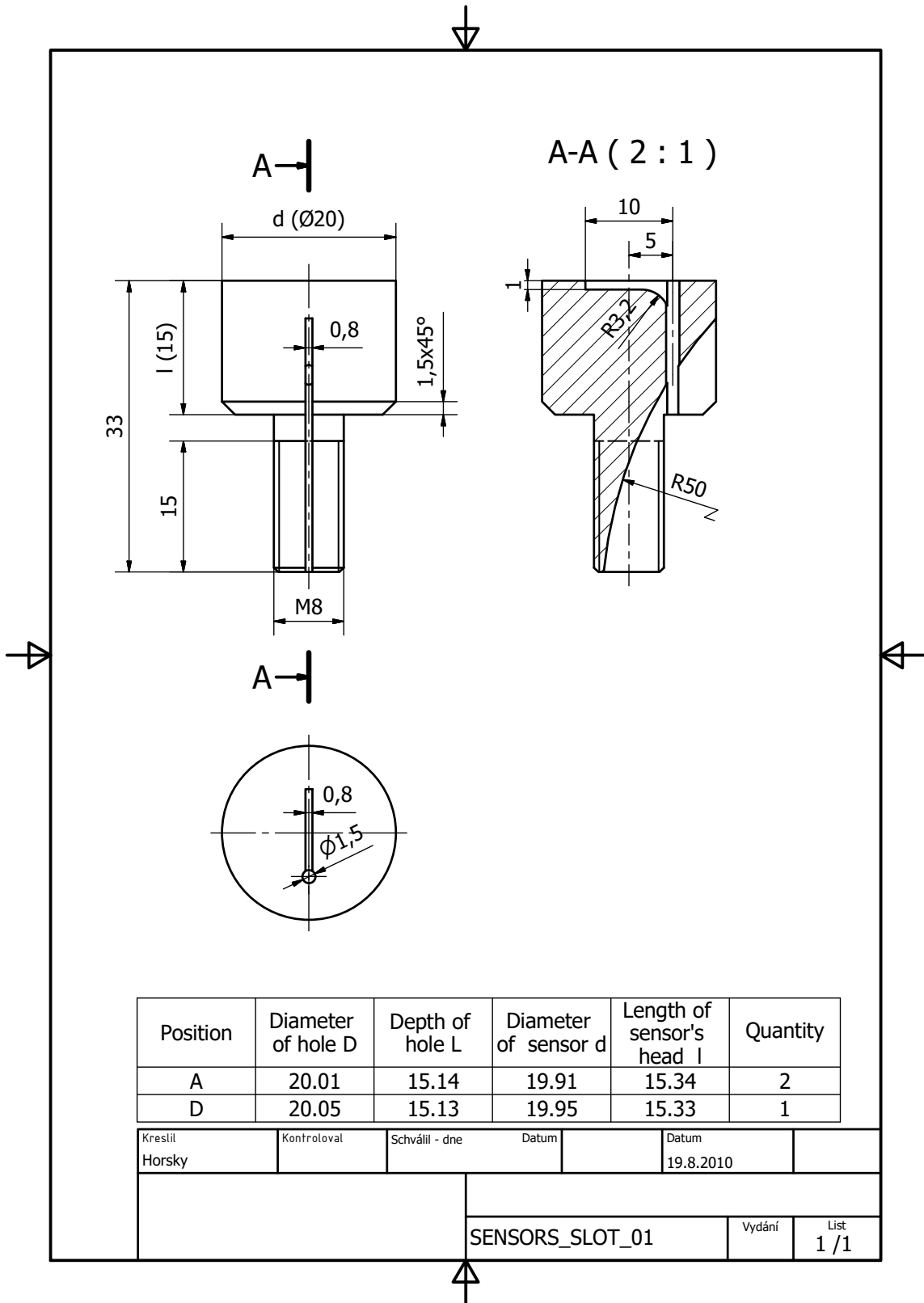


Obrázek A.1: Teplotní senzor (etapa I) pro pilotní testy, tělo vrtaného snímače pro jeden termočlánek

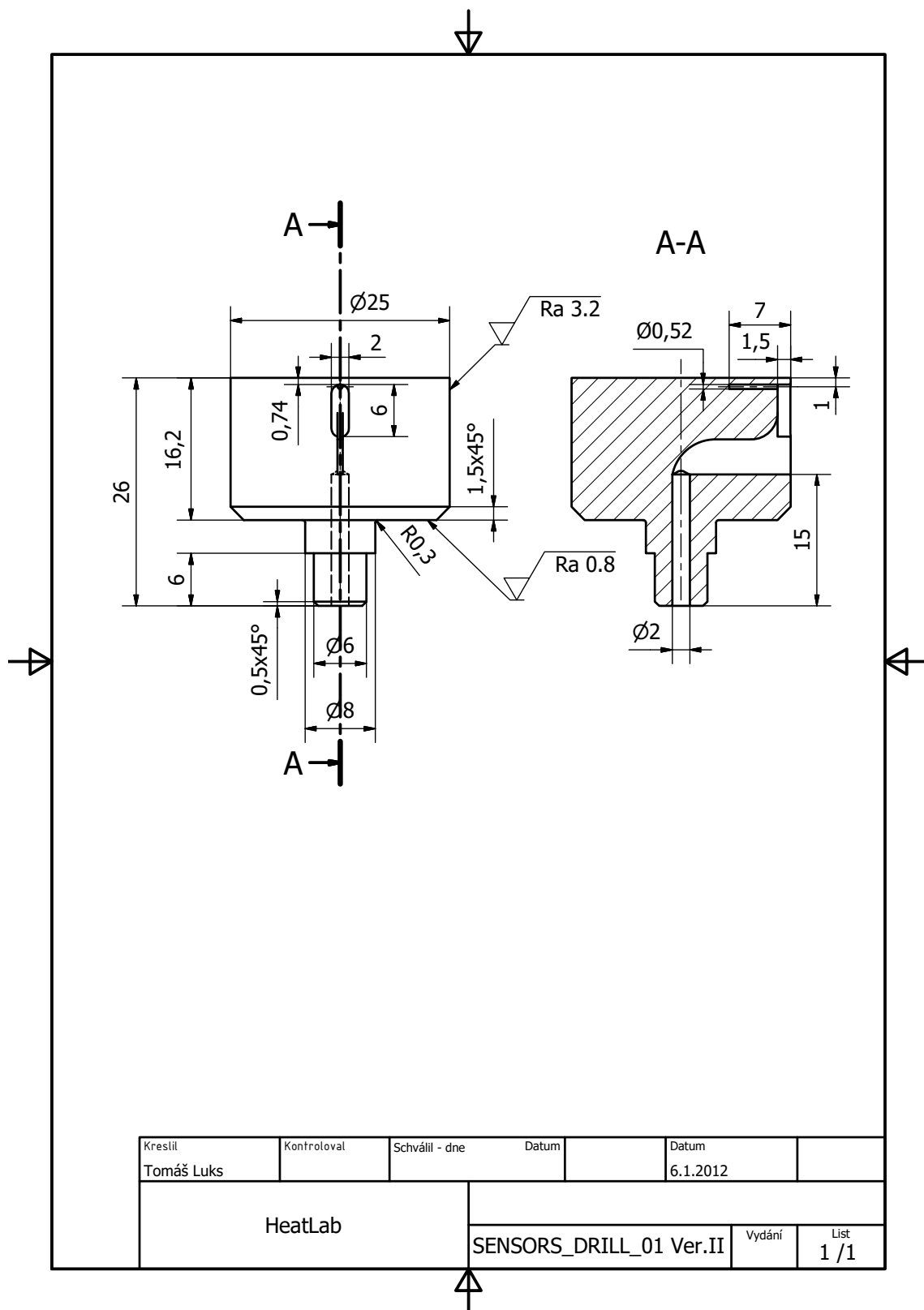


Obrázek A.2: Teplotní senzor (etapa I.) pro pilotní testy, tělo vrtaného snímače pro dva termočlánky

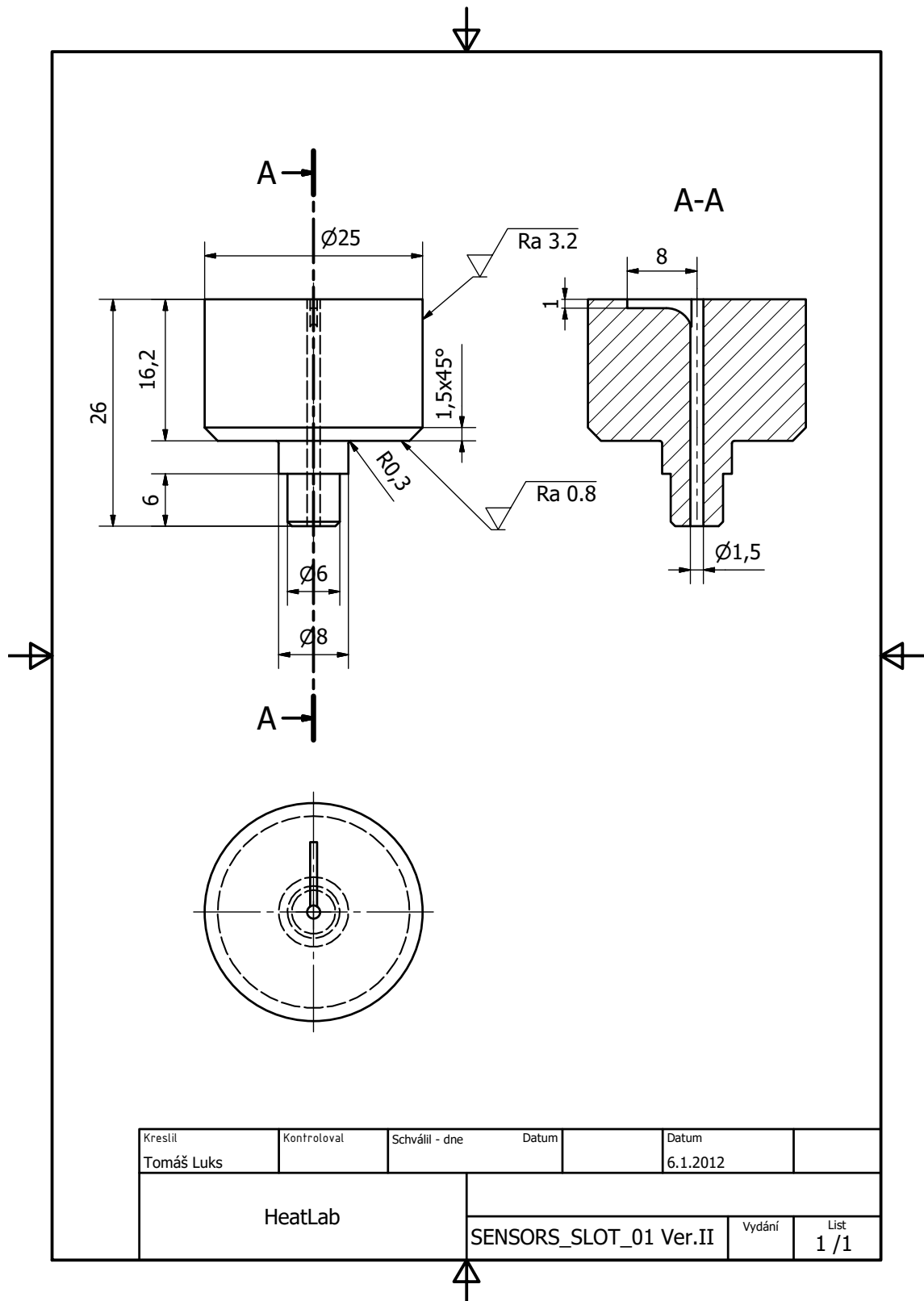
A.1. Teplotní senzory pro pilotní testy



Obrázek A.3: Teplotní senzor (etapa I.) pro pilotní testy, tělo pájeného snímače pro jeden termočlánek

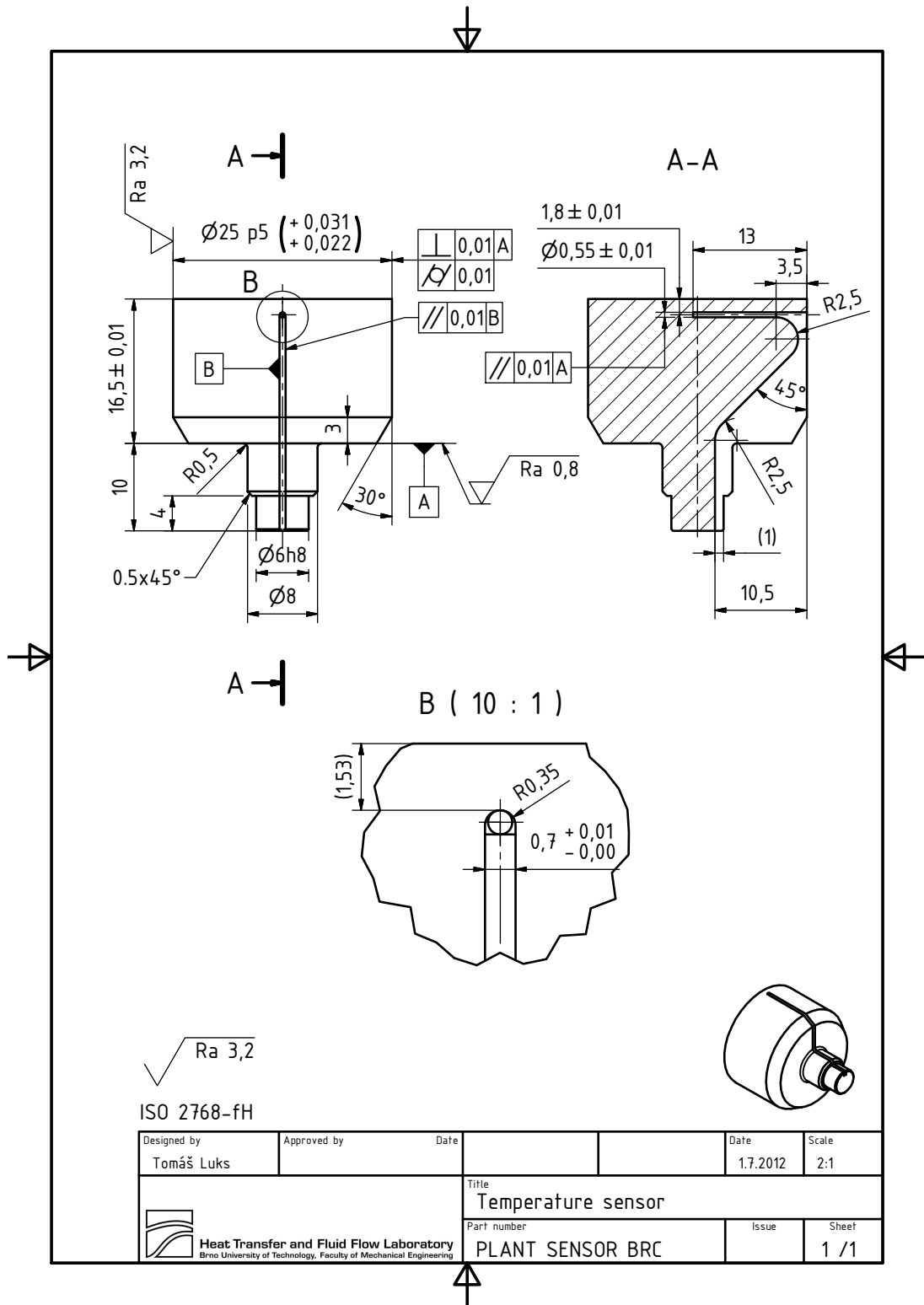


Obrázek A.4: Teplotní senzor (etapa II) pro pilotní testy, tělo vrtaného snímače pro jeden termočlánek

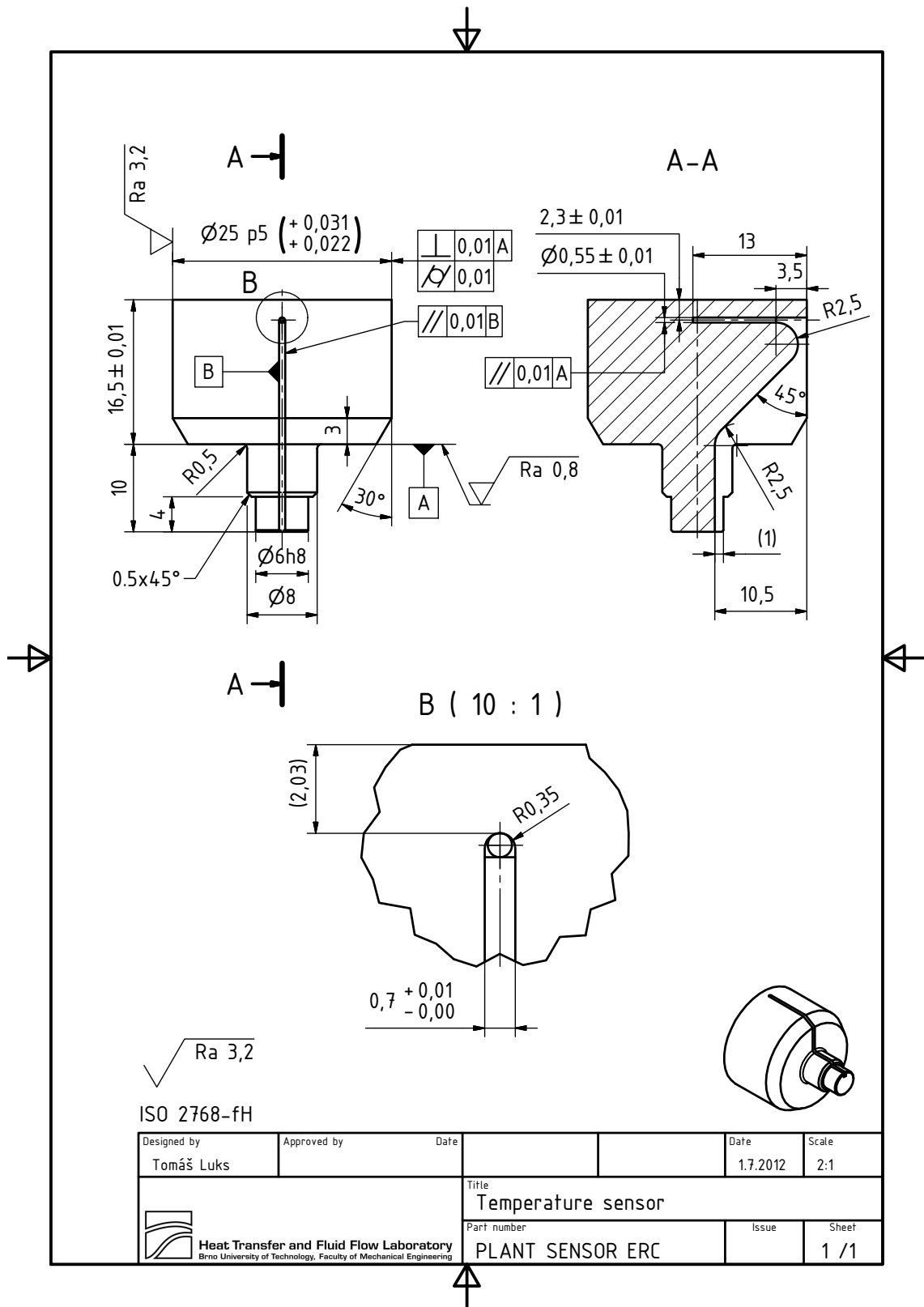


Obrázek A.5: Teplotní senzor (etapa II.) pro pilotní testy, tělo pájeného snímače pro jeden termočlánek

A.2 Teplotní senzory pro průmyslové testy

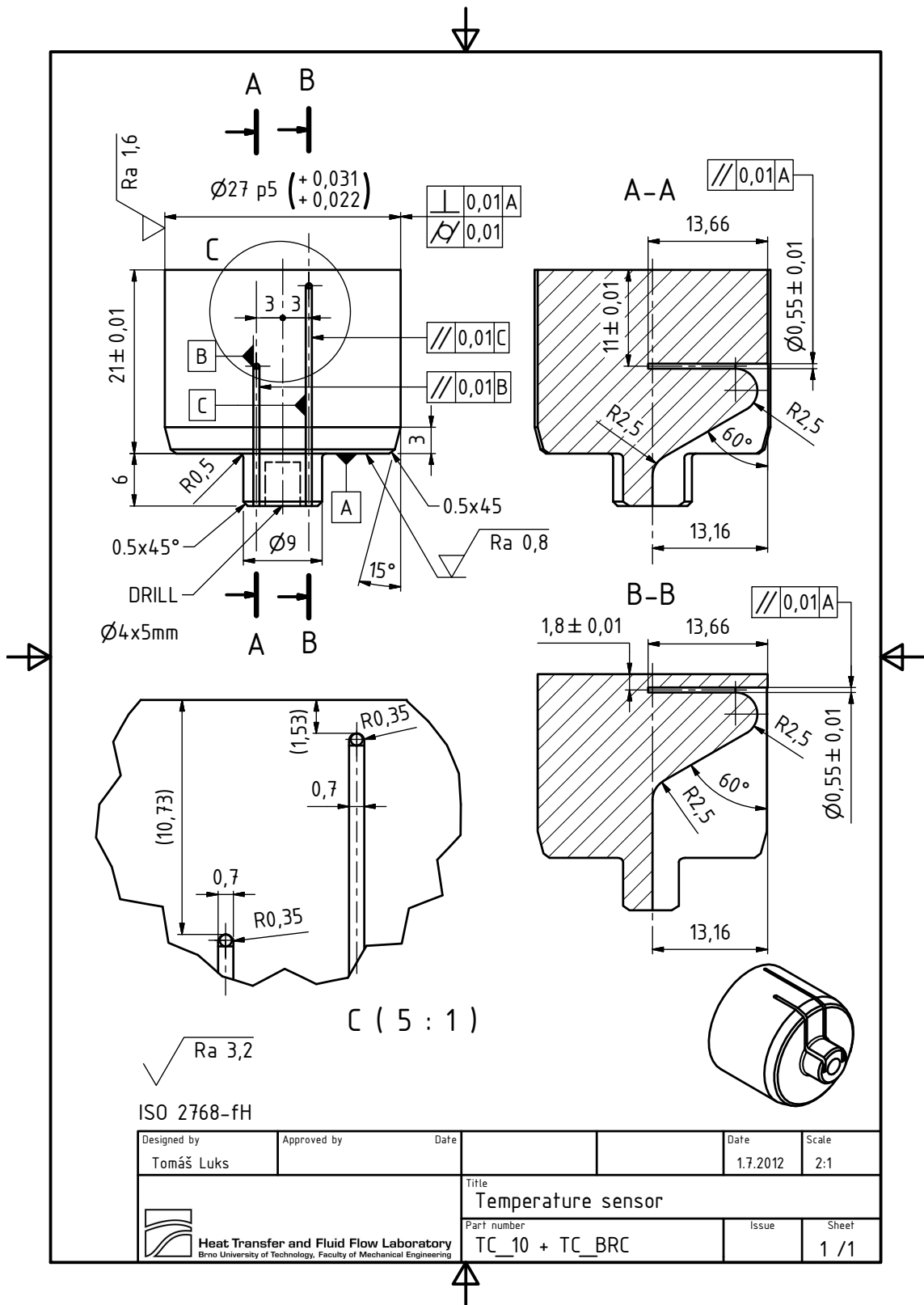


Obrázek A.6: Teplotní senzor (etapa III.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro začátek válcovací kampaně

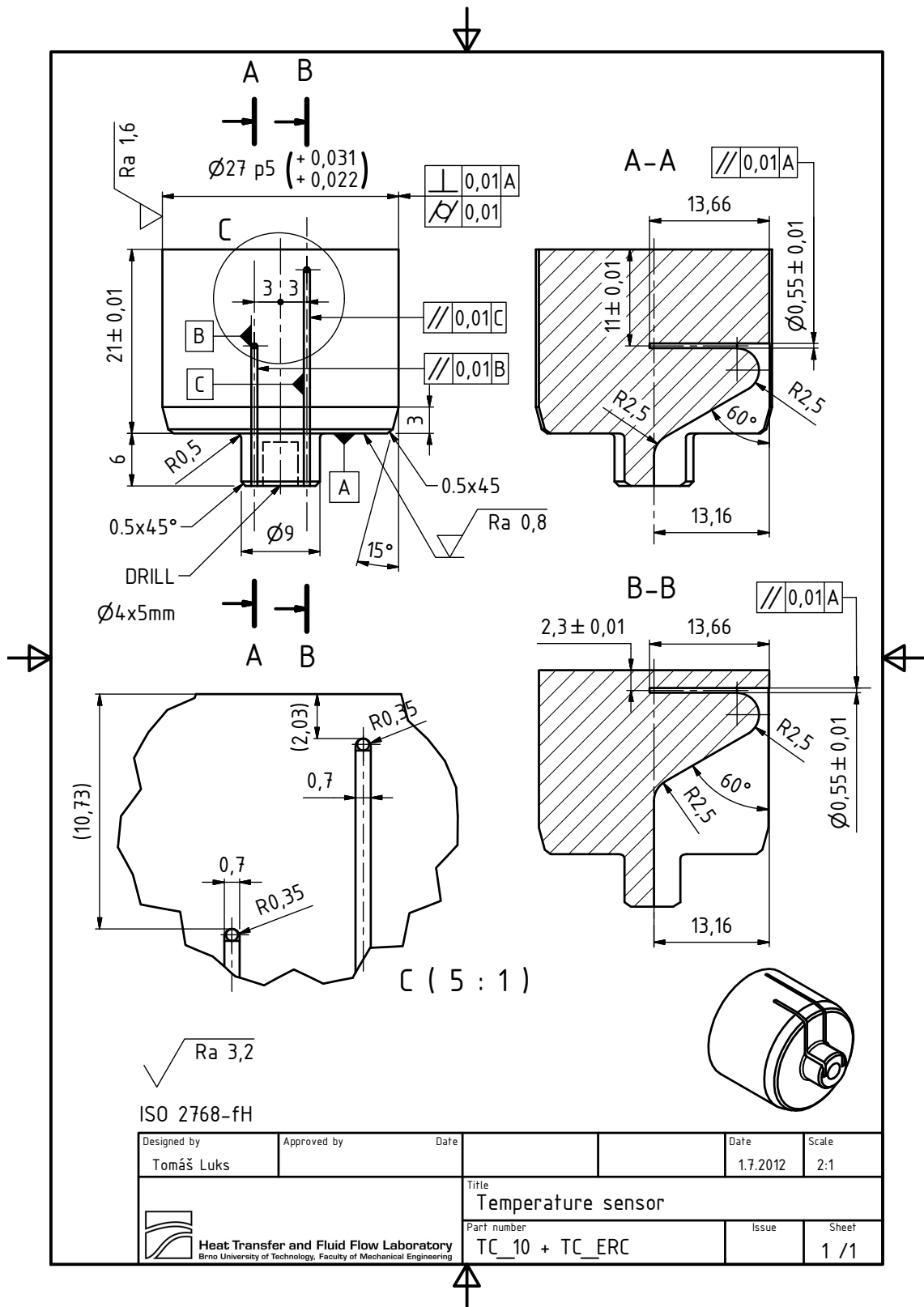


Obrázek A.7: Teplotní senzor (etapa III.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro konec válcovací kampaně

A.2. Teplotní senzory pro průmyslové testy

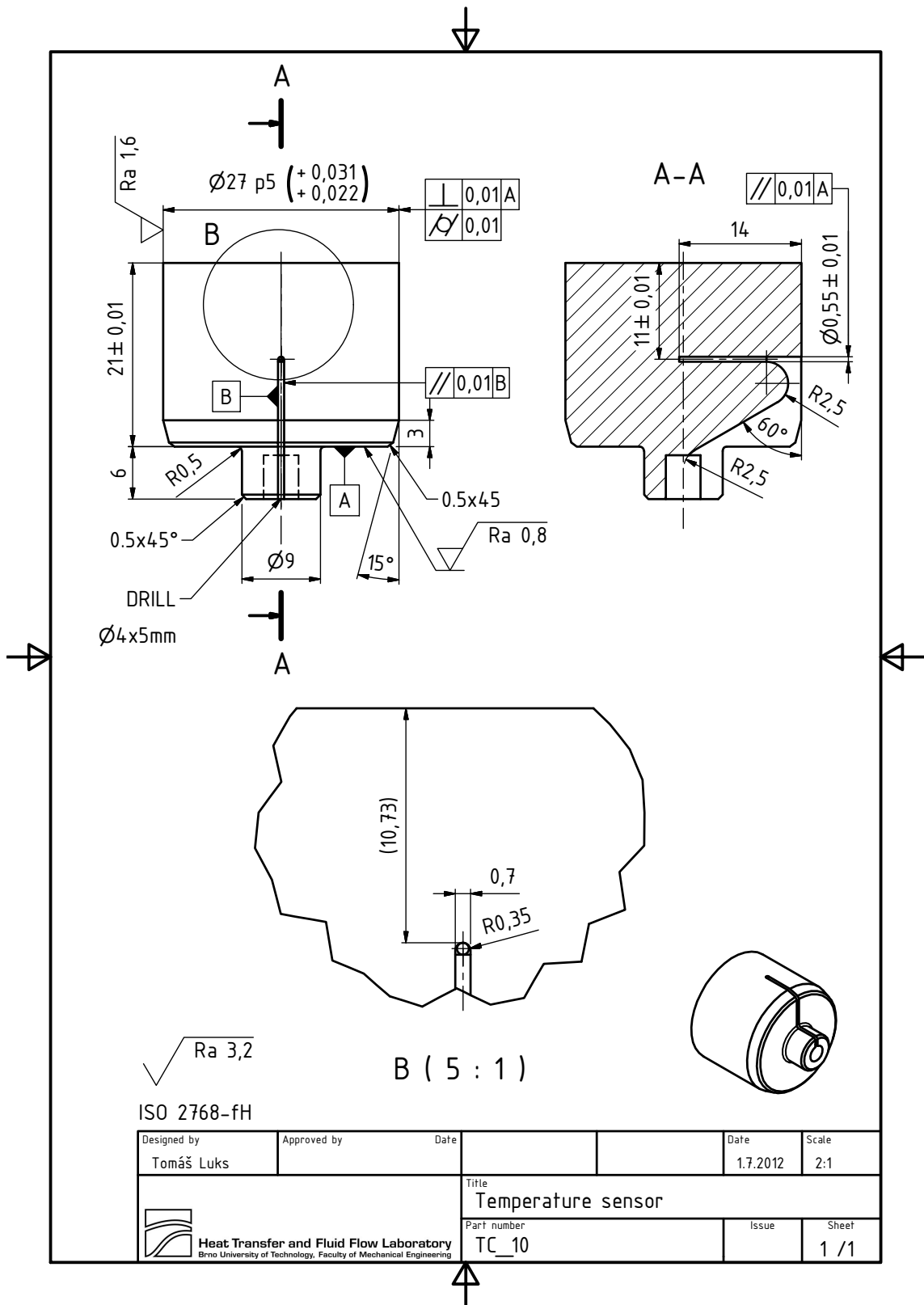


Obrázek A.8: Teplotní senzor (etapa IV.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro začátek válcovací kampaně



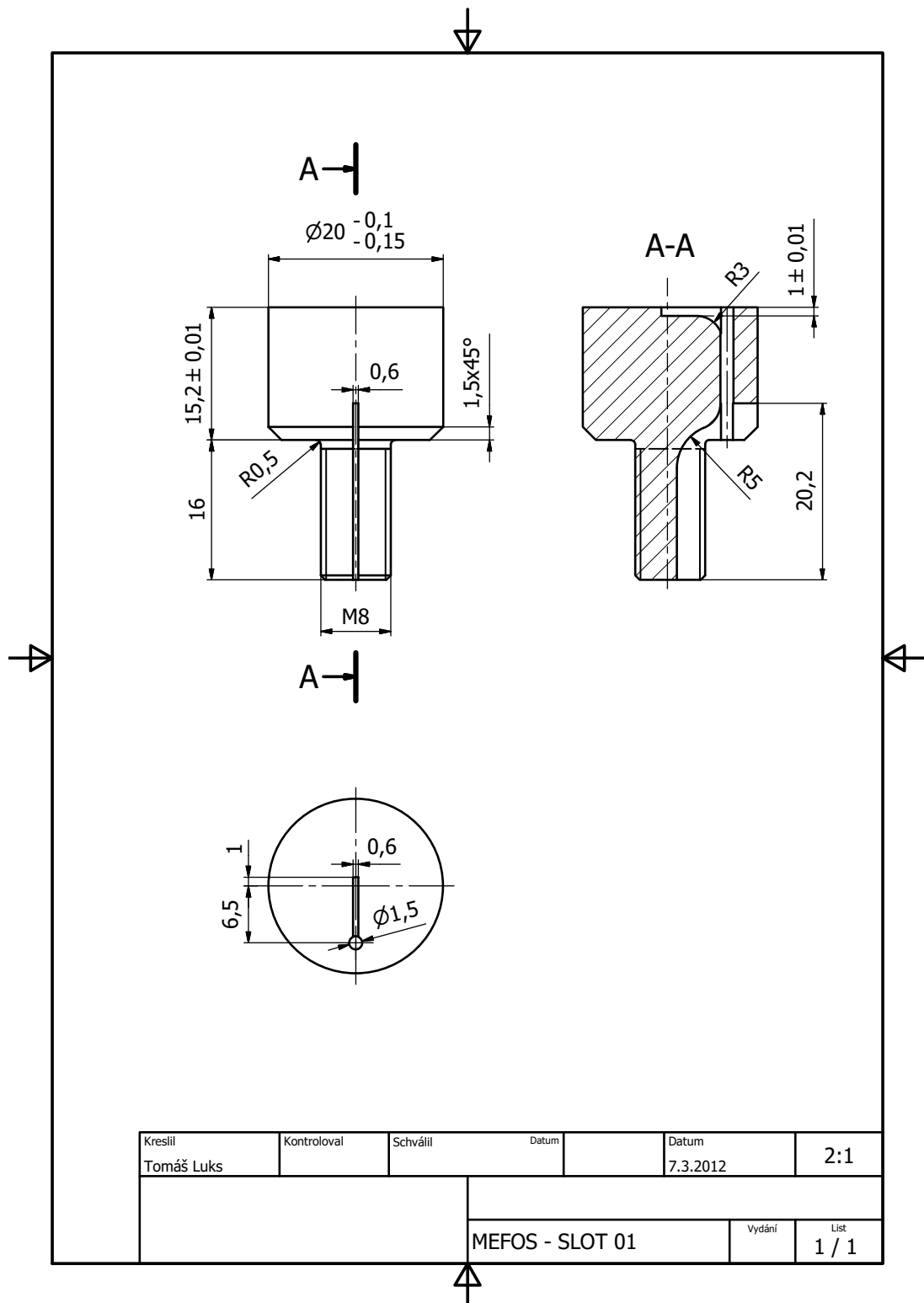
Obrázek A.9: Teplotní senzor (etapa IV.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro konec válcovací kampaně

A.2. Teplotní senzory pro průmyslové testy

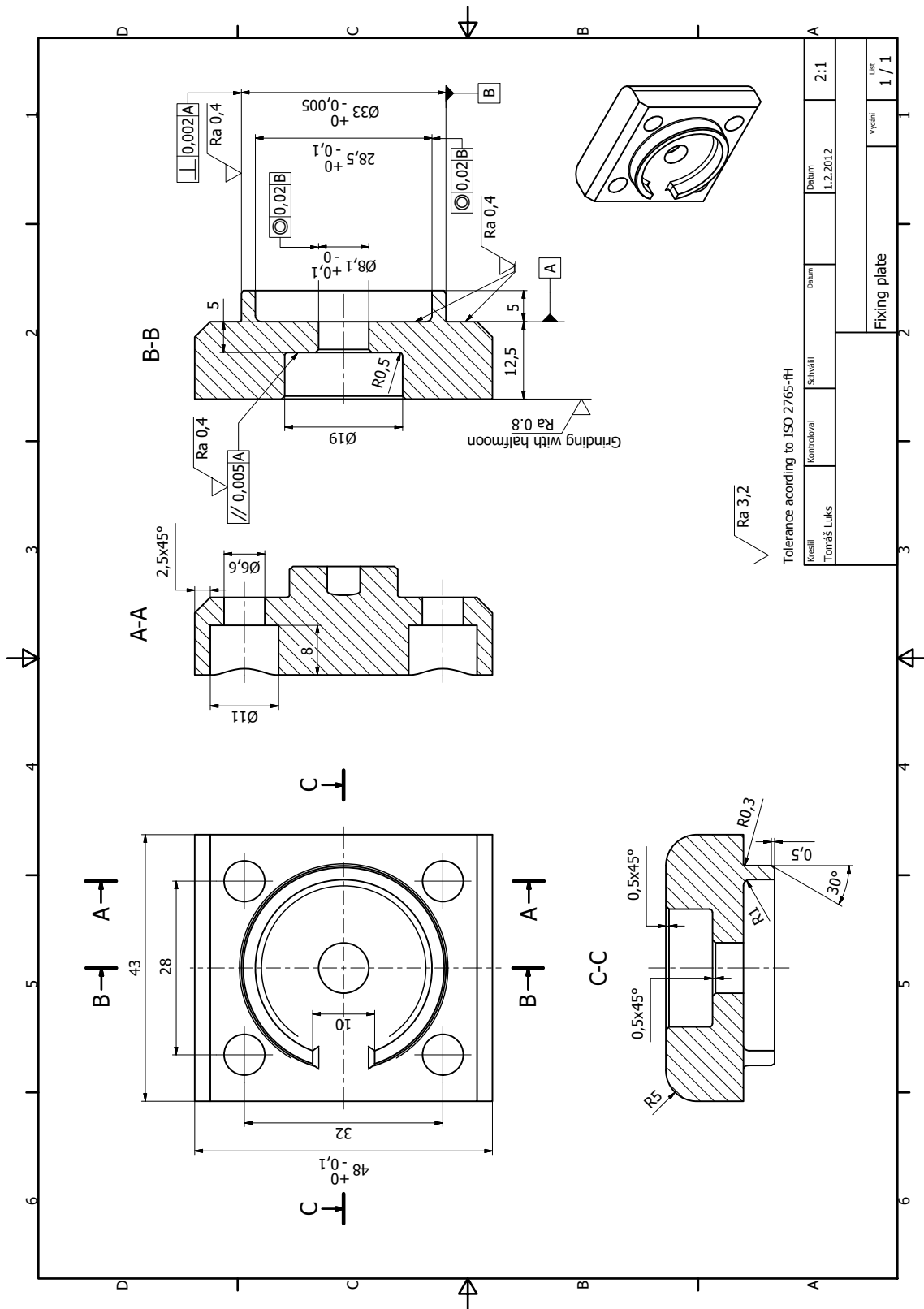


Obrázek A.10: Teplotní senzor (etapa IV.) pro průmyslové testy, tělo snímače navržené pro měření ohřívání válce během válcovací kampaně

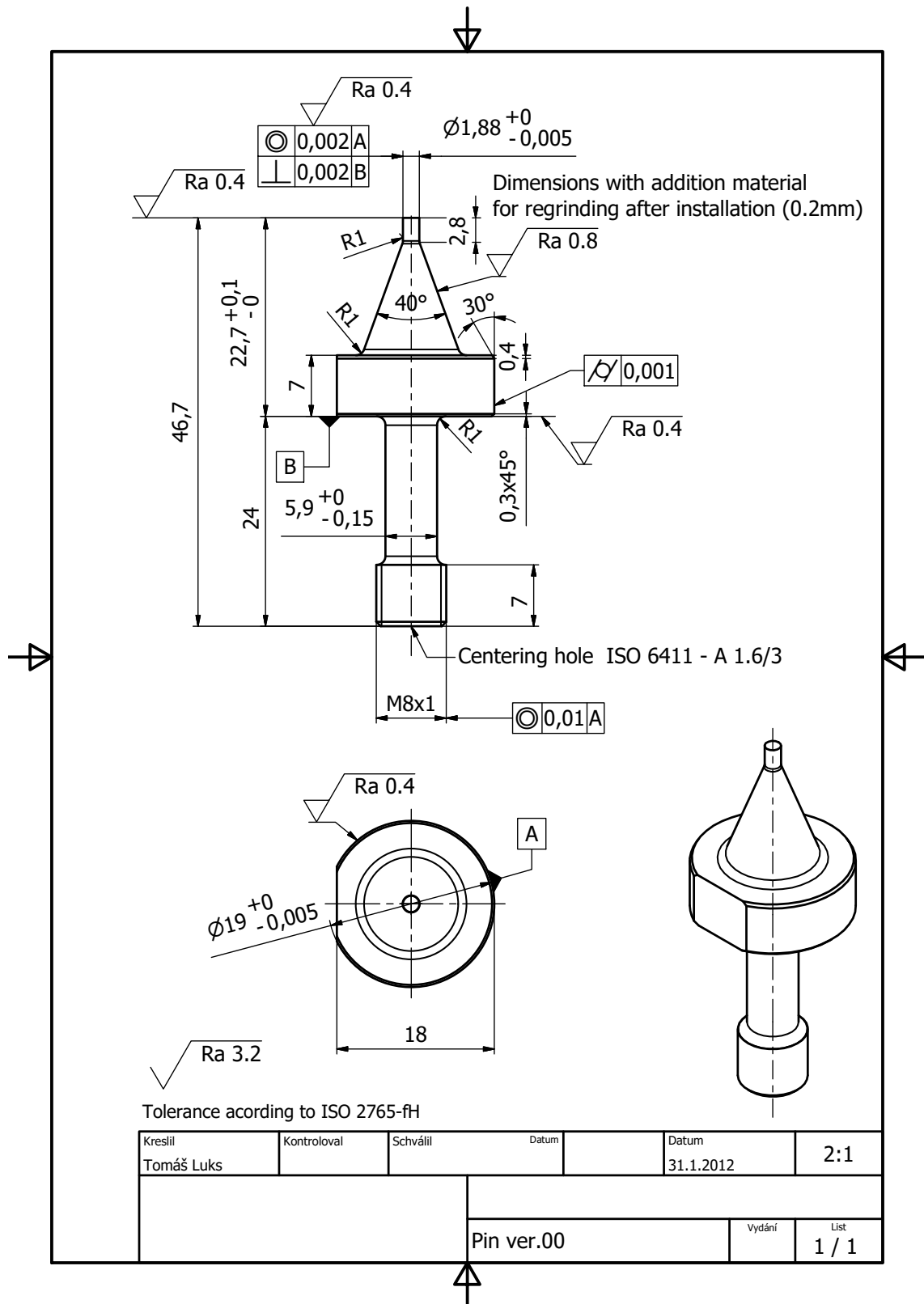
A.3 Měření MEFOS



Obrázek A.11: Teplotní senzor pro pilotní testy MEFOS, tělo pájeného snímače pro jeden termočlánek



Obrázek A.12: Upínací destička pin senzoru



Obrázek A.14: Měřící pin

B

Parametry snímačů

Force

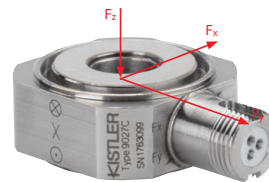


3-Component Quartz Force Sensor 24x24x12 mm, -8 ... 8 kN

Types 9027C, 9028C,
9026C4

Quartz force sensors are able to measure the three perpendicular components of a dynamic or quasistatic force in any direction.

- Precise measurement regardless of the acting point of the force
- Large useable frequency range
- Compact size
- Rust free and sealed sensor case
- Plug connection via robust multipole connector



Description

The 3-component force sensor is mounted under preload between two mounting flanges. The quartz force sensor can therefore measure compression and tensile forces.

The force measurement of the sensor is based on the piezoelectric principle. The application of a force results in the quartz washers in the sensor (one for each of the force components to be measured) yielding a charge proportional to the force. This is picked off by built-in electrodes and transferred to the corresponding connector.

The contact faces of the sensor are covered with ceramic discs to facilitate ground-isolated mounting of the sensor. The straightforward and vibration-resistant design of the sensor produces a very rigid structure. The resulting high natural frequency makes highly dynamic force measurements possible over a large frequency range.

The cable connection of the sensors is made via a 3-pole connector V3 neg. (design patented). This is provided with a positioning aid for simple centering that also protects the plug and receptacle connector against unintended rotation. After correct mounting the sensor is immediately ready for use without recalibration.

Application

Kistler 3-component quartz force sensors measure simply, directly and precisely. They are used in the measurement of:

- Cutting forces in metal cutting processes
- Collision forces in crash tests
- Recoil forces of rocket motors
- Vibration and friction forces
- Ground reaction forces in biomechanics
- Vehicle forces on the road and test bed
- Forces on wind tunnel balances

Technical Data Types 9027C, 9028C

Range	F_x, F_y	kN	-4 ... 4 ¹⁾
	F_z	kN	-8 ... 8 ¹⁾
	F_z	kN	0 ... 28 ²⁾
Overload	F_x, F_y	kN	-5/5 ¹⁾
	F_z	kN	-10/10 ¹⁾
Calibrated range	F_x	kN	0 ... 4 ¹⁾
	F_y	kN	0 ... 4 ¹⁾
	F_z	kN	0 ... 8 ¹⁾
	F_z	kN	0 ... 28 ²⁾
Permissible moment loading	M_x, M_y	N-m	-22/22 ¹⁾
	M_z	N-m	-23/23 ¹⁾
Threshold	N	<0,01	
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈-7,8 ¹⁾
	F_z	pC/N	≈-3,8 ¹⁾
Linearity, each axis		%FSO	≤±0,25 ¹⁾
Hysteresis, each axis		%FSO	≤0,25 ¹⁾
Crosstalk	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%	≤±0,5 ¹⁾
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±2 ¹⁾
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%	≤±3 ^{1) 3)}
Operating temperature range	°C	-40 ... 120	
Insulation resistance at 20 °C	Ω	>10 ¹³	
Ground isolation	Ω	>10 ⁸	
Capacitance, each channel	pF	30	
Connector		V3 neg.	
Weight	g	30	
Degree of Protection EN60529			
with cable Type 1698AA/AB		IP65	
with cable Type 1698ACsp		IP67	

¹⁾ Standard mounting with 20 kN preload

²⁾ Without preload

³⁾ Crosstalk $F_x, F_y \rightarrow F_z$ is $\leq \pm 2$ %, if e.g. four sensors are mounted in a dynamometer.

Page 1/4

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

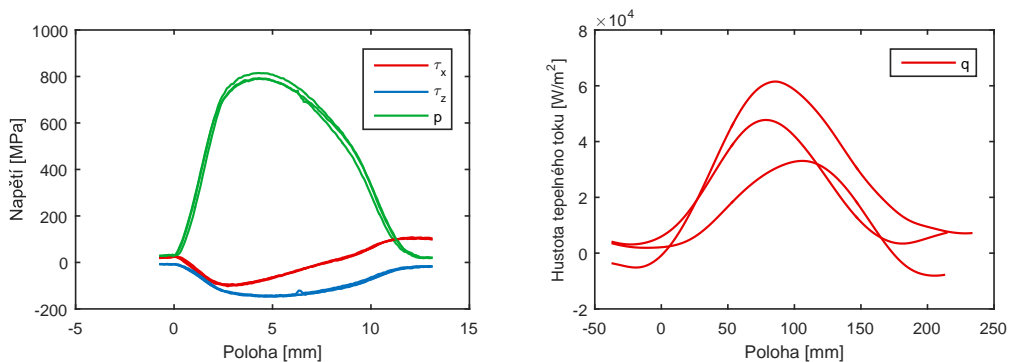
©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

9027C_000-726e-03:10

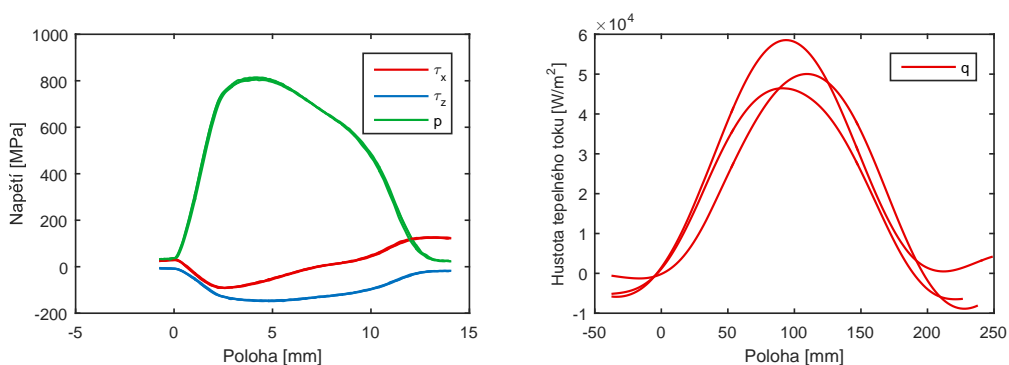
Obrázek B.1: Parametry tříosého piezoelektrického snímače síl KISTLER 9028

C

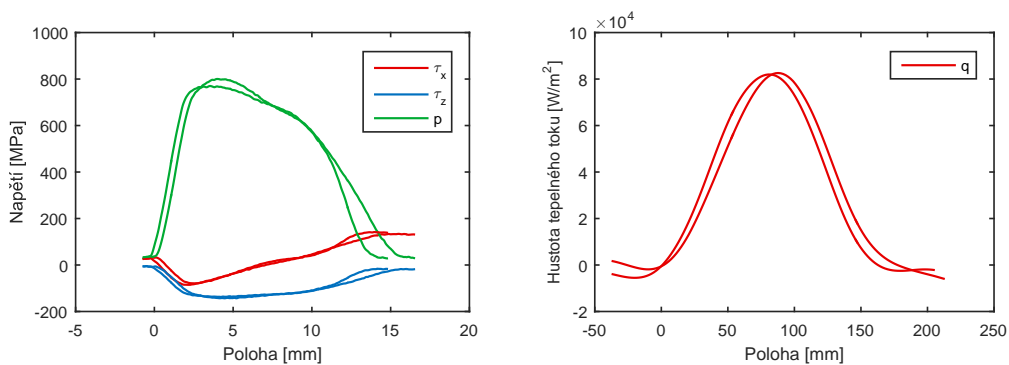
Výsledky z měření MEFOS



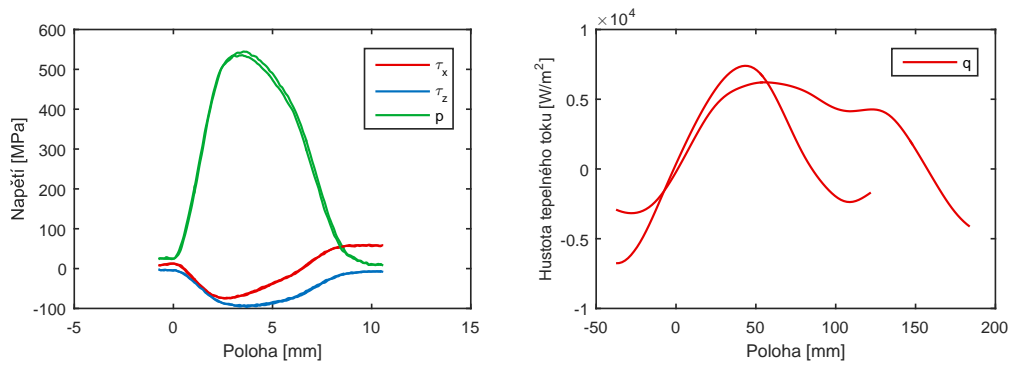
Obrázek C.1: C1: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



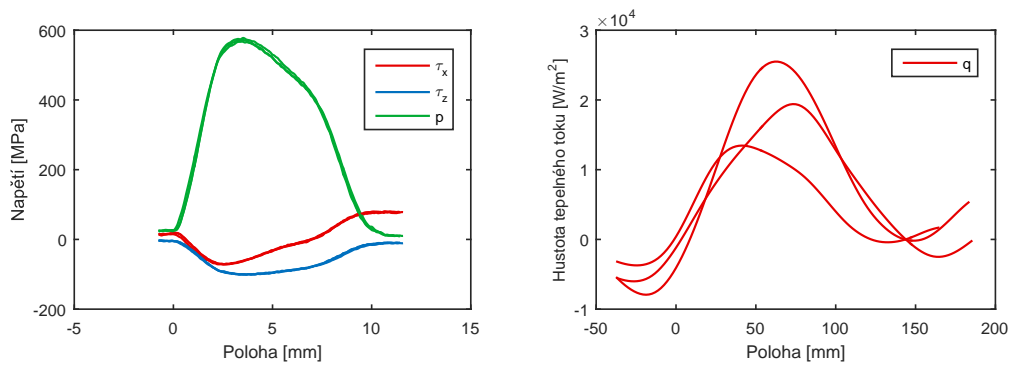
Obrázek C.2: C2: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



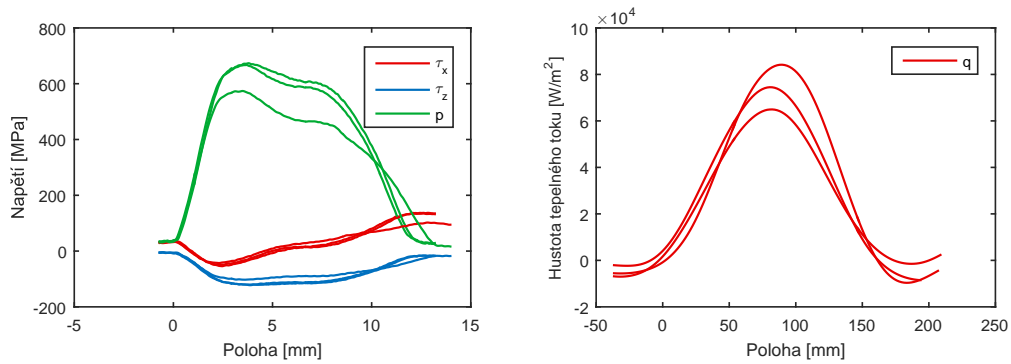
Obrázek C.3: C3: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



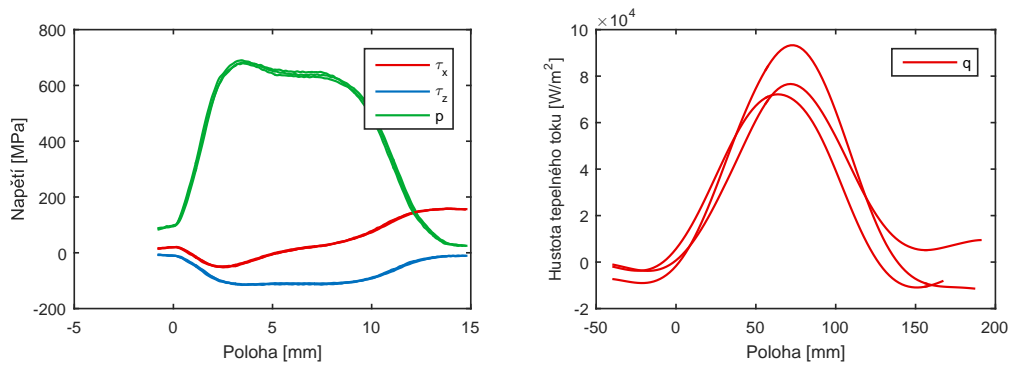
Obrázek C.4: C4: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



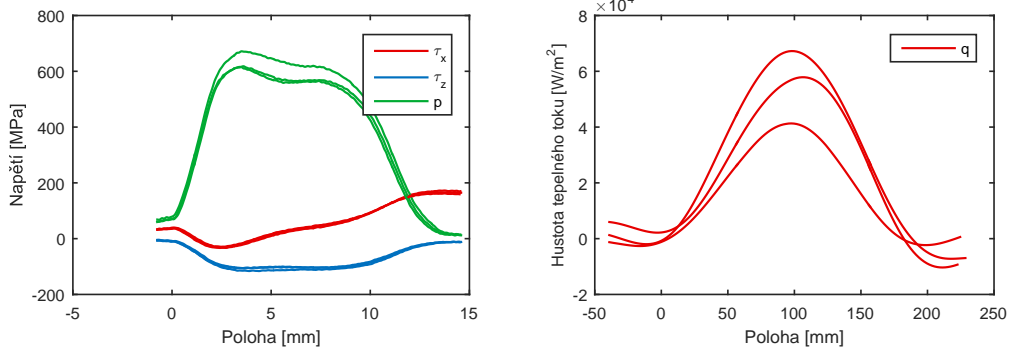
Obrázek C.5: C5: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



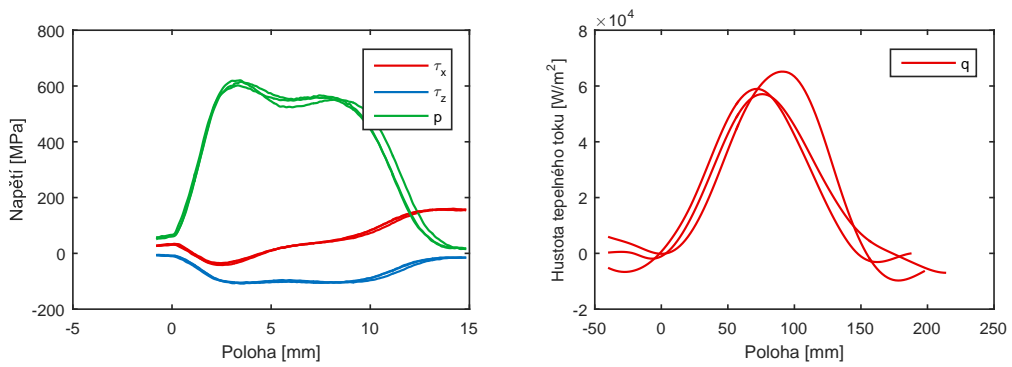
Obrázek C.6: C6: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



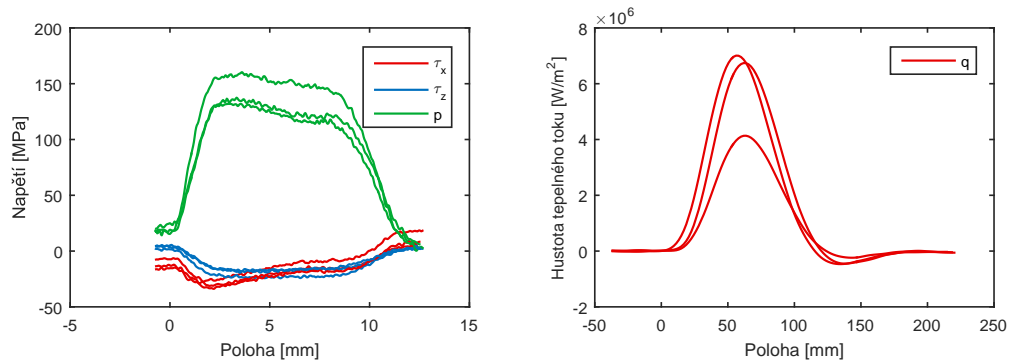
Obrázek C.7: C7: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



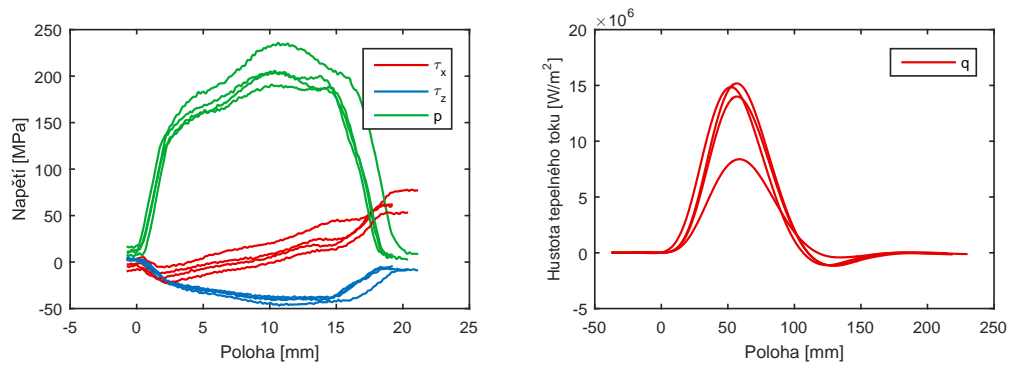
Obrázek C.8: C8: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



Obrázek C.9: C9: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře

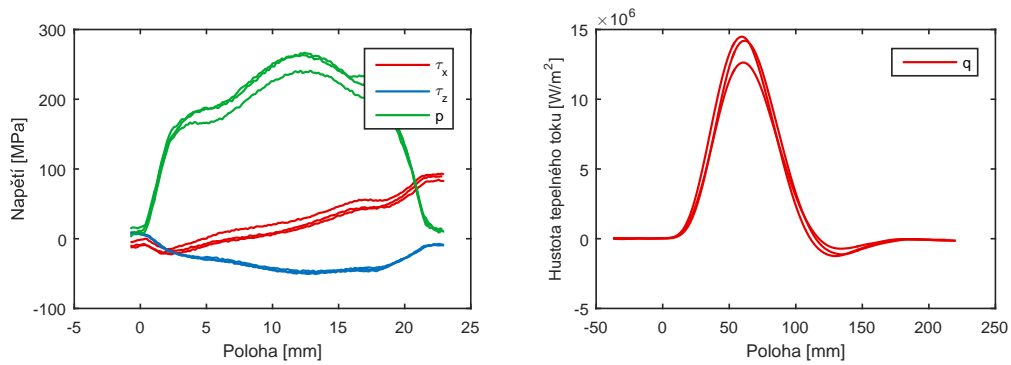


Obrázek C.10: H1: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře

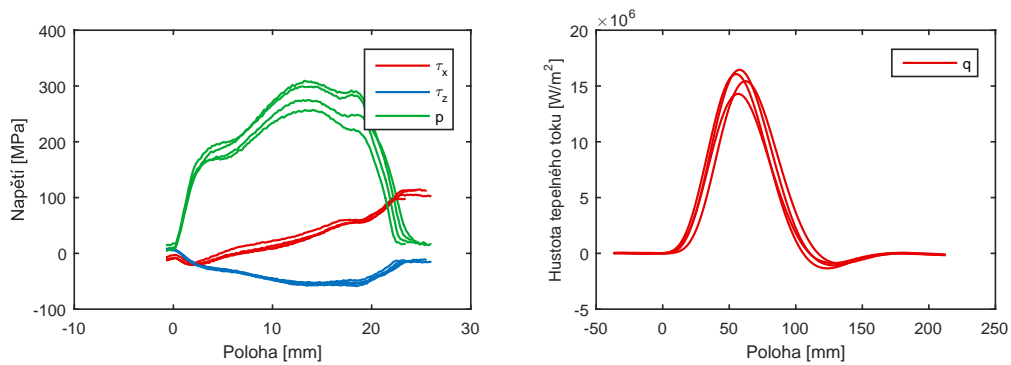


Obrázek C.11: H2: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře

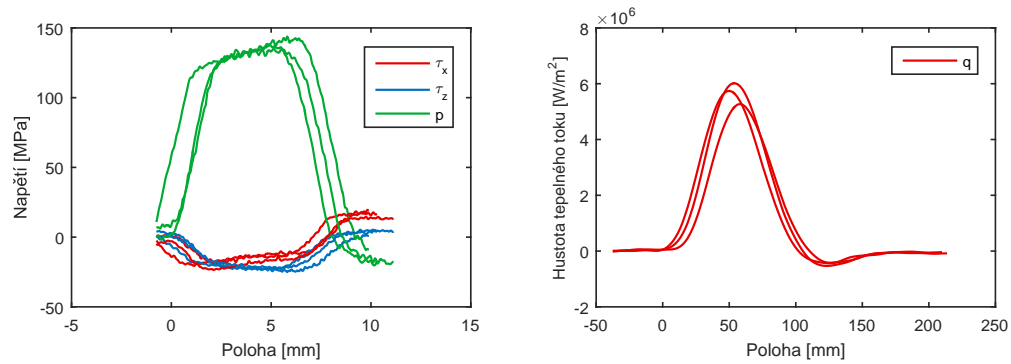
C. Výsledky z měření MEFOS



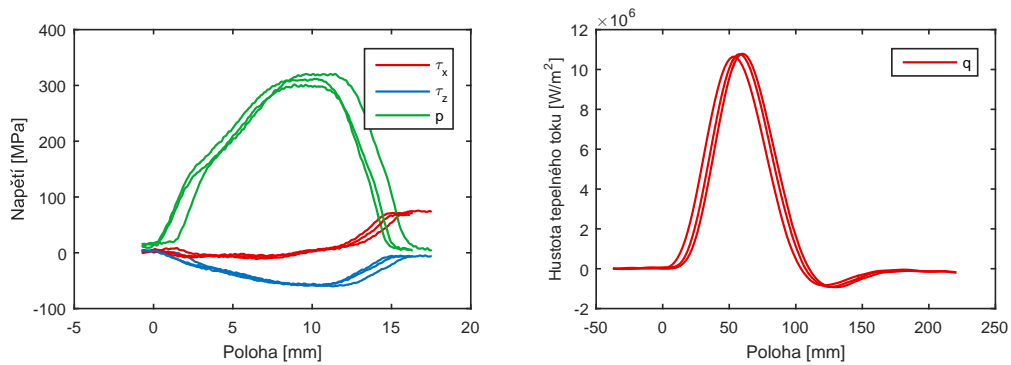
Obrázek C.12: H_3 : napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



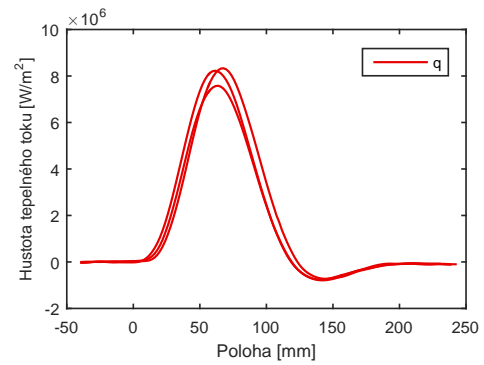
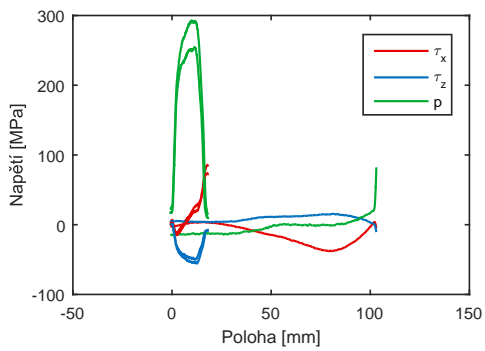
Obrázek C.13: H_4 : napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



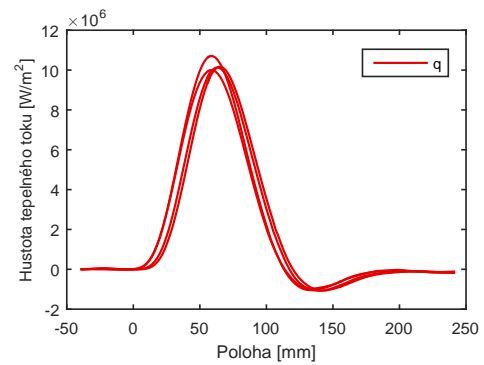
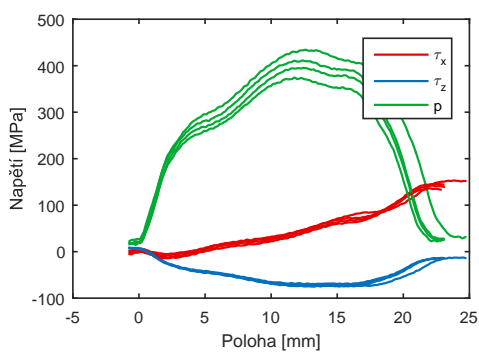
Obrázek C.14: H_5 : napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



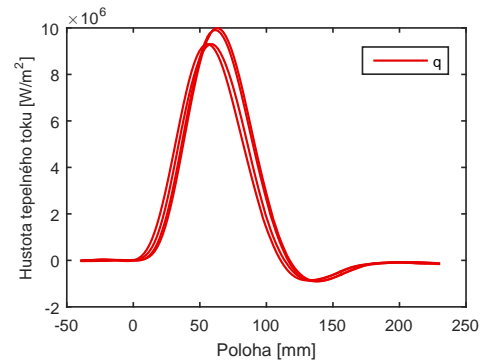
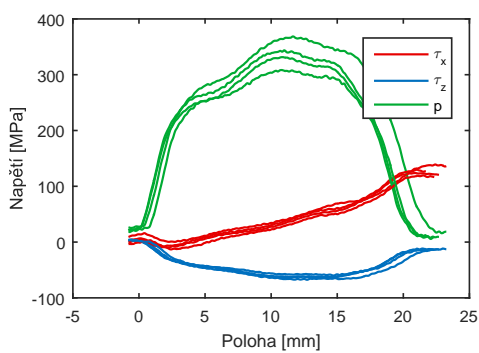
Obrázek C.15: H_6 : napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



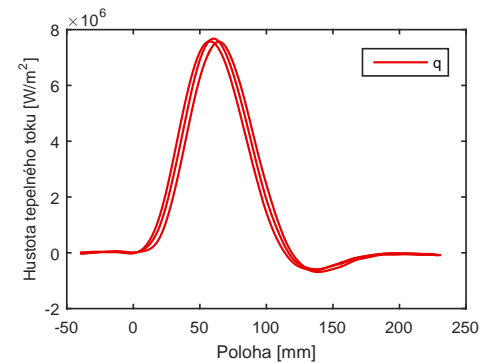
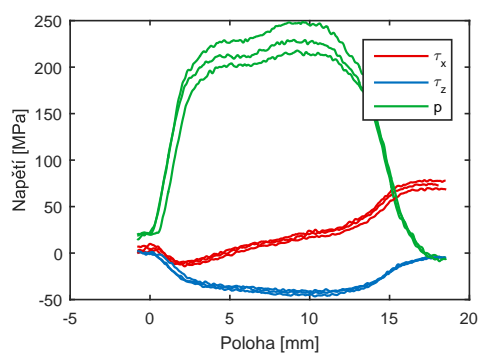
Obrázek C.16: H7: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



Obrázek C.17: H8: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře

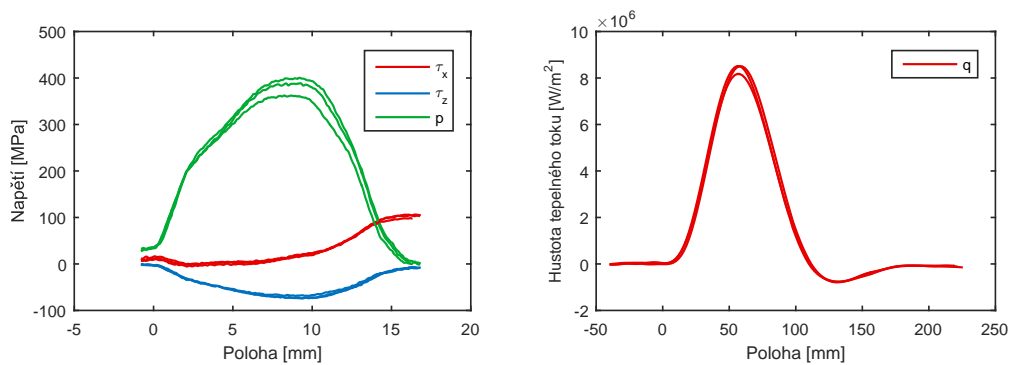


Obrázek C.18: H9: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře

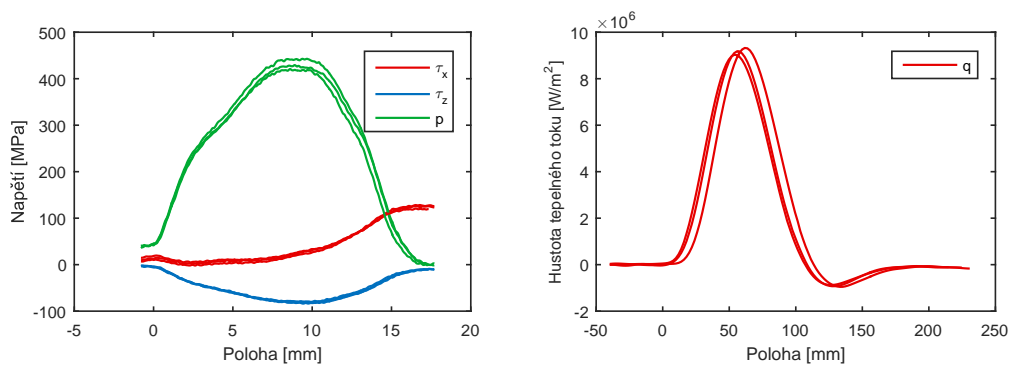


Obrázek C.19: H10: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře

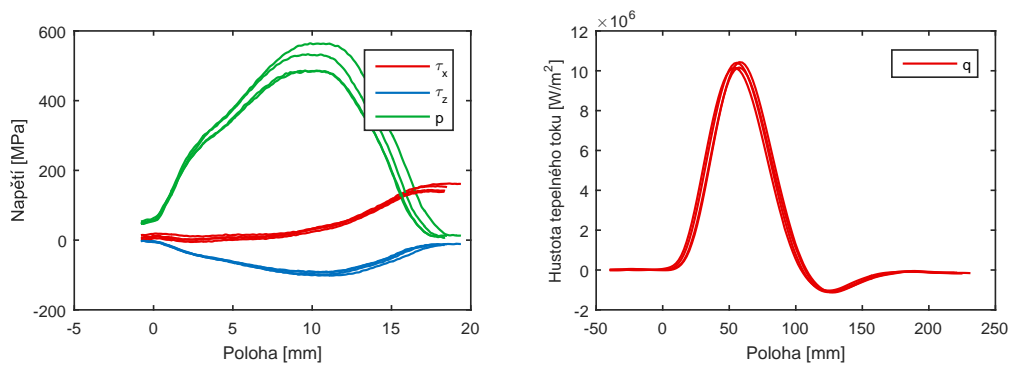
C. Výsledky z měření MEFOS



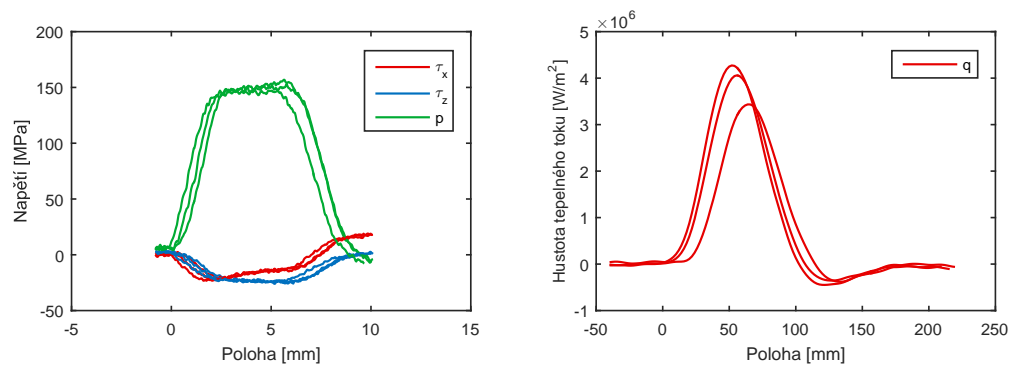
Obrázek C.20: H11: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



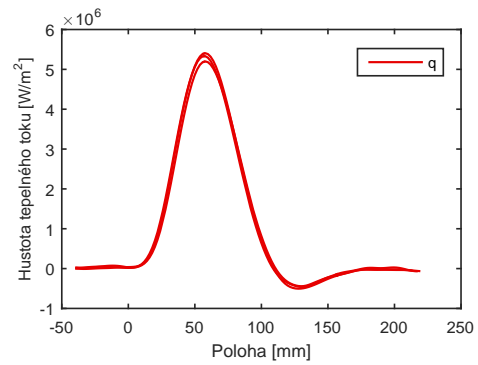
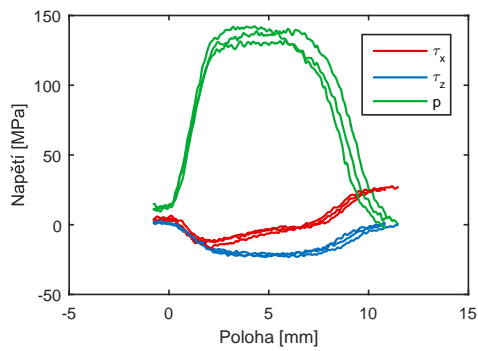
Obrázek C.21: H12: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



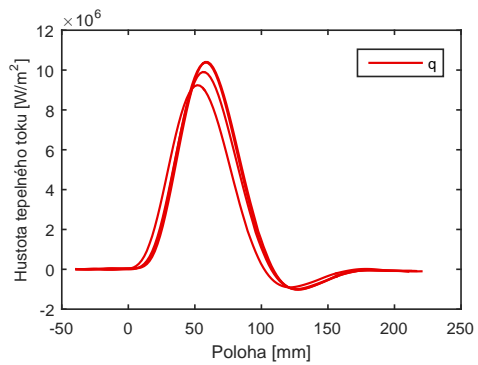
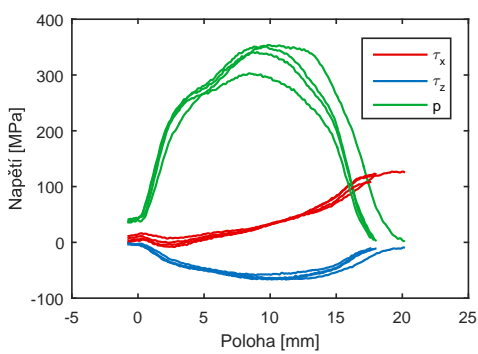
Obrázek C.22: H13: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



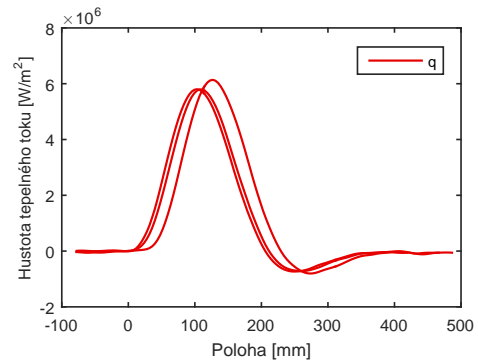
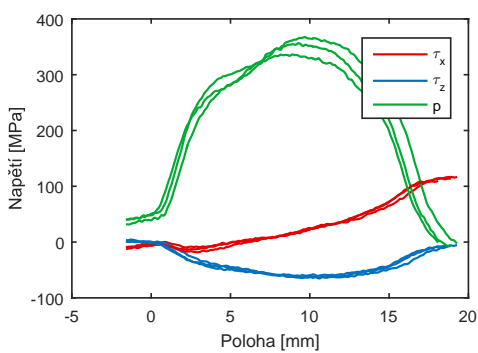
Obrázek C.23: H14: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



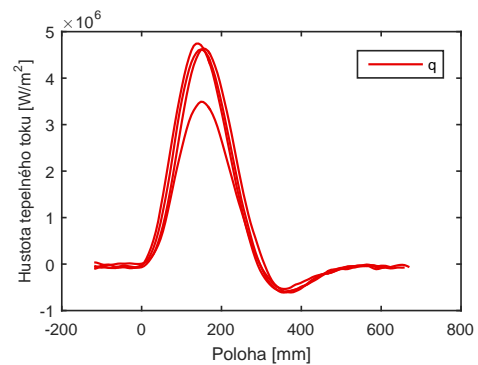
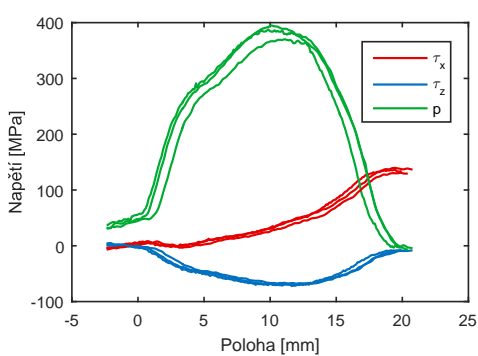
Obrázek C.24: H15: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



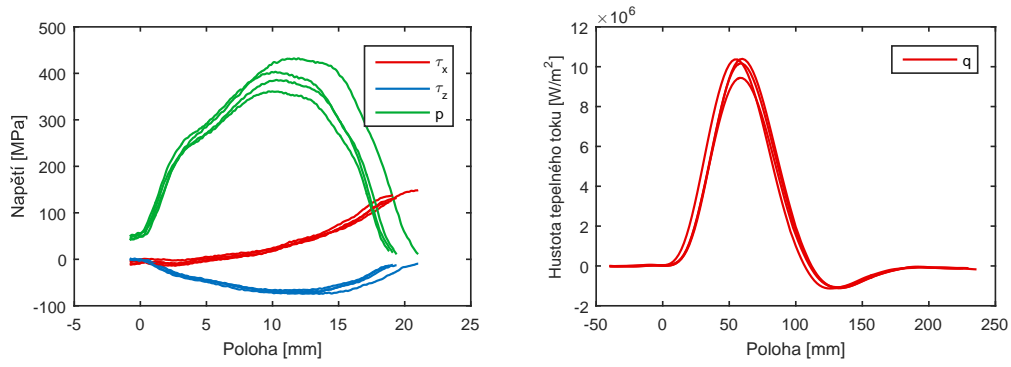
Obrázek C.25: H16: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



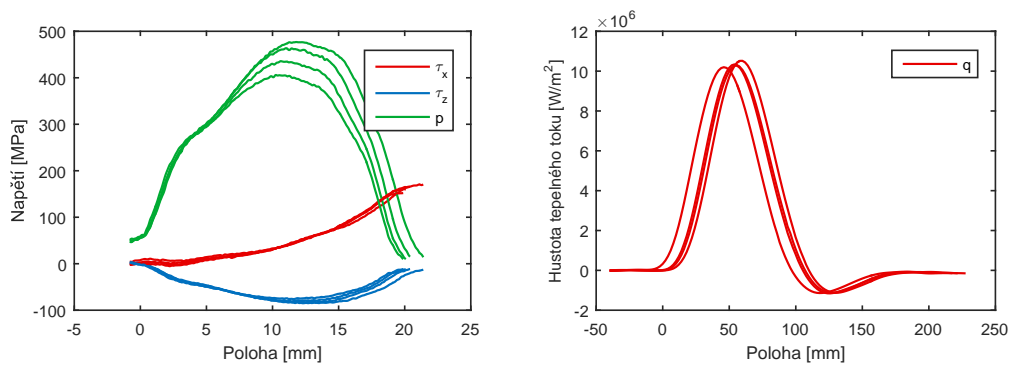
Obrázek C.26: H17: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



Obrázek C.27: H18: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve válč. mezeře



Obrázek C.28: H19: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře



Obrázek C.29: H20: napětí v kontaktu a hustota tepelného toku ve vál. mezeře