

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

Ing. RADEK ZAHRADNÍK

TEPELNĚ – MECHANICKÁ DEGRADACE POVRCHŮ ZA VYSOKÝCH TEPLŮT

HEAT – MECHANICAL DEGRADATION OF SURFACES AT THE HIGH TEMPERATURES

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

PHD THESIS

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: prof. Ing. MIROSLAV RAUDENSKÝ, CSc.

Datum obhajoby: 6. 5. 2014

KLÍČOVÁ SLOVA

Válcování, abraze, tepelná únava, degradace povrchů, životnost, ANSYS

KEYWORDS

Rolling, abrasion, thermal fatigue, surface degradation, working life, ANSYS

Místo uložení dizertační práce

Laboratoř přenosu tepla a proudění, FSI VUT v Brně

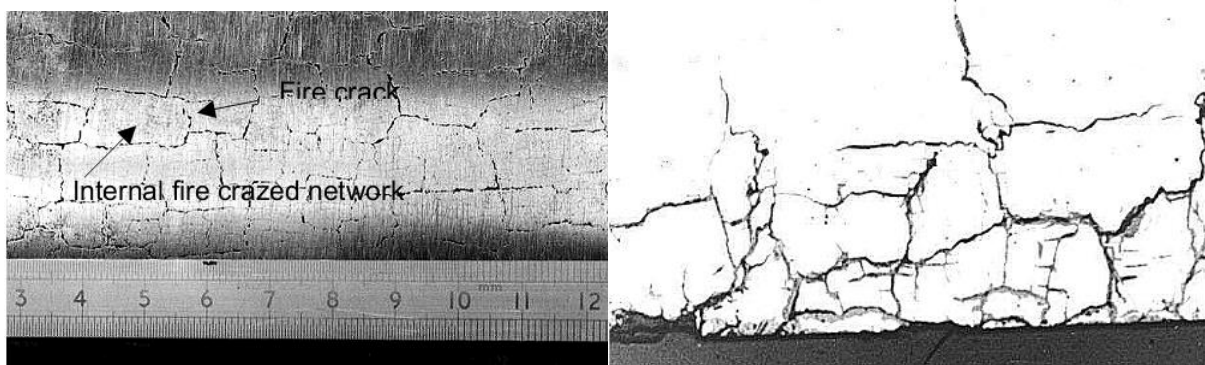
Obsah

1	DEGRADAČNÍ MECHANISMY VÁLCŮ.....	5
1.1	Opotřebení.....	6
1.2	Oxidace	6
1.3	Tepelná únava povrchu	7
1.4	Kontaktní únava	9
1.5	Paralelní trhliny k povrchu.....	10
1.6	Degradace povrchů v kontextu	11
2	NUMERICKÝ MODEL PRO VÝPOČET STAVU NAPĚTÍ PRACOVNÍHO VÁLCE.....	12
3	PŘÍPADOVÁ STUDIE – PODÍL ZATĚŽUJÍCÍCH ČINITELŮ	12
3.1.1	<i>Experimentální okrajová podmínka – Teplotní namáhání.....</i>	12
3.2	Výsledky	13
3.2.1	<i>Obvodové napětí</i>	14
3.2.2	<i>Celkové obvodové přetvoření.....</i>	14
3.2.3	<i>Plastické obvodové přetvoření</i>	15
3.2.4	<i>Hysterezní smyčka napětí vs. Deformace.....</i>	16
3.2.5	<i>Celkové srovnání zatěžujících stavů</i>	17
3.3	Rozbor výsledků	18
4	PŘÍPADOVÉ STUDIE – HAVARIJNÍ STAV.....	18
4.1.1	<i>Experimentální okrajové podmínka – Teplotní zatížení.....</i>	19
4.2	Výsledky	19
4.2.1	<i>Obvodové napětí</i>	19
4.2.2	<i>Celkové obvodové přetvoření.....</i>	20
4.2.3	<i>Plastické obvodové přetvoření</i>	21
4.2.4	<i>Napjatostně-deformační křivka.....</i>	22
4.3	Rozbor výsledků	23
5	NUMERICKÝ MODEL MIKROSTRUKTURY PRACOVNÍ VRSTVY	23
6	PŘÍPADOVÉ STUDIE	24
6.1.1	<i>Vygenerovaná mikrostruktura oceli s vysokým obsahem chromu</i>	24
6.1.2	<i>Vygenerovaná mikrostruktura litiny s vysokým obsahem chromu.....</i>	25
6.2	Výsledky případových studií	25
6.2.1	<i>Napětí mikrostruktury oceli v vysokým obsahem chromu.....</i>	25
6.2.2	<i>Napětí mikrostruktury litiny s vysokým obsahem chromu</i>	26
6.3	Rozbor výsledků případových studií.....	26
7	ZÁVĚR.....	27
7.1	Shrnutí poznatků z makrosférického modelování.....	27
7.2	Shrnutí poznatků z mikrosférického modelování	28
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29
	ABSTRAKT	30

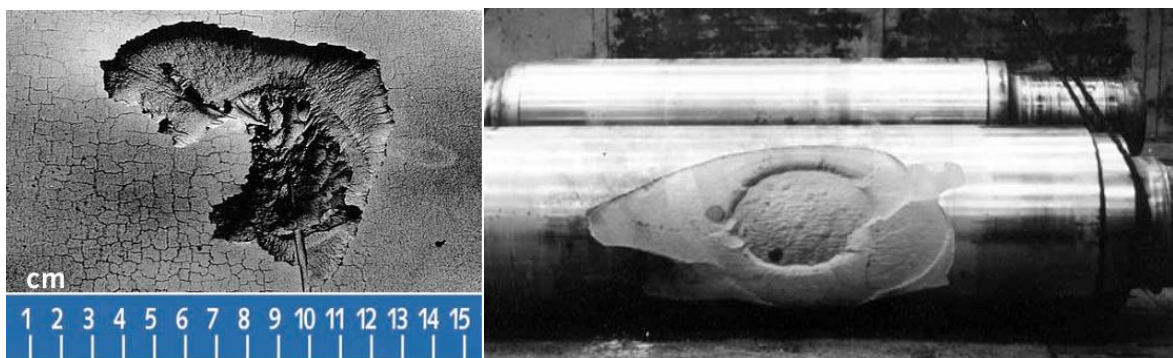
1 DEGRADAČNÍ MECHANISMY VÁLCŮ

Degradace povrchu pracovního válce je problematickým prvkem celého procesu válcování. Povrch válce je vystaven kombinovanému tepelně – mechanickému namáhání. Hlavními mechanismy degradace jsou tepelná únava, která vzniká při zahřívání pracovních válců provalky, dále mechanické opotřebení díky kontaktu mezi válcem a provalkem, oxidace a také kontaktní únava, která vzniká u válcovacích stolic, kde je použit opěrný válec (drtivá většina válcování oceli za tepla) [2]. Těmto všem vlivům je nejvíce vystavena povrchová vrstva válce v řádu jednotek milimetrů.

Důsledky těchto mechanismů můžeme vidět na Obr. 1. Takto poškozený válec musí být ze stolice vyjmut, v lepším případě ho lze přebrousit, v horším případě musí být zcela vyřazen, viz Obr. 2. V praxi je snaha o co nejmenší počet přebroušení s co možná nejmenším úběrem a zvýšit tak produkční život válce. Z tohoto úhlu pohledu se jeví jako nejnebezpečnější masivní, lokální odlupování materiálu z povrchové vrstvy válce než trhliny samotné. Trhliny nezpůsobují tak velké snížení kvality vývalků, jako makroskopické nerovnosti na povrchu válce. Ty musí být při repasování válce kompletně odbroušeny, což vede k velkým úběrům na pracovním povrchu válce.



Obr. 1 Ukázka působení degradačních mechanismů na povrchovou vrstvu pracovního válce. Vlevo síť teplotních trhlin („fire crazing“) způsobených teplotním namáháním, vpravo síť trhlin způsobená teplotní a kontaktní únavou [1].



Obr. 2 Vlevo masivní poškození povrchu díky teplotnímu namáhání povrchu, vpravo neopravitelné poškození pracovního válce, způsobena chybou při výrobě válce, která vedla k oddělení slupky válce od jádra [2], viz kapitola 4.

V praxi se válce vyměňují po ukončení válcovací kampaně. Většina válcoven má vysledovány empirické závislosti mezi množstvím vyválcovaného materiálu a životností pracovních válců. Můžeme se setkat se snahou o průběžné monitorování stavu povrchu válců, ale sledování je problematické. V průběhu pracovního

procesu je povrch válce vizuálně obtížně přístupný. Vadí prostorové uspořádání, chladicí médium a rozžhavený kov. Slibnější se jeví sledovat kvalitu vývalků, což je hlavní hledisko kvality celého procesu.

1.1 OPOTŘEBENÍ

Pojmem opotřebení rozumíme kontinuální erozi nebo přemísťování materiálu ze základního tělesa. U pracovních válců si opotřebení lze představit jako nechtěnou lokální změnu topografie povrchu způsobenou ztrátou materiálu v daném místě. Mechanické opotřebení povrchu pracovního válce se děje převážně skrze tyto 4 dílčí mechanismy [4]:

- Adheze
- Abraze
- Rýhování
- Tribo-koroze

Tribo-koroze jako taková není mechanismem opotřebení. Je to způsob transferu iontů železa na snadněji oddělitelnou složku, tudíž má značný vliv na mechanické opotřebení. Mění jak mechanismy opotřebení, tak i rychlost degradace povrchu [4].

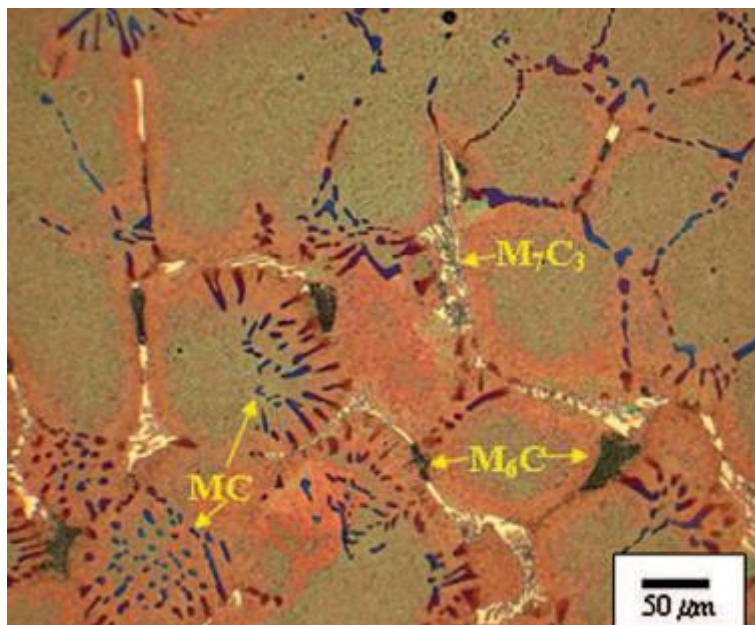
Během počáteční fáze kontaktu v řádu desítek cyklů vykazuje součinitel tření značnou fluktuaci. To je způsobeno počátečním vyhlazováním povrchu válce, kdy se uvolňuje značné množství abraziva. Po tomto stádiu dochází k ustálení třecích podmínek. Na povrchu se formuje celistvá vrstva oxidů, která vyhlazuje povrchové nerovnosti, působí jako lubrikant a zamezuje kontaktu kov na kov. Nikdy však nedojde k homogenní oxidaci celého povrchu. Mechanické opotřebení rozrušuje vrstvu oxidů. Ty jsou poté znovu a znovu formovány na povrchu, kde usnadňují mechanické opotřebení, viz kapitola 1.2.

Základní materiál nemusí být oddělen pouze adhezivním/abrazivním mechanismem, může být také oddělen od základu díky tomu, že je obalen v celistvé vrstvě zoxidovaného materiálu.

1.2 OXIDACE

Každý bod povrchu válce je periodicky vystaven během válcovací kampaně velice agresivnímu prostředí: vysoké teplotě, přítomnosti vody, popř. vodních par. V úhrnu jedné válcovací kampaně se celkový čas expozice jednoho místa na obvodu válce pohybuje v rozsahu od 2 až 20 minut **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Oxidační opotřebení je způsobeno difuzí a chemickými změnami při pracovním cyklu válce. Oxidace na válcích vzniká při teplotách od 250 °C [3]. Se vzrůstající teplotou se podíl oxidačního opotřebení zvyšuje [3]. Oxidace sleduje dráhy zvýšené difuzivity v oceli. Těmito drahami je rozhraní zrn a karbidů, viz Obr. 3. Vzniká tak souvislá vrstva oxidů na povrchu a pod ním se oxidy rozšiřují do hloubky podél sítoví oxidů. Souvislá vrstva oxidů na povrchu působí jako ochranná vrstva.



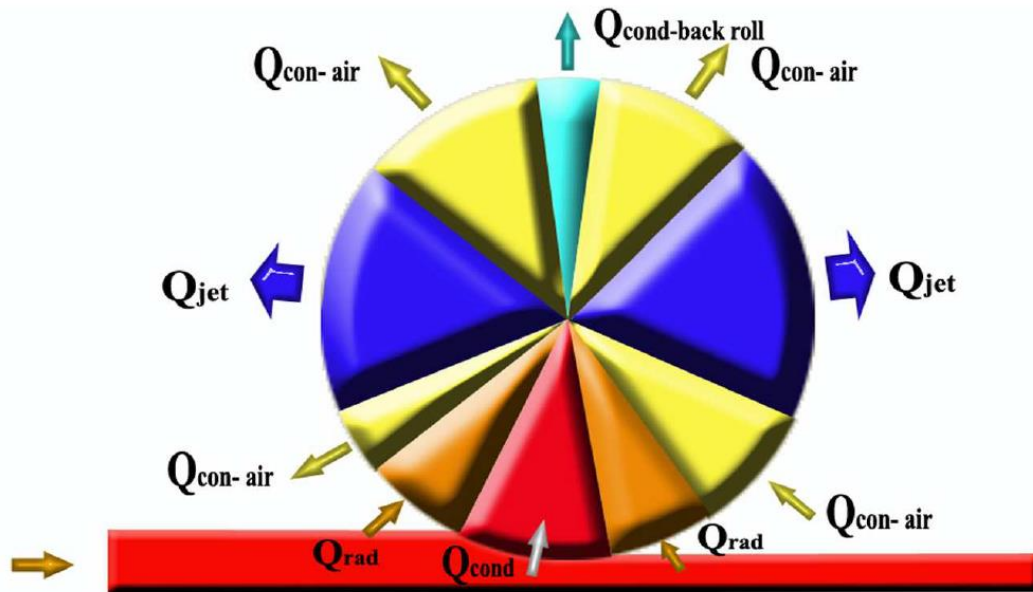
Obr. 3 Oxidace podél hranic zrn materiálu v skeletonové síti karbidů [9].

Zde se právě formuje mechanismus tribo-koroze. Oxidace umožňuje opotřebení, protože snižuje odolnost povrchu. Dokládá to korelace mezi teplotou povrchu a opotřebením povrchu v [4]. Opotřebení posléze umožňuje expozici „zdravého“ materiálu oxidačním podmínkám. Vzniká reciproční degradační mechanismus tribo-koroze, viz předchozí text.

1.3 TEPELNÁ ÚNAVA POVRCHU

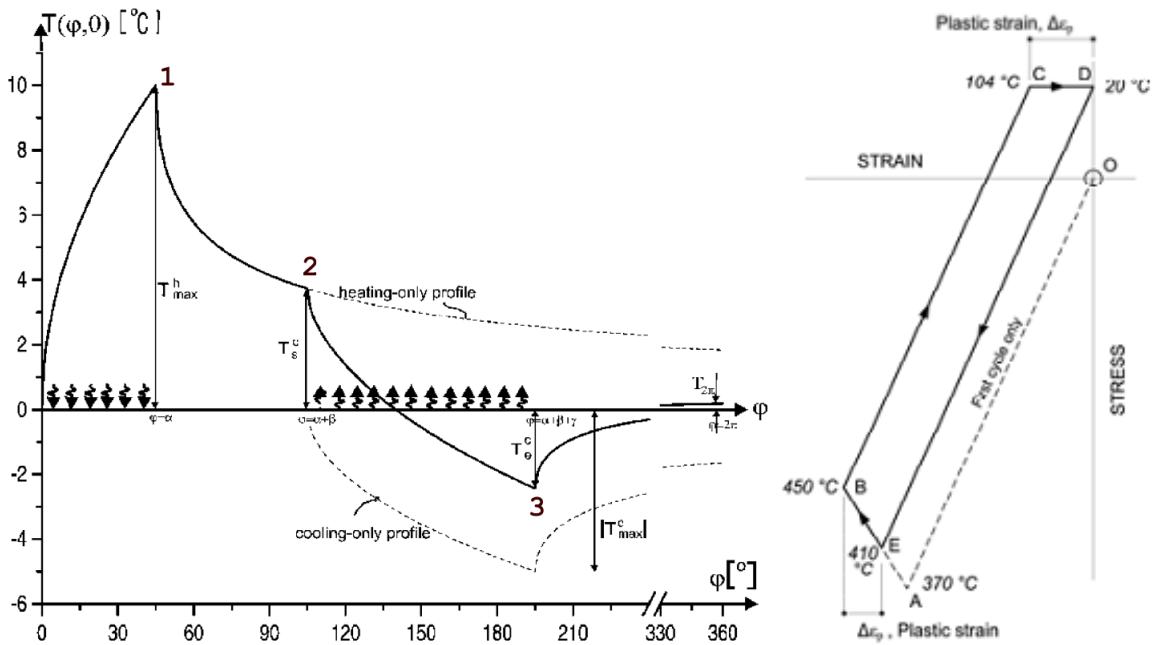
Tento mechanismus je pravděpodobně primární únavový faktor pracovních válců a je nejvíce odpovědný za tonáž válcovací kampaně. V praxi se vynakládá značné úsilí a finanční prostředky (především na chladicí médium) pro minimalizaci tepelné únavy.

Každý bod povrchu pracovního válce prochází během válcování cyklem ohřevu a chlazení Obr. 4. Povrch je nejprve zahřát vedením tepla při kontaktu s provalkem, následně stále přijímá teplo konvekcí z okolí a radiací od provalku. Poté přichází první chlazení a značný pokles teploty povrchové vrstvy. Po prvním chlazení opět přichází na řadu konvekce do okolí. K tomu se navíc přidává kontakt s opěrným válcem. Posléze přichází na řadu znovu konvekce do okolí a chlazení na vstupu, které povrch podchladí vůči teplotě v jádru válce. Podle konstrukce chlazení v konkrétní stolici může existovat poslední úsek, kde je prostor pro ohřev povrchu konvekcí z okolí, vedením z jádra válce a radiací z provalku.



- Teplo získané vedením
- Teplo získané radiací
- Teplo ztracené chlazením
- Teplo ztracené konvekcí do okolí
- Teplo ztracené vedením do opěrného válce

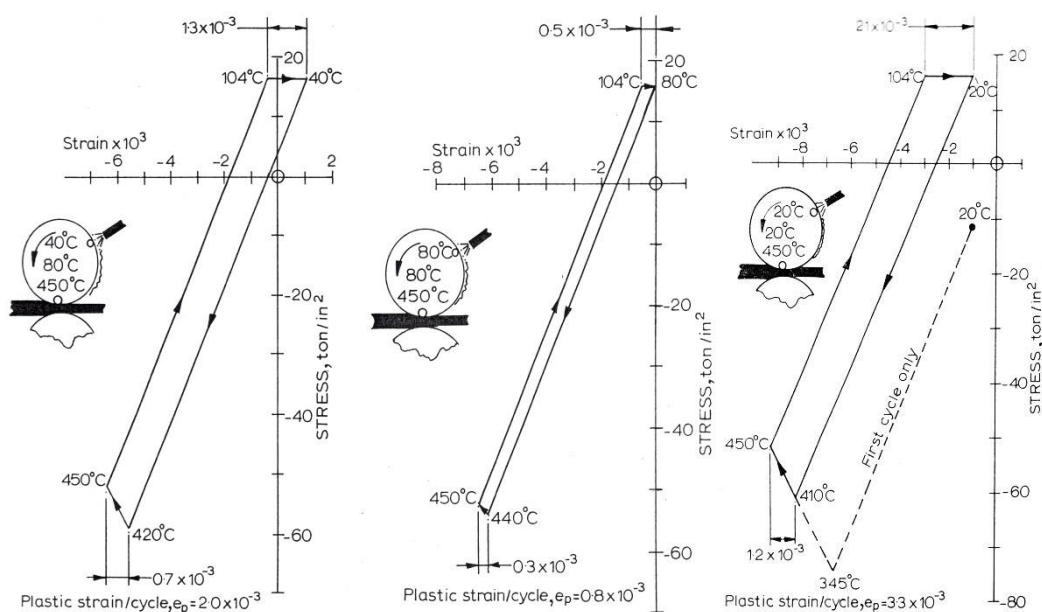
Obr. 4 Cyklus ohřevu a chlazení povrchu pracovního válce. Nejdůležitější jsou oblasti ohřevu od provalku, prvního a sekundárního chlazení [6].



Obr. 5 Vlevo znázornění průběhu povrchové teploty jako funkce úhlové polohy v jedné pracovní otáčce válce [6]. Vpravo průběh jedné otáčky pracovního válce z pohledu průběhu napětí v povrchové vrstvě [7].

Když se podíváme na výše popsany teplotní cyklus z hlediska průběhu povrchové teploty, napětí a přetvoření, vznikne průběh a cyklická hysterezní smyčka na Obr. 5. Kontakt s provalkem způsobí prudké zvýšení povrchové teploty, což vede k teplotní špičce – bod 1. Po výstupu teplota prudce klesne především díky vedení tepla do těla válce – křivka mezi 1-2. Další zlom přichází v bodě 2, kdy se začíná s chlazením na výstupu, které trvá do bodu 3, kde se začíná povrch opět nahřívát vedením z jádra válce. V hysterezní smyčce cyklus začíná první otáčkou v bodě O. Při ohřevu se povrch rozpíná, dochází ke zvětšení průměru válce. V tečném směru dochází ke kumulaci tlakového napětí – úsek O-A. Po překročení meze kluzu a za současného zvyšování teploty dochází k plastizaci povrchové vrstvy – úsek A-B. Při ochlazování klesá napětí a snižuje přetvoření. S dále postupujícím chladnutím se mění charakter napětí v povrchové vrstvě válce. Tlaková napětí se mění v tahová. V úseku C-D je povrch natolik podchlazen, že opět dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy, která dává za vznik únavovým trhlinám. Dále cyklus pokračuje identicky, pouze začíná v bodě D.

Napěťový stav povrchu válce je primárně určen ΔT (rozdíl mezi teplotou povrchu a jádra válce). Při podchlazení povrchu pracovního válce pod teplotu těla válce vznikají tahová napětí a tahová přetvoření – Obr. 6 vlevo. Ta vedou ke vzniku teplotně únavových trhlin. Pokud skončíme s chlazením na teplotě blízké jádru válce (tj. bezprostřednímu okolí povrchové vrstvy), dosáhneme tím snížení celkové plastické deformace a znemožníme rozvoj trhlin – Obr. 6 uprostřed.



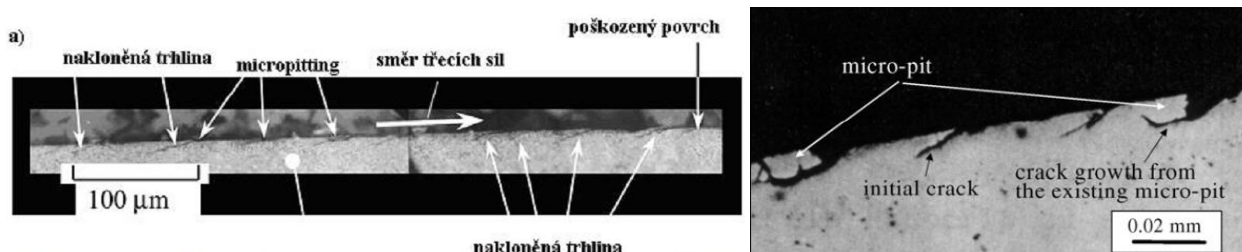
Obr. 6 Vlevo, resp. uprostřed tvar hysterezní smyčky pro pracovní cyklus, kde dochází, resp. nedochází k podchlazení povrchu pracovního válce. Vpravo význam reziduálních napětí na průběh hysterezní smyčky[8].

Rozvíjení trhlin můžeme také ovlivnit reziduálním tlakovým napětím v pracovní vrstvě válce [8]. Dojde ke změně začátku hysterezní smyčky (Obr. 6 vpravo), celkové přetvoření se nezmění, ale trhlinám je znesnadněno šíření.

1.4 KONTAKTNÍ ÚNAVA

Kontaktní únava je mechanismus opotřebení povrchu, při kterém se stýkají dvě nekonformní plochy (styk konvexní a konkávní plochy), který se vyznačuje malou stykovou plochou, díky čemuž vznikne kontaktní tlak do řádu jednotek GPa.

Kontaktní únavové trhliny se dají odlišit od tepelných trhlin především podle směru šíření [15]. Ten je udáván především směrem třecí síly (u kontaktních únavových trhlin). Povrchová vrstva materiálu je strhávána v protisměru třecí síly, tím vzniká mechanismus rozevírání trhlin. Sklon těchto trhlin se pohybuje od 0° až 30° od tečny povrchu. Změny směru třecích sil na povrchu pracovního válce při válcování jsou tedy ku prospěchu věci, jelikož je omezeno jednostranné šíření trhlin.

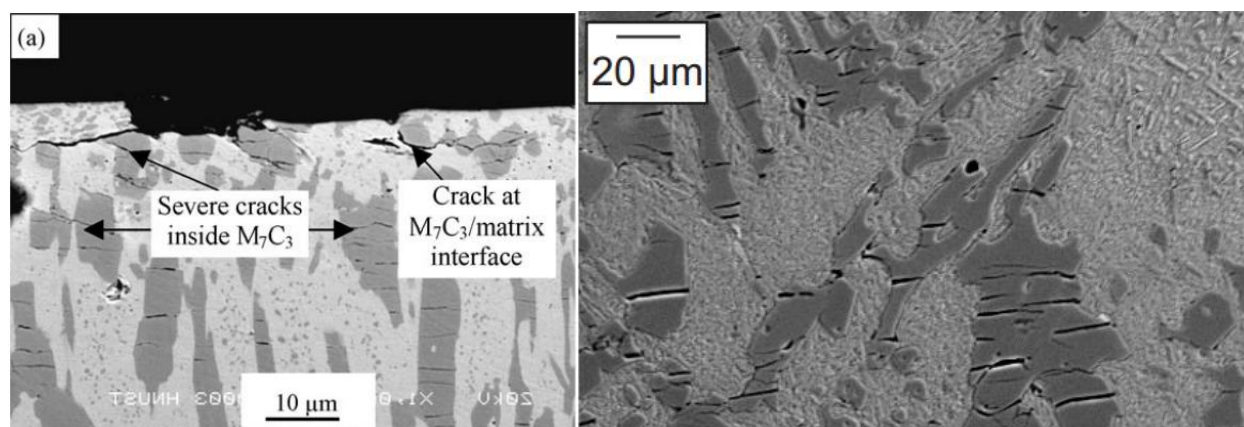


Obr. 7 Znárodnění velikosti a vztahu kontaktní únavových trhlin ke směru třecích sil v bočních řezech [5].

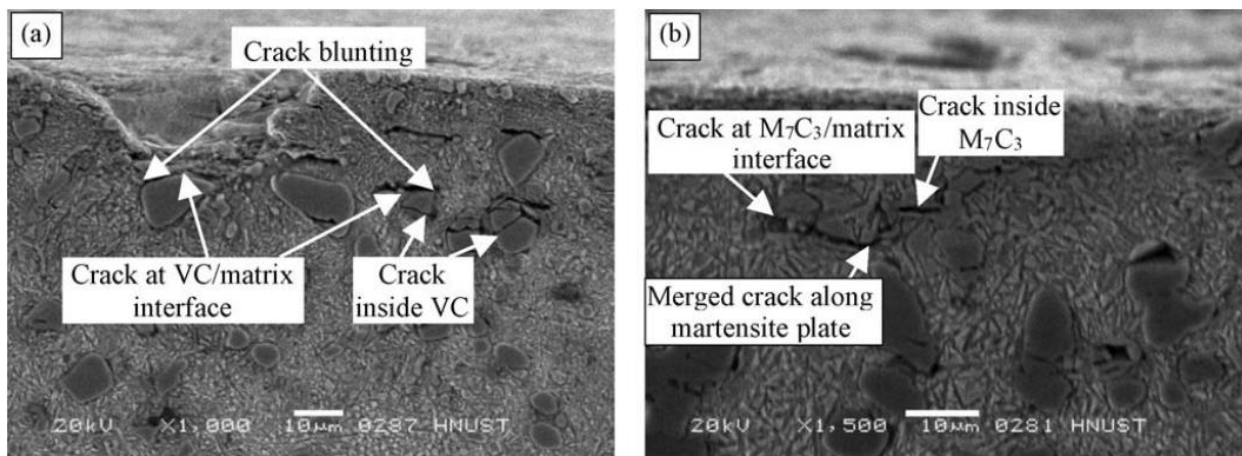
Hlavní příčinou vzniku těchto povrchových vad jsou v drtivé většině nečistoty, které prochází přes kontakt. Nejnebezpečnější jsou tvrdé, ostré úlomky, které se nejčastěji dostávají do kontaktu ze samotných válců (karbidy legur válců). Vzniká, tzn. mikro-pitting (Obr. 7), malé trhliny, ze kterých se rychle rozvíjí makroskopický pitting. Měkčí, tvárnější nečistoty zanechají v kontaktní oblasti plastický vtisk, přičemž dochází k vytlačení materiálu okolo vtisku, obdoba kráteru při dopadu projektilu. Zde poté dochází k tvorbě napěťové špičky, která již Hertzovou teorií popsat nelze. V těchto špičkách dochází k tvorbě již zmíněného mikro-pittingu.

1.5 PARALELNÍ TRHLINY K POVRCHU

Dalším projevem degradačních mechanismů jsou trhliny paralelní k povrchu (viz Obr. 8), které se objevují především v karbidech litin s vysokým obsahem chromu [14]. Jejich směr a pozice neodpovídá únavovým trhlinám ani trhlinám způsobené tepelnou únavou a nelze ji přímo zařadit jako důsledek jednoho z výše zmíněných degradačních mechanismů. Často působí jako koncentrátoři napětí a jsou z nich inicializovány makroskopické podpovrchové trhliny, viz Obr. 9.



Obr. 8 Mikrotrhliny paralelní k povrchu uvnitř síťoví karbidů [14] (vlevo), [16] (vpravo).



Obr. 9 Trhliny uvnitř VC karbidů a na jejich rozhraní s matricí (vlevo), spojení trhlín karbidů do makroskopické trhliny [16].

1.6 DEGRADACE POVRCHŮ V KONTEXTU

Shrňme si poznatky z této kapitoly. Povrch válce je vystaven abrazi při vstupu do válcovací mezery, kde nejvíce trpí rozhraní zrn s karbidy. Povrch je ihned zahříván. Teplotní rozdíl mezi povrchem a jádrem může přesáhnout 500 °C. Dochází k okamžité oxidaci na rozhraní skeletu karbidů. Při ochlazení dochází k plastické deformaci a k rozevírání trhlín, kam může pronikat voda (vodní pára). Zde je později uvězněna díky dalším teplotním výkyvům a oxiduje nejbližší okolí trhliny. Usnadňuje její šíření do hloubky a snižuje odolnost rozhraní vůči abrazi. Na nehomogenním rozhraní se kumuluje smykové napětí při kontaktu, které narušuje povrchovou (ochranou) vrstvu oxidů. To umožňuje její oddělení od základní matrice a obnažení neoxidovaných zrn materiálu pro adhezi při dalším průchodu válcovací mezerou.

Časově závislé děje lze popsat teoriemi creepu a charakterizovat tak šíření trhlín [10], [11]. Vystává však otázka, čím, nebo jak popíšeme situaci při válcování, kdy dochází k periodické změně stavů, tudíž i periodické změně závislosti.

Co máme tedy k dispozici? Známe některé základní mechanismy, jak prostředí a teplota ovlivňují šíření trhlín [10]. Jejich ověření v případě podmínek válcování nebylo zatím věrohodně podloženo, na druhou stranu ani nebylo vyvráceno. Obecně se má za to, že výše zmíněné předpoklady platí, pouze kvantifikace těchto jevů je stále otevřenou otázkou. Taktéž zatím nebylo publikováno, zda v podmínkách válcování neexistují ještě jiné mechanismy, než výše zmíněné. Pokusy o popis rychlosti šíření trhlín pomocí strain přístupu nevykazovaly dostatečnou korelaci [11]. Lepších výsledků se dosáhlo při použití faktoru intenzity napětí [11]. Jsou k dispozici modely pro odhad životnosti, které však nebyly zkoumány přímo v podmínkách válcování. Na kolik se ukáže jejich účinnost a zdali nebude potřeba vyvinout nové, ukáže až další výzkum.

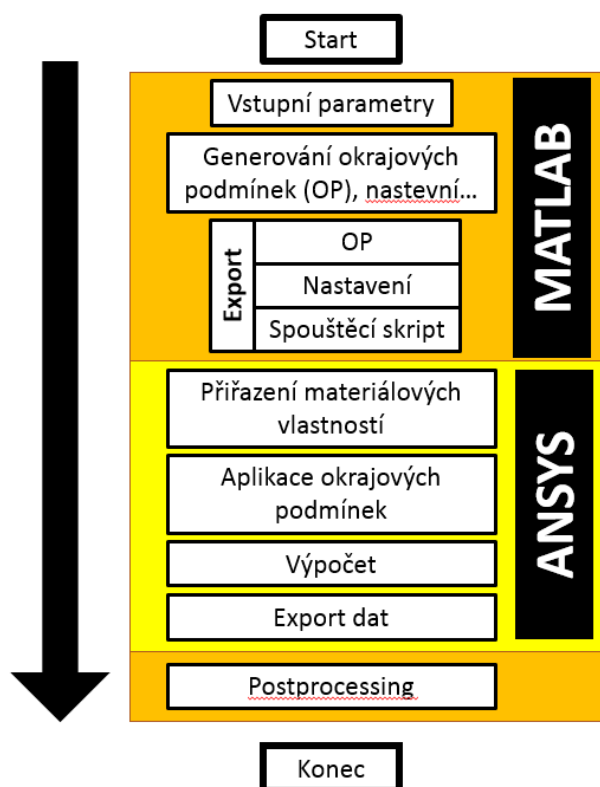
Vidíme, že problematika degradace povrchů pracovních válců přesahuje pole jedné vědní disciplíny. Výše zmíněné degradační mechanismy působí společně a vzájemně se silně ovlivňují. Determinovat jasný vliv jednoho či druhého mechanismu je obtížné a za současného stavu poznání patrně nerealizovatelné.

Ideální stav degradace povrchu válce by, za současného stavu poznání, znamenal optimalizaci faktorů válcování do té míry, kdy by pracovní válce netrpěly tepelnou ani kontaktní únavou, oxidace by byla minimální a spolu s abrazí by způsobovala pomalé, kontrolovatelné opotřebení povrchů, které by postupně eliminovalo všechny zárodky trhlín, koncentrátoři napětí a materiálové nehomogenity.

2 NUMERICKÝ MODEL PRO VÝPOČET STAVU NAPĚTÍ PRACOVNÍHO VÁLCE

Jedním z hlavních cílů této práce, je vyvinout nový nástroj – numerický model pro studium stavu napětí v povrchové vrstvě pracovního válce. Tento model musí být univerzální, schopen simulovat různou geometrii válce, pořadí na válcovací trati, různou konfiguraci chlazení, havarijní stavy atd.

Pro tento úkol byl vybrán systémy ANSYS a jeho programové prostředí APDL (ANSYS Parametric Design Language), dále pak systém MATLAB. Prostředí APDL umožňuje zpracovat parametrický model geometrie válce, řídit externě vstupní okrajové podmínky, zhotovit výstup pro další zpracování. Pro jednoduchou změnu geometrie modelu nebo změnu okrajových podmínek není třeba mít hlubší znalosti APDL, stačí změna pomocí ovládacího rozhraní. Systém MATLAB ovládá výpočet, tvoří okrajové podmínky a zpracovává výstupní data.



Obr. 10 Algoritmus výpočtu jedné konfigurace v makrosférickém modelu.

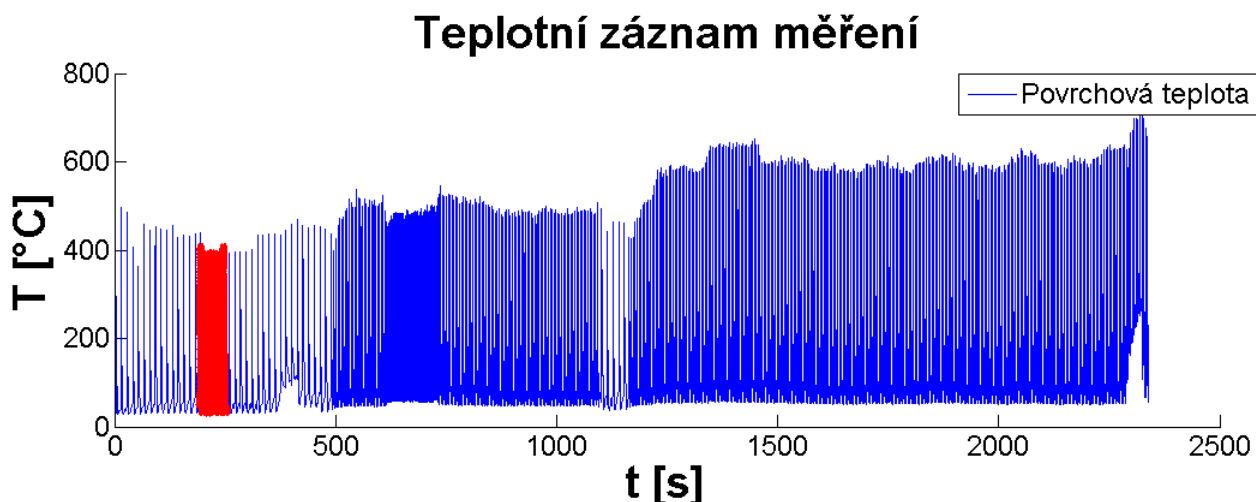
3 PŘÍPADOVÁ STUDIE – PODÍL ZATĚŽUJÍCÍCH ČINITELŮ

V této studii jsou identifikovány podíly vnějších vlivů na stav napětí v povrchové vrstvě pracovního válce. Simulační plán analýz je vystavěn tak, že vnější činitele se přidávají postupně. První simulace zahrnuje pouze tepelné namáhání, dále je přidáno normálové zatížení vznikající ve válcovací mezeře, dále smykové zatížení a kontakt s opěrným válcem.

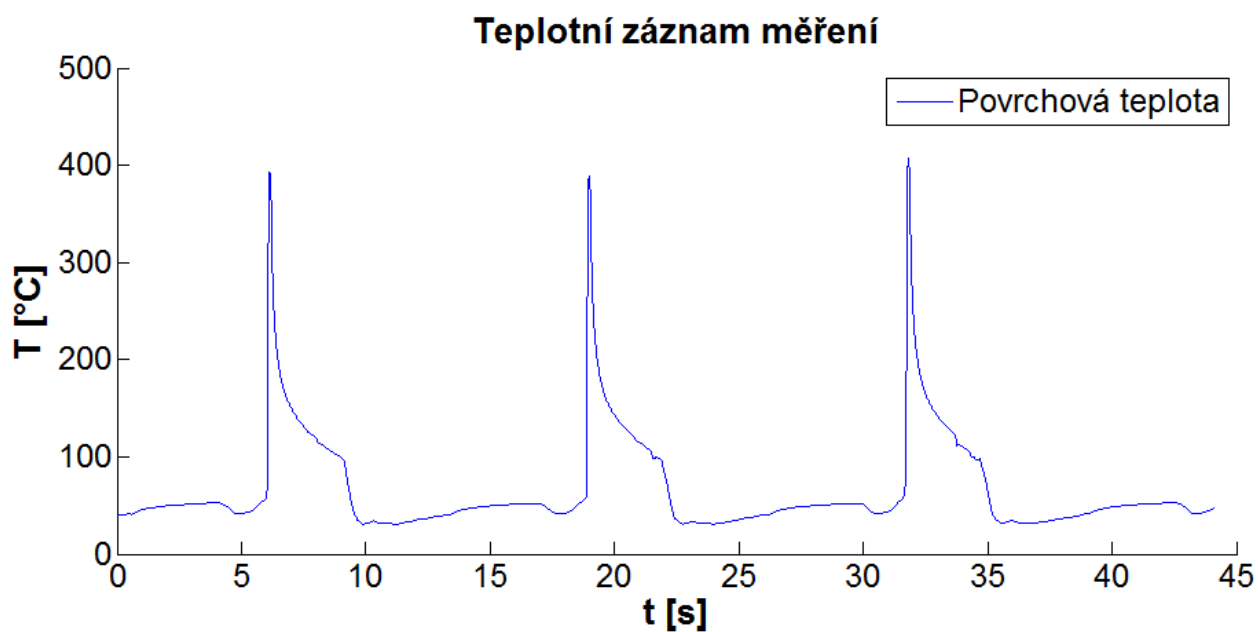
3.1.1 Experimentální okrajová podmínka – Teplotní namáhání

K teplotnímu namáhání, tj. předepsaný průběh povrchové je využito experimentálního měření ze společného projektu Laboratoře přenosu tepla a proudění a belgického výzkumného centra CRM. Toto měření proběhlo v roce 2009 a bylo primárně určeno k výzkumu chlazení. Teplotní záznam, viz Obr. 11, byl

vyhotoven pomocí podpovrchového senzoru zabudovaného přímo ve válci. Teplota povrchu byla dopočtena pomocí inverzní úlohy.



Obr. 11 Záznam teploty z celého měření [17]. Červeně je naznačena oblast, která slouží jako okrajová podmínka pro teplotní analýzu, viz následující obrázek detailního průběhu.



Obr. 12 Detailní pohled na záznam teploty, která byla použita jako okrajová podmínka. Originální čas měření je posunut k nule.

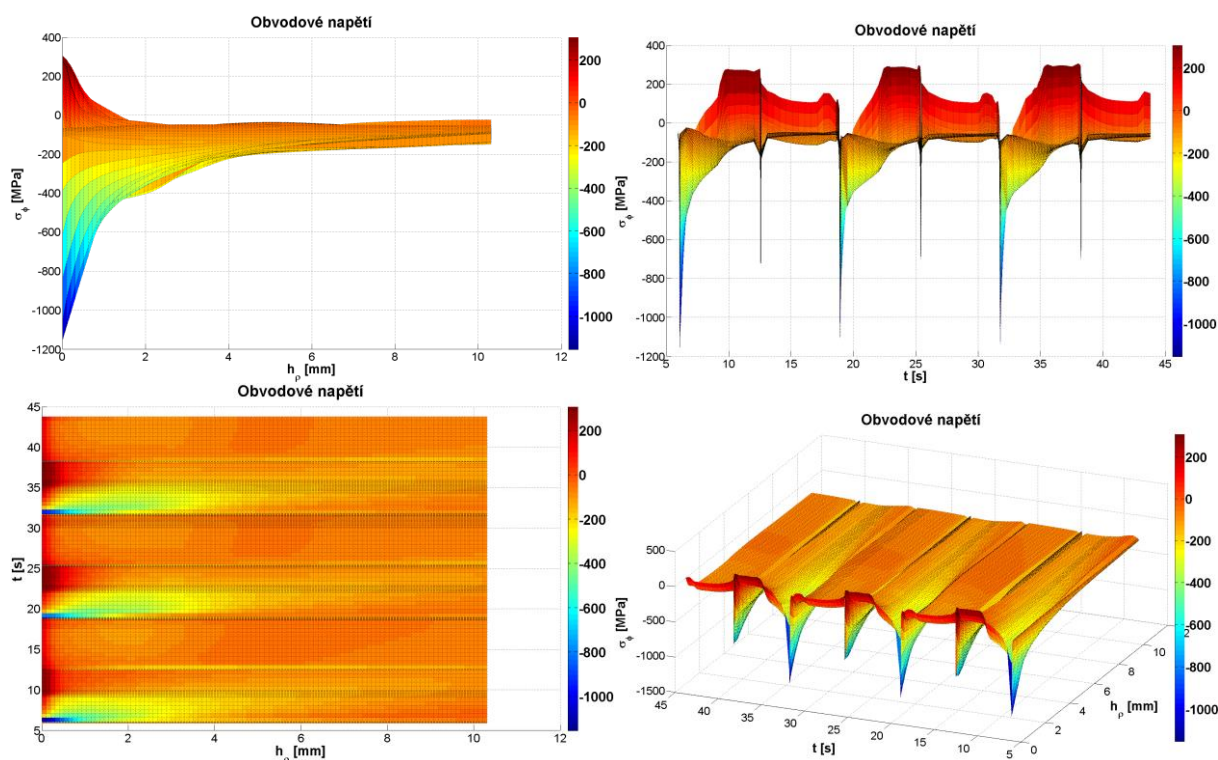
3.2 VÝSLEDKY

V této studii je hodnocen podíl jednotlivých zatěžujících činitelů z hlediska celkového stavu napětí. Celkově byly simulovány 3 otáčky pracovního válce, viz Obr. 12. Do 2D grafů jsou vynášeny závislosti 2 bodů - povrchového a v hloubce 0,5 mm. Pro vyhodnocení jsou využity dvě hlavní metody – klasické hysterezní smyčky, kde je vynesena závislost napětí σ na celkovém přetvoření ε_{celk} a dále pak 3D grafy obvodového napětí, celkového a plastického přetvoření jako závislosti času t na vzdálenosti od povrchu h_p . Jejich cílem je zachycení cyklického chování v průběhu několika otáček pracovního válce, penetrace napětí, popř. přetvoření do hloubky a celková názornost výsledků.

3.2.1 Obvodové napětí

Toto napětí určuje intenzitu tvorby a šíření trhlin v povrchu pracovního válce, viz Obr. 5. Opět můžeme vidět charakteristické špičky napětí způsobené střídavě teplotním zatížením a kontaktem s opěrným válcem, viz Obr. 13 vpravo nahoře. Penetrace tohoto napětí lze označit jako středně vysoké (Obr. 13 vlevo dole i nahoře), přičemž důležitá je kladná (tahová) oblast na Obr. 13 vpravo nahoře. Ta určuje maximální tahové obvodové napětí, které rozevívá vznikající trhliny, viz Obr. 24.

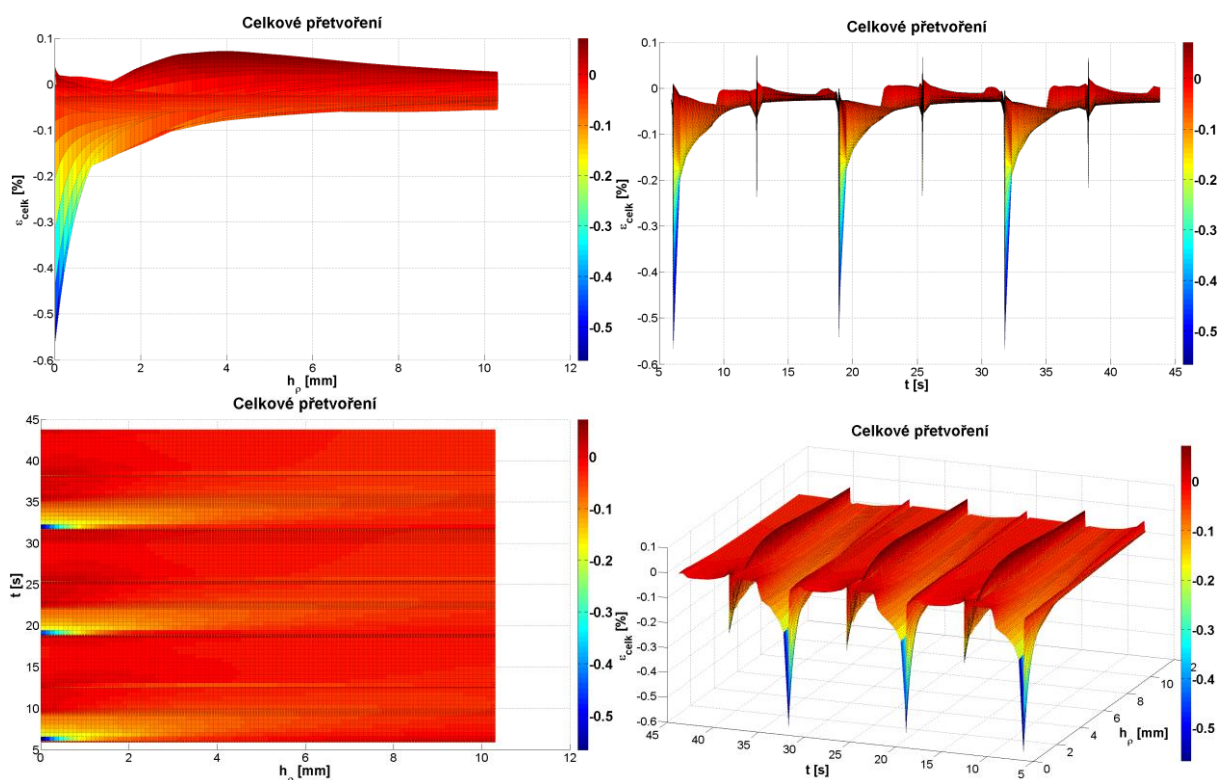
Z grafů lze také vyčíst účinky chladících zón v podobě zvýšení tahových napětí, jak před kontaktem s opěrným válcem (chlazení na výstupu), tak před vstupem do válcovací mezery (chlazení na vstupu).



Obr. 13 Obvodové napětí (ve směru osy φ) v průběhu 3 otáček.

3.2.2 Celkové obvodové přetvoření

Tyto grafy ilustrují celkové přetvoření v obvodovém směru, které se v povrchu pracovního válce vytvoří. Maximální přetvoření je způsobené teplotním namáháním (Obr. 14 vlevo a vpravo nahoře). Má však nízkou penetraci (Obr. 14 vlevo dole a nahoře). Naopak přetvoření způsobené kontaktem s opěrným válcem má vysokou penetraci a zároveň je částečně kladné, což je patrné pouze z Obr. 14 vlevo nahoře.



Obr. 14 Celkové přetvoření v obvodovém směru v průběhu 3 otáček jako funkce času a vzdálenosti od povrchu.

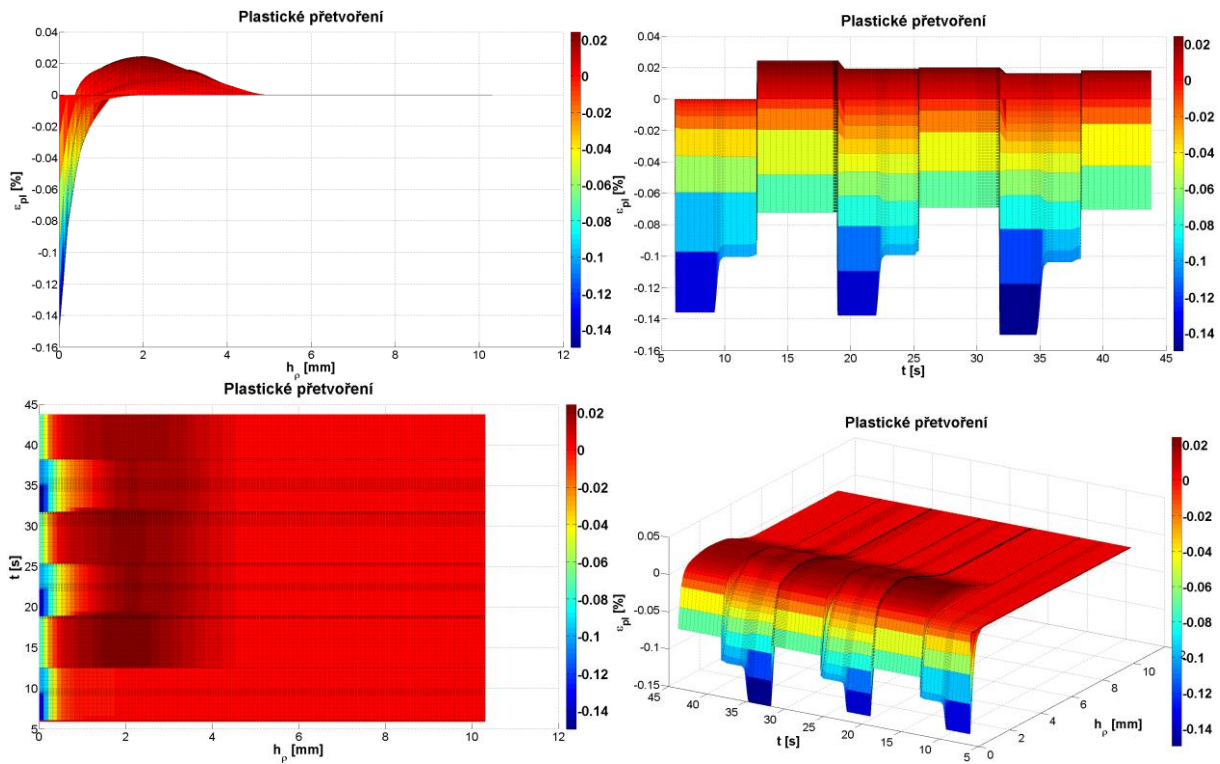
3.2.3 Plastické obvodové přetvoření

Následující grafy ilustrují tvorbu plastického přetvoření v povrchové vrstvě pracovního válce v obvodovém směru. V průběhu pracovní otáčky pracovního válce dochází ke skokovému vzniku¹ plastického přetvoření. Jeho hodnota zůstává konstantní, dokud povrch pracovního válce nevstoupí do chladicí sekce, kde nastává první pokles vlivem podchlazení povrchu. Další snížení nastává po kontaktu s opěrným válcem. Tento cyklus se posléze periodicky opakuje, viz Obr. 15 vpravo nahoře. Nominální hodnota vzniklého plastického přetvoření odpovídá maximální nominální hodnotě hlavního zatěžujícího činitele – nehomogenního teplotního pole. Pokud se maximální teplota s přibývajícím počtem otáček v simulaci nezvyšuje, plastické přetvoření se pohybuje v uzavřeném cyklu.

Maximálních (záporných) hodnot dosahuje po průchodu válcovací mezerou, penetrace napětí je však nízká, Obr. 15 vlevo nahoře. Na stejném pohledu je vidět i charakter plastického přetvoření, které je způsobeno kontaktem s opěrným válcem. To je kladné, na rozdíl od přetvoření způsobené teplotním zatížením, které je pouze záporné.

Kontakt s opěrným válcem snižuje nominální zápornou hodnotu plastického přetvoření. V hloubce několika desetin milimetru zcela převládá plastické přetvoření způsobené kontaktem, viz Obr. 15 vlevo nahoře a vpravo dole.

¹ Z podstaty definice použitého materiálového modelu a implementace plastického přetvoření v systému ANSYS.

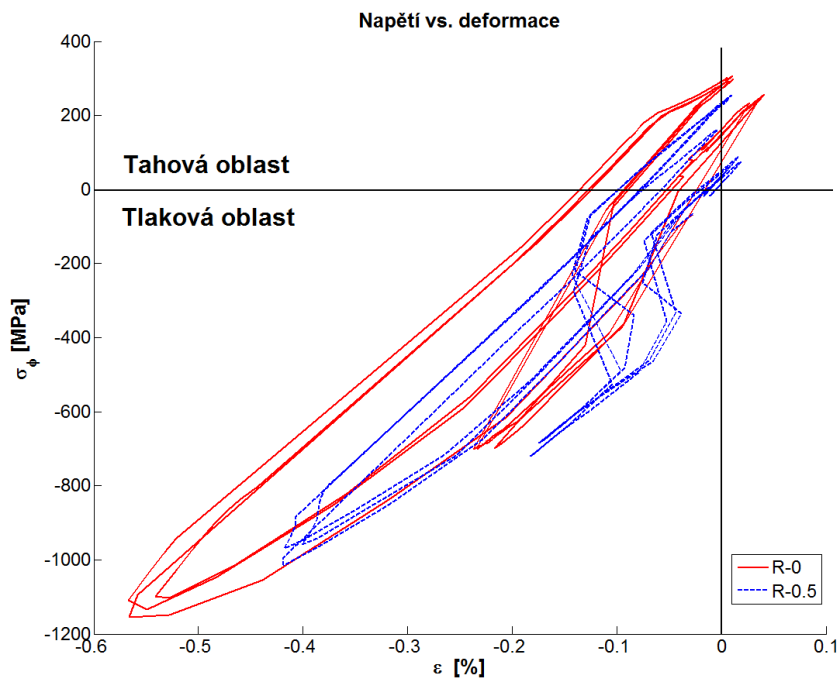


Obr. 15 Plastické přetvoření v obvodovém směru jako funkce času a vzdálenosti od povrchu.

3.2.4 Hysterezní smyčka napětí vs. Deformace

Průběh hysterezní smyčky po aplikaci kontaktu s opěrným válcem se zcela odlišuje od ostatních hysterezních smyček, které byly prezentovány v předchozích kapitolách. Hysterezní smyčka obsahuje další smyčku, která je způsobena kontaktem s opěrným válcem a která posouvá průběh napjatostně-deformační křivky do I. kvadrantu, kde je nejvyšší potenciál pro šíření trhlin – je zde kladné přetvoření i napětí.

Pokud se podíváme na hysterezní smyčku v hloubce 0,5 mm (Obr. 16 modře), vidíme, že průběh smyčky je značně zkreslen sítí a časovým krokem. I zde však je vidět přesah do I. kvadrantu.



Obr. 16

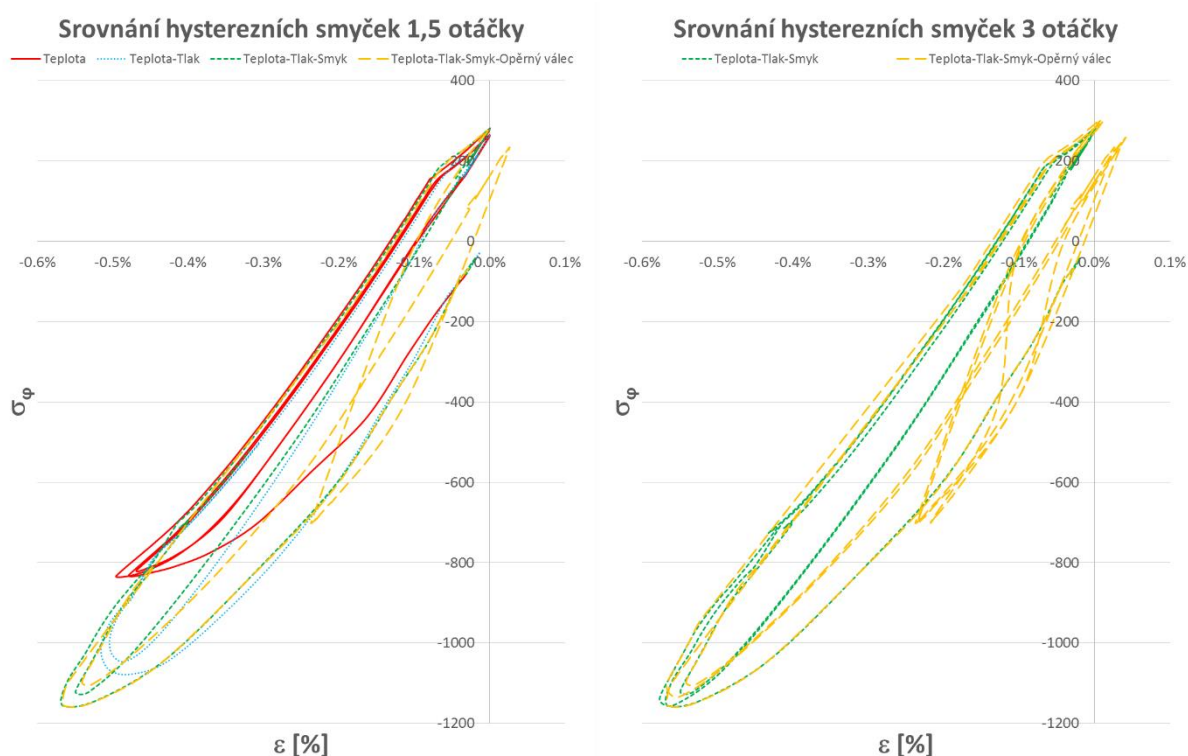
Obr. 16 Průběh hysterezní smyček obvodové napětí vs. deformace pro 3 otáčky pracovního válce, kde je uvažováno tepelné, normálové a smykové zatížení pro 2 body – povrchový bod a ve vzdálenosti 0,5 mm od povrchu.

3.2.5 Celkové srovnání zatěžujících stavů

Zde je uvedeno celkové srovnání stavu napětí pracovního válce všech dosud prezentovaných hysterezních smyček. Zatímco průběh v tlakové oblasti se liší podle simulace, a to především okolo maximálního tlakového napětí, průběh v tahové oblasti se prakticky neliší.

Vidíme, že dle očekávání největší změny probíhají u poslední konfigurace, která v sobě zahrnuje i kontakt s opěrným válcem. Oproti ostatním hysterezním smyčkám, obsahuje viditelnou změnu chování. Povrch je vystaven dvěma tahově-tlakovým cyklům během jedné otáčky válce. Plastické přetvoření je díky kontaktu posunuto do kladných hodnot, viz Obr. 15, což vyvolává opačný průběh druhého cyklu – proti směru hodinových ručiček.

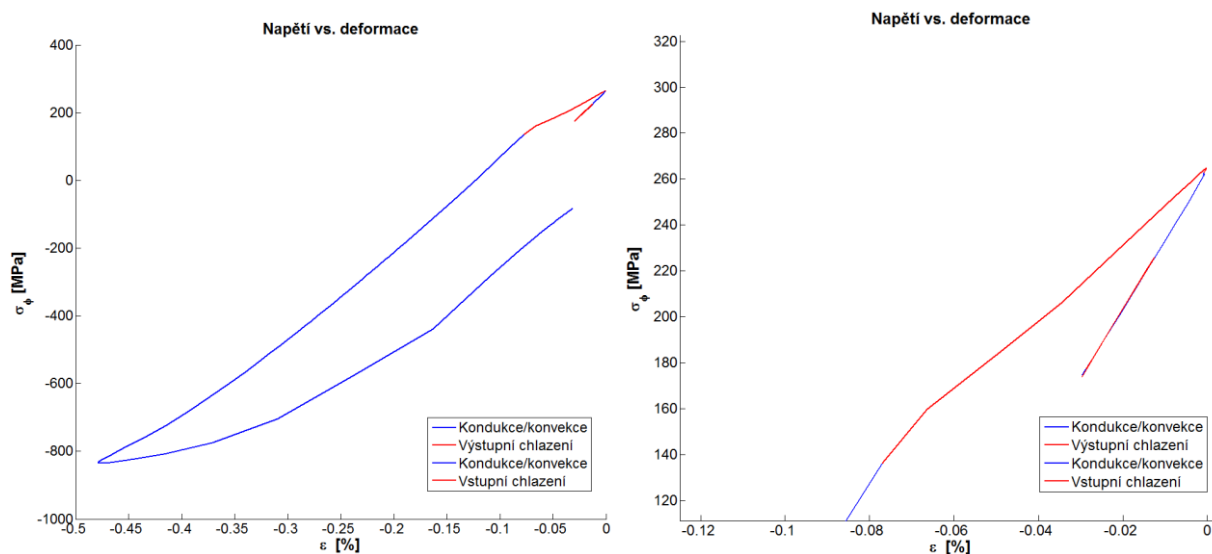
První otáčka konfigurace Teplota-Tlak-Smyk a Teplota-Tlak-Smyk-Opěrný válec se od sebe neliší do chvíle kontaktu s opěrným válcem. Na simulovaných třech otáčkách (Obr. 17 vpravo) vidíme, že kontakt nepůsobí progresivně na vývoj napětí a tyto dvě analýzy se od sebe příliš neliší. Místy je chyba způsobena vyšším časovým krokem u analýzy s kontaktem, který byl volen s ohledem na dostupnou výpočetní kapacitu.



Obr. 17 Srovnání hysterezních smyček průběhu obvodového napětí na celkovém přetvoření pro různé druhy namáhání pro 1,5 otáčky, resp. 3 otáčky pro všechny analýzy, resp. dvě nejkompaktnější analýzy vlevo, resp. vpravo. Povrch pracovního válce je při zahrnutí kontaktu vystaven dvojímu tahově-tlakovému cyklu během jedné otáčky.

Pro doplnění si uveďme efekty chlazení na vstupní, resp. výstupní straně válcovací mezery na celkový průběh hysterezní smyčky. Při pohledu na celou křivku můžeme vidět efekt chlazení na výstupní straně v tahové oblasti, kde dochází ke změně průběhu hysterezní smyčky, viz Obr. 18. Chlazení vyvolá podchlazení povrchové vrstvy vůči zbylému objemu válce, což vede ke smrštění, které se projeví v poklesu celkového

přetvoření. Efekt chlazení na vstupní straně, který najdeme taktéž v tahové oblasti, je prakticky nepozorovatelný a faktický dopad má spíše na maximální teplotě při kontaktu s válcem, kdy je dosaženo menších teplot a tudíž i menšího namáhání.



Obr. 18 Efekt vstupního, resp. výstupního chlazení na průběh hysterezní smyčky obvodového napětí. Efekt chlazení na výstupu je znatelný, avšak efekt výstupního chlazení je prakticky nulový. Změny probíhají pouze v lineární oblasti.

3.3 ROZBOR VÝSLEDKŮ

Srovnávací grafy na Obr. 17 ukazují podíl jednotlivých zatížení na stavu napětí v obvodovém směru. Popišme si první otáčku. V okamžiku maximálního zatížení, tj. průchodu válcovací mezerou se křivky odlišují, jelikož oblast působení normálových a smykových zatížení je omezena na tuto oblast. V tahové části křivky je vidět změna směrnice, kdy je záporné přetvoření téměř anulováno. Toto je účinek chlazení na výstupní straně pracovního válce. V tomto průběhu se křivky neliší, jelikož chování stavu napětí je ovlivňováno pouze teplotou, která je pro všechny případy stejná.

Vliv jednotlivých zatížení můžeme zjistit, pokud porovnáme nominální hodnoty obvodového zatížení ve stejný časový okamžik, kdy je sledovaný bod ve válcovací mezeře. Výsledky ukazují, že dominantní zatížení v obvodovém směru vzniká tepelným namáháním, které je odpovědné za 72 % nominálního napětí. Normálové zatížení je odpovědné za 21 % nominálního obvodového napětí. Smykové zatížení je odpovědné za 7 % zatížení. Smykové napětí ve válcovací mezeře je limitováno maximálním smykovým odporem materiálu, který je válcován, při kterém by neprobíhala plastizace v povrchové vrstvě vývalku. Při válcování za tepla je tento odpor malý, běžně v řádu desítek MPa.

Naopak výrazně se projeví kontakt s opěrným válcem, což se dá předpokládat při jeho maximální předepsané hodnotě, která je rovna 903 MPa.

4 PŘÍPADOVÉ STUDIE – HAVARIJNÍ STAV

V praxi může nastat situace, kdy dojde k vypnutí či havárii chlazení. Důvody mohou být nedbalost obsluhy válcovací stolice, problémy s filtrací vody či technická závada. Tento případ nenastává často, z pohledu degradace povrchu pracovního válce je však nad míru zajímavý.

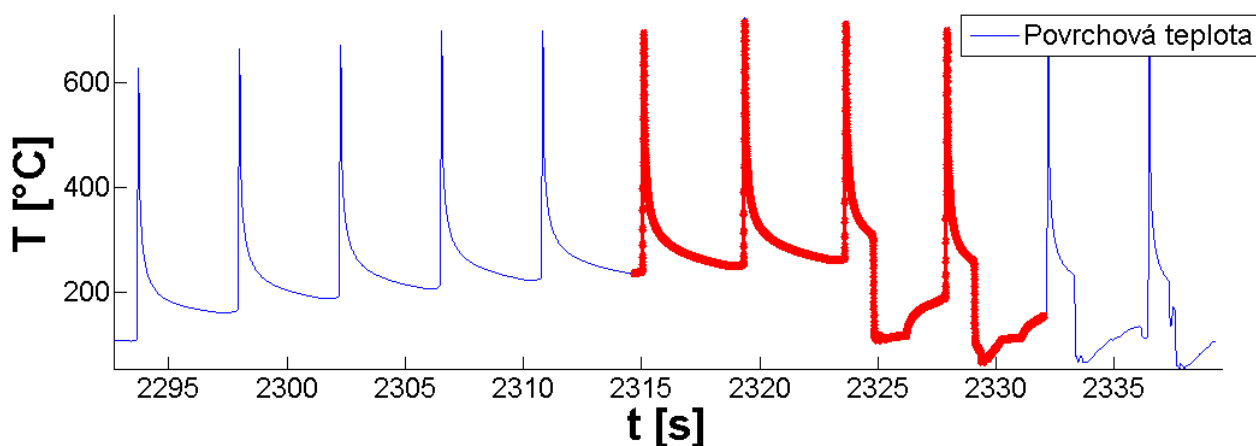
V této kapitole bude zkoumán stav napětí ve speciálním případě – tepelného šoku při havárii chlazení. Naměřená data (viz [17]) z belgického CRM ukazují, že výpadek chlazení není pro pracovní válec přímo

„smrtící“. Dochází pouze ke krátkodobému přehřívání válce. Problém však může vyvstat ve chvíli, kdy obsluha zapne chlazení. Povrchová vrstva pracovního válce vystavená zvýšenému tepelnému šoku může způsobit masivní trhliny v celé pracovní vrstvě válce (spalling), čímž je válec nenávratně zničen.

4.1.1 Experimentální okrajové podmínka – Teplotní zatížení

Teplotní zatížení je dáno záznamem podpovrchové teploty pracovního válce a vychází ze stejného experimentálního měření popsaného v kapitole 3.1.1, viz Obr. 19. Aplikovaný teplotní záznam odpovídá situaci, kdy je chladicí systém odstaven a posléze opět spuštěn. Teplota povrchu válce je zvýšena vysoko nad běžnou pracovní teplotu a povrch je poté vystaven teplotnímu šoku při opětovném spuštění chlazení.

Teplotní záznam měření



Obr. 19 Záznam experimentálního měření, která byla aplikována jako okrajová podmínka v teplotní analýze. Teplota byla opět měřena podpovrchovým senzorem a dopočtena inverzní úlohou. Červeně je vyznačena část, která byla podrobena i teplotní analýze.

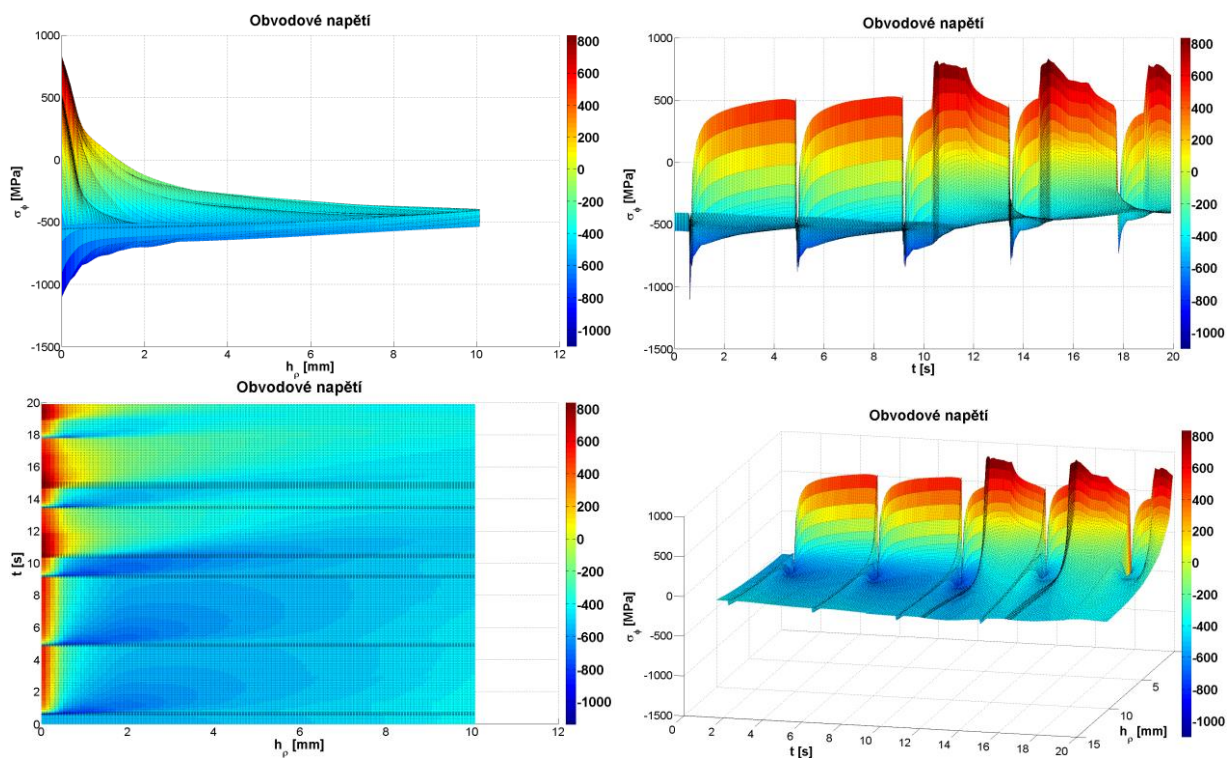
4.2 VÝSLEDKY

Výsledky z druhé případové studie jsou prezentovány identicky jako v případě první případové studie – pomocí 3D grafů obvodového napětí, celkového a plastického přetvoření jako závislosti času t na vzdálenosti od povrchu h_p , dále pak klasické hysterezní smyčky, kde je vynesena závislost napětí σ na celkovém přetvoření ε_{celk}

4.2.1 Obvodové napětí

Na tomto napětí můžeme vidět kontrast mezi otáčkami s chlazením, resp. bez chlazení, viz Obr. 13 a Obr. 20 vpravo nahoře. Obvodové napětí opět přesně kopíruje průběh teploty. Při spuštění chlazení se objevuje skokové zvýšení napětí o více než 200 MPa.

O penetraci napětí po aplikaci chlazení lze opět tvrdit, že je středně vysoká, viz Obr. 20 vlevo nahoře. Pokud srovnáme maximální hodnoty napětí v běžném provozním a havarijním stavu, napětí při havarijním stavu je 2,5krát vyšší.

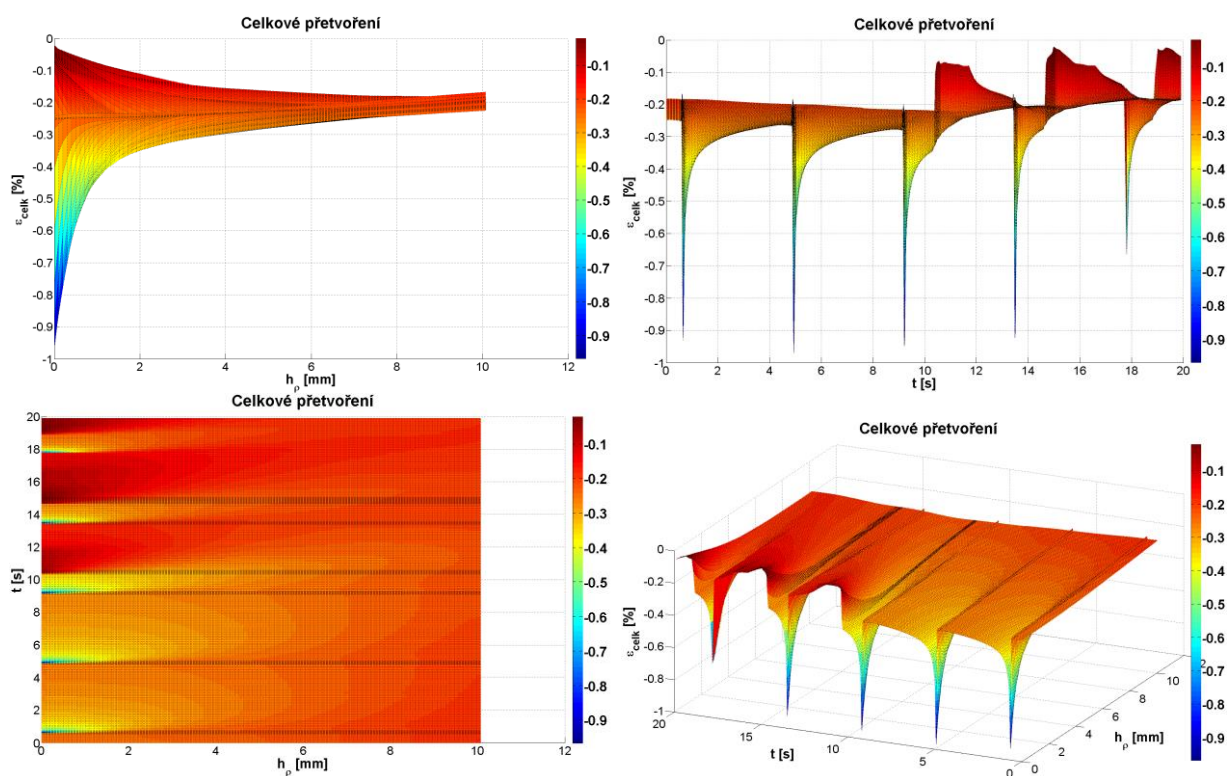


Obr. 20 Obvodové napětí (ve směru osy φ) v průběhu 5 otáček.

4.2.2 Celkové obvodové přetvoření

Na celkovém obvodovém přetvoření je taktéž velice patrný rozdíl mezi otáčkami s funkčním, resp. nefunkčním chlazením, viz Obr. 21 vpravo nahoře a dole. Aplikace chlazení vede ke skokové změně celkového přetvoření a vede k narušení hladkého průběhu, který opět přesně kopíruje teplotní kolísání.

Penetrace přetvoření zůstává zachována jako v běžném provozním stavu, viz Obr. 14 a Obr. 21 vlevo dole. Maximální hodnota celkového obvodového přetvoření je 2krát vyšší než při běžném provozním stavu.

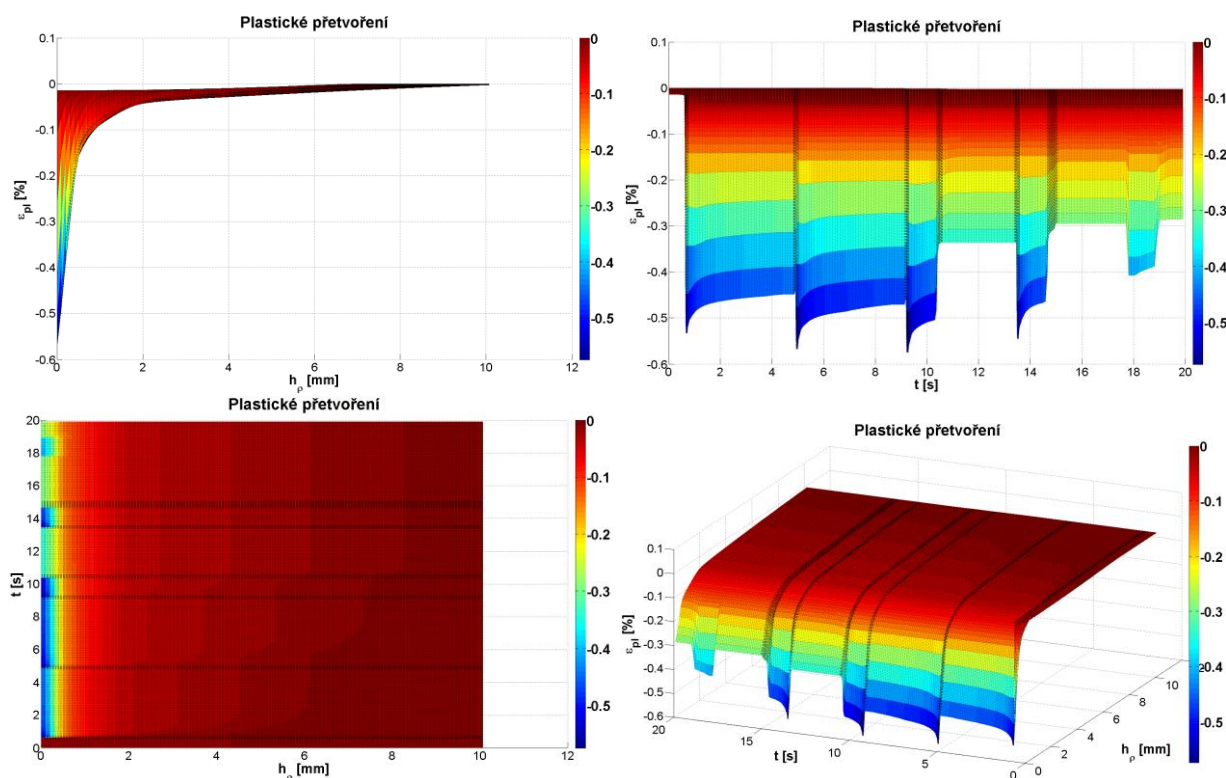


Obr. 21 Celkové obvodové přetvoření v průběhu 5 otáček jako funkce času a vzdálenosti od povrchu.

4.2.3 Plastické obvodové přetvoření

Při porovnání časového průběhu plastického obvodového přetvoření (Obr. 15 a Obr. 22 vpravo nahoře), vidíme zcela odlišné chování obou stavů. V obou případech je teplota hlavní zatěžující činitel, u havarijního stavu však dochází k vyššímu přehřátí povrchu a jeho samotné ochlazení díky vedení tepla do jádra válce je dostatečné ke snížení plastického přetvoření.

Po aplikaci chlazení můžeme vidět pokles hodnot plastického přetvoření, které je způsobeno podchlazením povrchové vrstvy vůči objemu materiálu, který je hlouběji v pracovní vrstvě a má vyšší teplotu, což vyvodí vznik tahových napětí a plastizace v opačném směru.

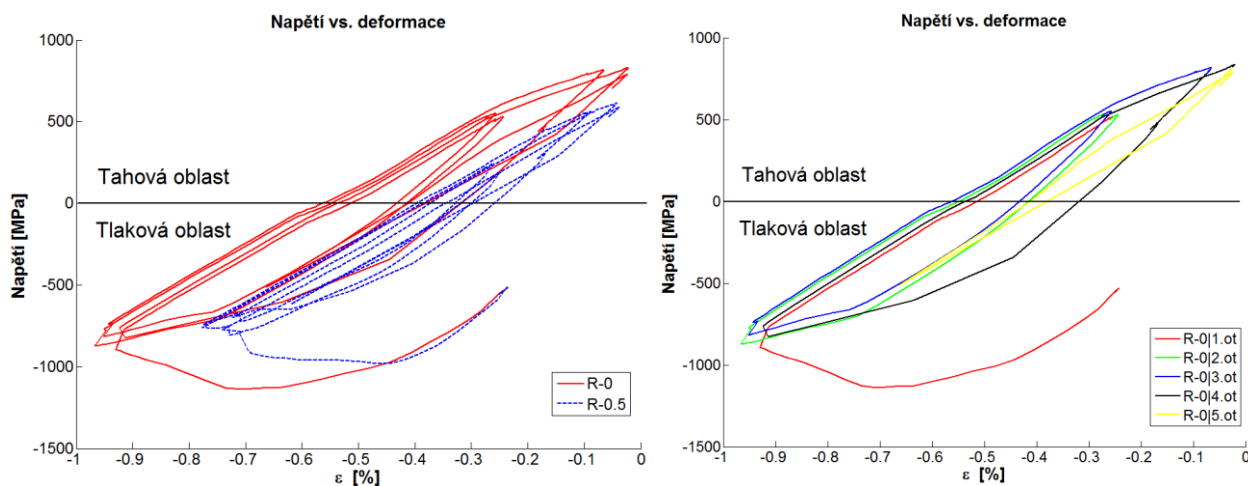


Obr. 22 Plastické přetvoření v obvodovém směru jako funkce času a vzdálenosti od povrchu.

4.2.4 Napjatostně-deformační křivka

Hysterezní smyčka havarijního stavu se vyznačuje masivní plastizací při první otáčce a odlišným průběhem v tahové oblasti, který je způsoben aplikací chlazení. Pokud bychom ho nezahrnuli, smyčka by se podobala všem ostatním, tj. vzniklo by zhuštění smyček, pouze by nominální hodnoty napětí a deformace byly několika násobně vyšší.

Při aplikaci chlazení narůstá tahové napětí kvůli podchlazení povrchu. Velice patrné je to na Obr. 23 vlevo, kde jsou jednotlivé otáčky odlišeny od sebe a je vidět rozdíl v tahové oblasti.

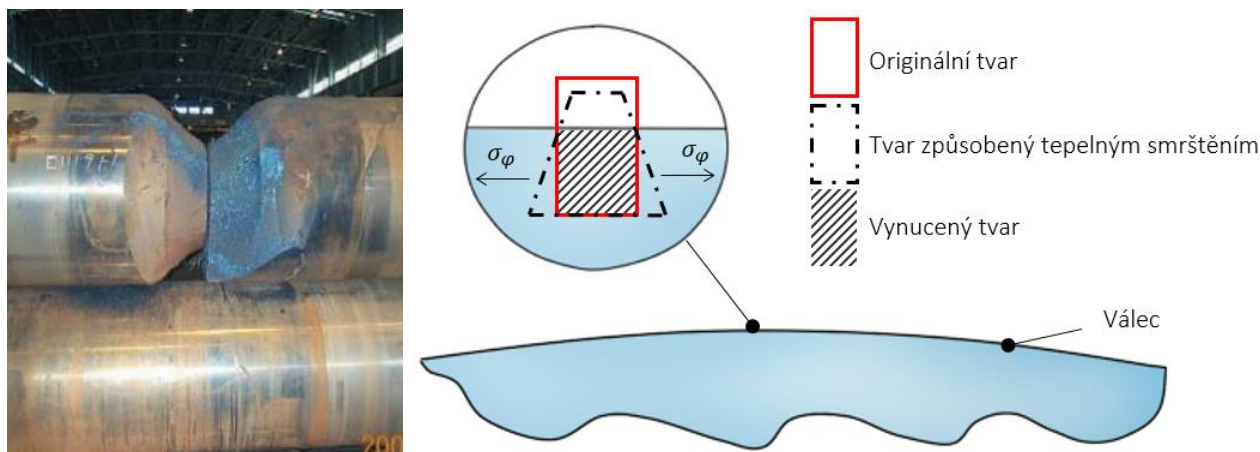


Obr. 23 Vlevo – hysterezní smyčky napětí vs. deformace pro 5 otáček pracovního válce a 2 body – povrchový bod a bod ve vzdálenosti 0,5 mm od povrchu. Vpravo – hysterezní smyčky napětí vs. deformace pro 5 otáček pracovního válce. Zde jsou jednotlivé otáčky odlišeny barevně. Otáčky pracovního válce bez chlazení – červená a zelená, otáčky s chlazením – modrá, černá a žlutá.

4.3 ROZBOR VÝSLEDKŮ

Pokud srovnáme první a druhou studii, na první pohled uvidíme rozdíly v hysterezních smyčkách způsobené masivní plastizací. Ta proniká hlouběji do povrchu (v řádu jednotek milimetrů). Při spuštění chlazení můžeme pozorovat zvýšení tahových napětí, blížících se k hodnotě 1 GPa. Tyto výsledky názorně ilustrují příčiny roztržení pracovního válce a vznik masivního spallingu.

Vlivem nekorigovaného tepelného toku do válce se zvyšuje teplota pracovní vrstvy daleko nad běžný pracovní rozsah. Teplu je umožněno prostoupit hlouběji do pracovní vrstvy. Vzniká trojosá napjatost, kde v obvodovém směru vzniká tlakové napětí přesahující 1 GPa. Pracovní vrstva tak tlačí na jádro válce, ve kterém je vynuceno tahové napětí. Při překročení meze pevnosti jádra může dojít k fatální destrukci pracovního válce.



Obr. 24 Vlevo – roztržení jádra pracovního válce. Vpravo – náčrt tahových napětí v tečném směru, která jsou způsobena tepelným namáháním povrchové vrstvy.

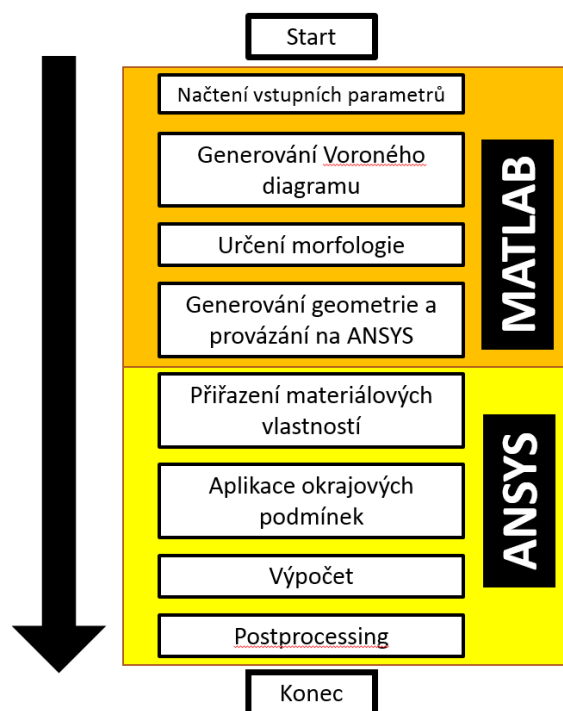
Při spuštění chladicího systému dochází k podchlazení povrchové vrstvy vůči jejímu zbytku, které je nadále přehřáto na vysokou teplotu. V povrchové vrstvě vzniká tahové napětí blížíící se hodnotě 1 GPa. Vzniká gradient napětí v řádu přesahující stovky MPa na několika milimetrech hloubky pracovní vrstvy.

Prevence proti těmto haváriím je jasná. Kontrolní systém chlazení, který včas odhalí závadu chlazení a nedovolí tak masivnímu přehřátí válce. Pokud už tato situace nastane, zvolit jemné chlazení, které nevystaví válec teplotnímu šoku. Bezpečnější způsob je nechat válec dochlazit přirozeně.

5 NUMERICKÝ MODEL MIKROSTRUKTURY PRACOVNÍ VRSTVY

V této kapitole je popsán návrh mikrosférického modelu pro studium stavu napětí mikrostruktury materiálu. Je založen na Voroného diagramu, jenž je nástrojem na dekompozici metrického prostoru. Model je navržen jako rovinný a je uvažována rovinná deformace.

Pro tento úkol byly opět vybrány systémy MATLAB a ANSYS. Systém MATLAB má implementovány funkce pro tvorbu Voroného diagramů, které jsou výpočetně velice nenáročné a Voroného dekompozice roviny dobře odpovídá mikrostruktuře zrn oceli. Model byl otestován při simulaci případových studií několika mikrostruktur, kdy je studována povrchová vrstva pracovního válce o tloušťce 200 μm .



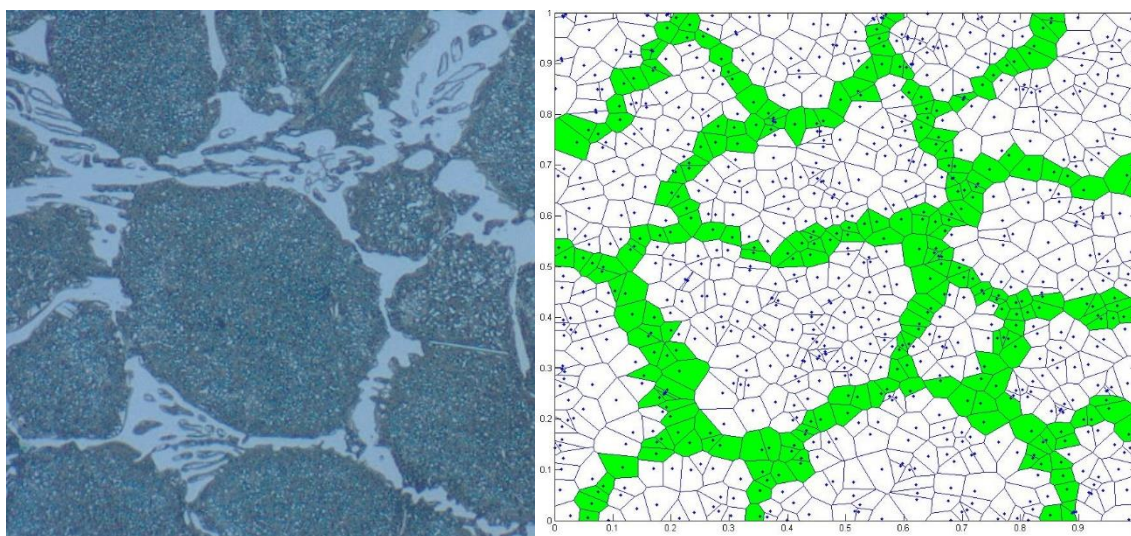
Obr. 25 Algoritmus výpočtu stavu napětí v mikrostruktuře oceli.

6 PŘÍPADOVÉ STUDIE

Pro demonstraci modelu, navrženém v této kapitole, jsou zde prezentovány dvě případové studie. První, resp. druhá popisuje chování mikrostruktury charakteristické pro ocel, resp. litinu s vysokým obsahem chromu. Srovnání generované mikrostruktury s reálnou jsou uvedeny níže. Tyto studie jsou pouze demonstrační, nestudují reálný případ, pouze se zakládají na reálných strukturách a experimentálních datech z kapitoly 3.1.1. Obsahují kombinovaný model – martenzitu a Cr_7C_3 karbidu.

6.1.1 Vygenerovaná mikrostruktura oceli s vysokým obsahem chromu

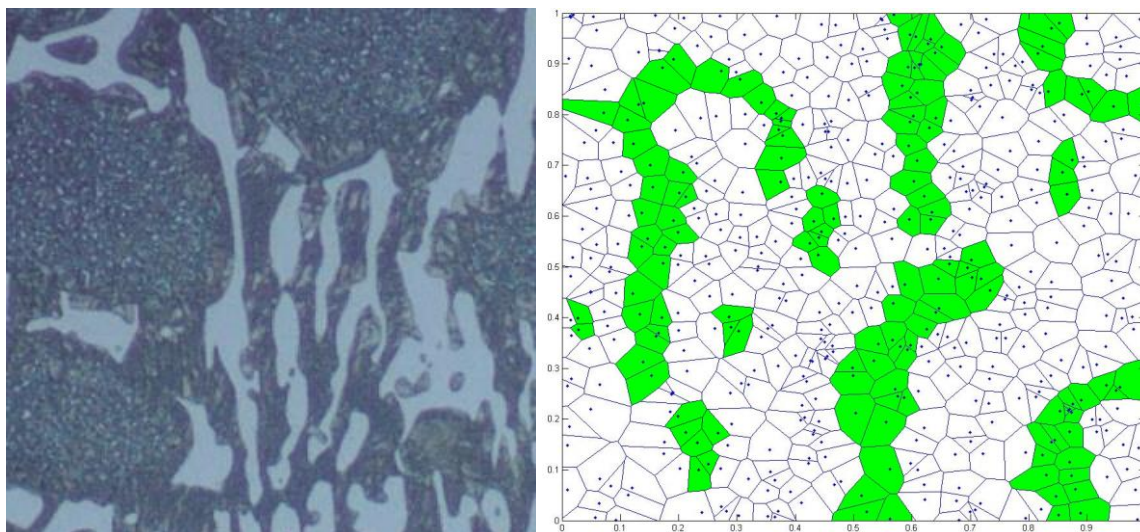
Tato studie je založena na materiálu Galileo [12], oceli se středním podílem karbidů, které jsou rovnoměrně rozprostřeny ve struktuře a tvoří pavučinové struktury.



Obr. 26 Srovnání vygenerovaného modelu (vpravo) s reálnou strukturou oceli s vysokým obsahem chromu [12]. Velikost modelu $200 \times 200 \mu\text{m}$.

6.1.2 Vygenerovaná mikrostruktura litiny s vysokým obsahem chromu

Tato studie je založena na materiálu Comet 90 [13], litiny s vysokým podílem chromu a karbidů celkově. Ty jsou nerovnoměrně rozprostřeny ve struktuře oceli, vytvářejí spíše delší a úzké struktury, které se shlukují.



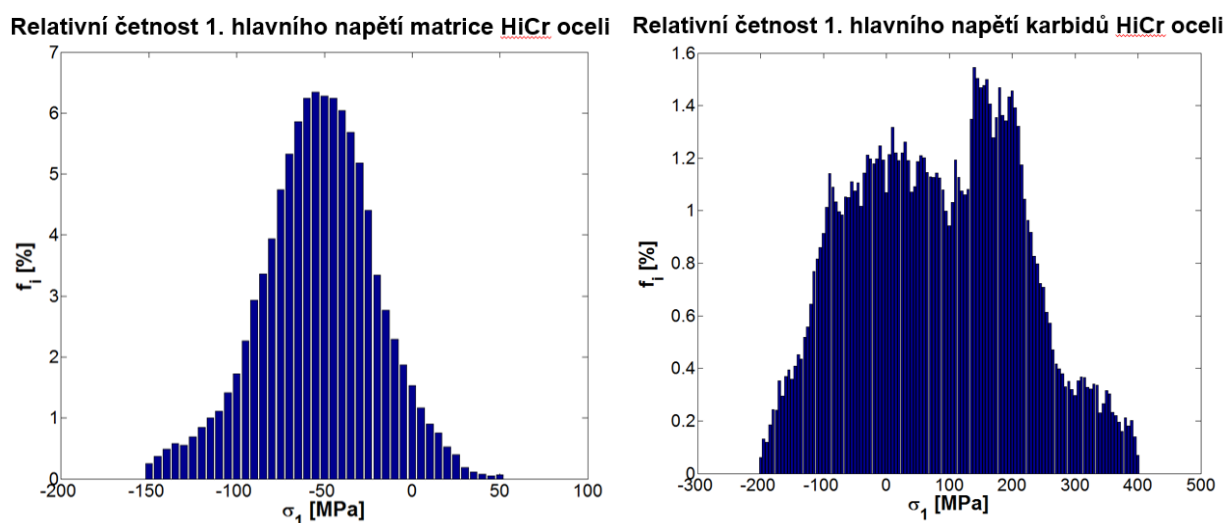
Obr. 27 Srovnání vygenerovaného modelu (vpravo) s reálnou strukturou oceli s vysokým obsahem chromu [13]. Velikost modelu $200 \times 200 \mu\text{m}$.

6.2 VÝSLEDKY PŘÍPADOVÝCH STUDIÍ

Jako výstup ze simulace je použita relativní četnost prvního hlavního napětí v elementech modelu podle jejich příslušnosti (matrice, karbidy). Tato metoda bere v potaz stochastickou povahu úlohy, dává představu o charakteru napětí a jeho rozložení.

6.2.1 Napětí mikrostruktury oceli v vysokém obsahem chromu

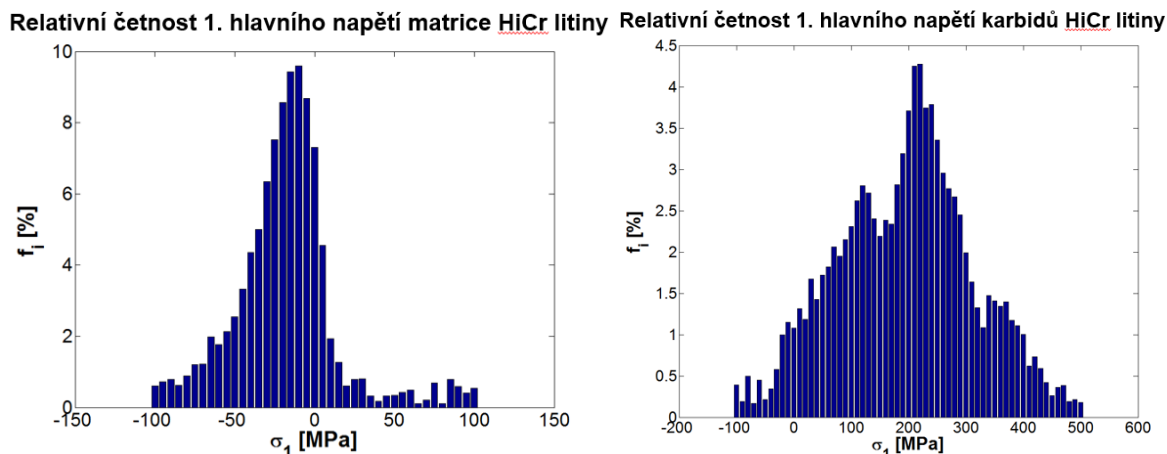
Na Obr. 28 vidíme, že matrice oceli je vystavena tlakovému namáhání, přičemž hodnoty jsou soustředěny okolo -50 MPa . Rozdělení četnosti odpovídá Gaussovu rozdělení. Karbidy jsou namáhány převážně tahově. Jejich rozdělení je rovnoměrně rozprostřeno, významnější podíl se objevuje okolo hodnoty 200 MPa .



Obr. 28 Rozložení četnosti prvního hlavního napětí v matrici, resp. v karbidech vlevo, resp. vpravo.

6.2.2 Napětí mikrostruktury litiny s vysokým obsahem chromu

Na Obr. 29 vidíme, že i matrice litiny s vysokým obsahem chromu je pod tlakovým napětím, které je soustředěno okolo hodnoty 20 MPa. Rozdělení odpovídá logaritmicko-normálnímu rozdělení. Karbidy jsou namáhány převážně tahově. Jejich rozdělení je disproporční, významný podíl je soustředěn okolo hodnoty 250 MPa.

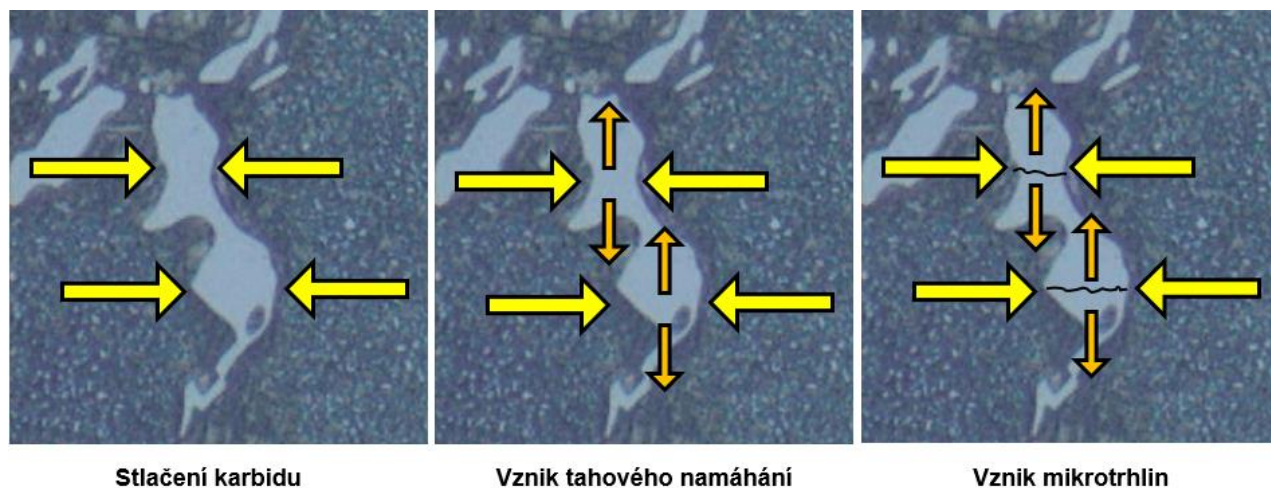


Obr. 29 Rozložení četnosti prvního hlavního napětí v matraci (vlevo) a. v karbidech (vpravo).

6.3 ROZBOR VÝSLEDKŮ PŘÍPADOVÝCH STUDIÍ

Matrice materiálu je namáhána tlakem opět u obou studií, čemuž odpovídá stlačování zrn matrice vlivem expanze při ohřevu. Matrice u oceli byla vystavena většímu tlaku, což se dá vysvětlit spojitým síťovým karbidů okolo zrn, které omezuje jejich deformaci. Výsledky ukázaly na zajímavé chování karbidů. U litiny byly karbidy namáhány především tahově, u oceli se vyskytovalo jak tahové, tak tlakové namáhání, přičemž převažovalo tahové.

Toto chování lze vysvětlit, pokud se zaměříme na tvar karbidu a většího součinitele tepelné roztažnosti matrice. Matrice expanduje více než karbidy, které jsou stlačovány. Tlak na vnější hrany karbidu vyvodí vnitřní tahové namáhání, které je kolmé na směr tlakového namáhání.



Obr. 30 Mechanismus vzniku tahových napětí v karbidech.

Tahovému namáhání karbidů lze přičíst vznik mikrotrhlin, které vznikají v karbidech, které mají poměr délky vs. šířky větší než 2. Takovéto karbidy najdeme především u litin. Degradační mechanismus tepelné

únavy lze tedy rozšířit o další jev – trhliny paralelní k povrchu. Pro odlišení nazvěme tento jev sekundární tepelnou únavou.

Na základě výsledků případových studií lze taktéž vyslovit domněnku, že síťoví karbidů ocelí je vystaveno nižšímu tahovému namáhání, než je tomu např. u karbidů litin, kvůli jejich prostorové orientaci. Tomu odpovídá chování zde prezentovaných případových studií i pozorování v praxi [14]. Další závěry lze vyvodit až ve chvíli, kdy bude experimentálně stanoveno kritérium vzniku a šíření trhlin v mikrostruktuře daného materiálu.

7 ZÁVĚR

7.1 SHRUTÍ POZNATKŮ Z MAKROSFÉRICKÉHO MODELOVÁNÍ

V této práci byl navržen nástroj pro analýzu stavu napětí pracovní vrstvy pracovního válce. Spojuje v sobě systémy MATLAB a ANSYS. Model pracuje s experimentálními i analytickými vstupními daty. Pomocí tohoto modelu byly zpracovány dvě případové studie založené na experimentálních datech.

První případová studie byla zaměřena na podíl jednotlivých zatěžujících činitelů na celkový stav napětí. Jako dominantní zdroj napětí bylo identifikováno tepelné zatížení. Druhé nejvýznamnější zatížení bylo identifikováno jako kontaktní únava. Třetí nejvýznamnější zatížení bylo identifikováno jako normálové zatížení ve válcovací mezeře. Simulace ukázaly, že teplotní namáhání způsobuje vysokou míru plastizace na povrchu válce, která s rostoucí vzdáleností od povrchu exponenciálně klesá. Kontakt s opěrným válcem způsobuje menší míru plastizace, avšak s vyšší mírou penetrace do povrchu.

Byl zpřesněn tvar napjatostně-deformační křivky pro obvodový směr, který byl definován před 40 lety. Byl identifikován podíl jednotlivých zatížení na celkovém stavu napětí, včetně dopadu vstupního i výstupního chlazení na tvar napjatostně-deformační křivky.

Druhá případová studie – simulace havárie chlazení, ukázala pravděpodobnou příčinu roztržení pracovního válce a masivního spallingu, která jsou pozorována v praxi. Pracovní válce obsahují zbytková napětí, která jsou způsobena technologií výroby. V pracovní vrstvě, která je odlévána jako první, vznikají tlaková napětí díky ochlazení a následnému smrštění celé pracovní vrstvy. Ta tlačí na přechodovou vrstvu a jádro válce, kde vznikají zbytková axiální tahová napětí. Při výrobě válce je však nastolena rovnováha mezi těmito napětími.

Havárie chlazení či jiné okolnosti, které dovolí přehřátí válce mimo běžný pracovní rozsah. Simulace přehřátí válce ukázala enormní nárůst tlakových napětí i jejich penetraci do hloubky při kontaktu s provalkem. Tento nárůst je přenesen do jádra válce, kde se projeví zvýšeným tahovým napětím, které může vést k roztržení jádra pracovního válce.

Simulace taktéž ukázala enormní zvýšení tahových napětí při opětovném spuštění chladicího systému, příčinu masivního spallingu. Při havárii chlazení není korigován tepelný tok do pracovního válce, teplo tím pádem proniká hlouběji do pracovní vrstvy válce. Při spuštění chlazení dochází k podchlazení povrchové vrstvy. Chlazení však nemůže proniknout dostatečně do hloubky tak, aby zchladilo celou přehřátou vrstvu. Podchlazená vrstva se smršťuje. V několika milimetrech hloubky od povrchu pracovní vrstvy válce se akumuluje gradient napětí v řádu GPa/mm. Vzniká masivní degradace povrchu. Pokud se válec blíží ke konci své životnosti, kdy napětí dostatečně pronikne až k přechodové vrstvě mezi pracovní vrstvou a jádrem válce, dochází k odtržení plátů pracovní vrstvy z těla válce.

7.2 SHRnutí POZNATKŮ Z MIKROSFÉRICKÉHO MODELOVÁNÍ

V této práci byl taktéž navržen a popsán výpočetní model pro simulaci mikrostruktury oceli. S pomocí tohoto modelu bylo simulováno chování mikrostruktury odvozené od vysoce chromem legované oceli a litiny. I při omezených znalostech materiálových vlastností a nezbytných zjednodušení, se tento model ukázal být cenným nástrojem pro studium degradace povrchu.

Analýza mikrostruktury litiny s vysokým obsahem chromu identifikovala pravděpodobnou příčinu vzniku trhlin paralelních k povrchu, které se vytvářejí v síťoví karbidů a které doposud nebyly uspokojivě vysvětleny. Jako původce vzniku bylo identifikováno teplotní namáhání. Mechanismus byl nazván sekundární tepelná únava z důvodu odlišení od primární tepelné únavy – vzniku makroskopických trhlin v síťoví karbidů, které jsou kolmé k povrchu a které se šíří podél rozhraní matrice a síťoví karbidů.

Mechanismus sekundární tepelné únavy byl vysvětlen takto: Při vystavení mikrostruktury zvýšené teplotě nastává expanze matrice a karbidů. Expanze může probíhat pouze v radiálním směru, v axiálním i tangenciálním směru je omezena ostatním materiálem. Obě složky mikrostruktury – matrice a karbidy, mají rozdílné chování. Karbidy jsou tvrdší a pevnější. Matrice je houževnatější. Dochází k expanzi zrn matrice a k dilataci karbidů v radiálním směru. Dlouhé, štíhlé karbidy chromu jsou stlačovány okolní matricí, která nutí karbidy se prodlužovat. Chovají se tak jako prut, který je na obou koncích natahován silou. Tato tahová napětí, která byla zjištěna pomocí mikrosférického modelu, způsobují trhání karbidů ve směru paralelním k povrchu pracovního válce.

Analýza mikrostruktury vysoce chromem legované oceli ukázala rovnoměrnější distribuci napětí v síťoví karbidů než u oceli s vysokým obsahem chromu. To vysvětluje vyšší výkon oceli ve specifických situacích. Karbidy vytvářejí struktury podobné pavoučím sítím s uniformním rozložením orientace karbidů mezi zrny.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CAITHNESS, L., Cox, S. a S. EMERY. Surface Behaviour of HSS in Hot Strip Mills. In: *Collection of abstracts Rolls 2000+ Conference of the Institute of Materials at Birmingham*. Birmingham: Institute of Materials at Birmingham, April 1999.
- [2] CAEF – THE EUROPEAN FOUNDRY ASSOCIATION. *Roll Failures Manual: Hot Mill Cast Work Rolls*. 1st Edition. CAEF – THE EUROPEAN FOUNDRY ASSOCIATION, ©2002.
- [3] BELZUNCE, F. J., A. ZIADI a C. RODRIGUEZ. Structural integrity of hot strip mill rolling rolls. *Engineering Failure Analysis*. [Amsterdam]: Elsevier, 2004, roč. 11, č. 5, s. 789–797. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2003.10.004
- [4] PELLIZZARI, M., D. CESCATO a M. G. DE FLORA Hot friction and wear behaviour of high speed steel and high chromium iron for rolls. *Wear*. [Amsterdam]: Elsevier, 2009, roč. 267, č. 1–4, s. 467–475. DOI: 10.1016/j.wear.2009.01.049
- [5] OLVER, AV. The Mechanism of rolling contact fatigue: an update. In: *Proc. IMechE, Journal of Engineering Tribology*, 2005, roč. 219, s. 313–330.
- [6] BENASCIUTTI, D., E. BRUSA a G. BAZZARO. Finite elements prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills. *Procedia Engineering*. [Amsterdam]: Elsevier Ltd., 2010, roč. 2, č. 1, 707–716.
- [7] FISCHER, F. D, W. E. SCHREINER, E. A WERNER a C. G SUN. The temperature and stress fields developing in rolls during hot rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. [Amsterdam] Elsevier Ltd., 2004, roč. 150, č. 3, s. 263–269. [cit. 15.9.2013]. ISSN 0924-013. Dostuné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.059>
- [8] STEVENS, P. G., K. P. IVENS a P. HARPER. Increasing work-roll life by improved roll-cooling practice. *Journal of The Iron and Steel Institute*. The corporate laboratories of the British steel corporation, roč. 209, s. 1–11, 1971.
- [9] GARZA-MONTES-DE-OCA, N. F., R. COLAS a W. M. RAINFORTH. On the damage of a work roll grade high speed steel by thermal cycling. *Engineering Failure Analysis*. [Amsterdam]: Elsevier Ltd., 2011, roč. 18, č. 6, s. 1576–1583. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2011.06.001
- [10] SURESH, Subra. *Fatigue of Materials*. 2nd edition. New York, USA: Cambridge University Press, 2010. ISBN: 978-0-521-57847-9.
- [11] POLÁK, Jaroslav. *Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals*. 2nd revised edition. Praha/Amsterdam: Academia/Elsevier Science Publ., 1991. (Materials Science Monographs, roč. 63., pro Elsevier) ISBN 80-200-0008-9 (pro Academia)/ ISBN: 0-444-98839-4 (pro Elsevier).
- [12] MARICHAL KETIN. *MK GALILEO - High Chromium Steel*. Liège (Belgie): MERICHAL KETIN. ©2013 Dostupné také z: <http://www.mkb.be/Qualities/MK-Galileo.pdf>
- [13] MARICHAL KETIN. *MK COMET 90 - High Chromium Iron*. Liège (Belgie): MERICHAL KETIN. ©2013 Dostupné také z: <http://www.mkb.be/Qualities/MK-Comet90.pdf>
- [14] DÜNCKELMEYER, M., et al. Microstructure analysis of a banded work roll with comparison between damage appearance and thermo-mechanical considerations. In: *International doctoral seminar, 16–19 května 2010, Smolenice castle* [online]. Slovensko. 2010, s. 126–134. Dostupné z: <http://goo.gl/oCVDIn>
- [15] LI, Y., et al. Vertical short-crack behavior and its application in rolling contact fatigue. *International Journal of Fatigue* [online]. 2006, roč. 28, č. 7, s. 804–811 [cit. 2013-11-05]. ISSN 0142-1123. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.06.047>
- [16] LIUJIE, X., et al. Investigation on wear behaviors of high-vanadium high-speed steel compared with high-chromium cast iron under rolling contact condition. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2006, roč. 434, č. 1–2, s. 63–70 [cit. 2013-11-15]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.047>
- [17] ONDROUŠKOVÁ, J., M. POHANKA a B. VERVAET. Heat-flux computation from measured-temperature histories during hot rolling. *Materiali in tehnologije*, 2013, roč. 47, č. 1, s. 85–87. ISSN: 1580- 2949.

ABSTRAKT

This PhD thesis is focused on combined heat – mechanical degradation processes within steel surfaces. The real-life example are work rolls of hot rolling mills which suffers from combined heat – thermal stresses.

The first chapter describes main surface degradation processes – a wear, an oxidation, a thermal fatigue and a contact fatigue. Firstly, each degradation mechanism is described separately. Last subchapter describes work roll surface degradation in context.

The second chapter describes a numerical model for global stress state of work roll surface layer. The model is based on FEM and it is using MATLAB for API, a formulation of boundary conditions and post processing of results.

Next two chapters describe two case studies. The first is focused on an influence determination of each load factor which takes place in hot rolling process – thermal stress, normal load in rolling gap, shear stress in rolling gap and the contact with back-up roll. The second case study examines stress state of work roll during the accidental breakdown of work roll cooling system. This case study reveal the potential hazard situation when the work roll cooling system fails. These situations could lead to ultimate failure of work rolls.

Next chapter describes the numerical model for a microstructure stress state within steels which are used for work rolls. Again, the model is based on FEM and it uses MATLAB for API and formulation of boundary conditions.

Two case studies were conducted with the model for stress state of microstructure. The first (the third in general) case study examines a High Speed Steel type of material. The second (the fourth in general) case study examines a High Chromium iron type of material. This case study provided the high possible explanation of the parallel-to-surface crack formation within carbides.

The last chapter is summarization of whole PhD thesis. It contains all conclusions which have been made.

Ing. Radek Zahradník

PŘEHLED ZAMĚSTNÁNÍ:

Září 2010 – Dosud

VUT Brno

Laboratoř přenosu tepla a proudění, Brno

Technický a vývojový inženýr

MKP analýzy přenosu tepla, zpracování dat, příprava experiment, provádění experimentů

Říjen 2012 – Duben 2013

Výzkumné středisko Dong Chon

Pohang Steel Company
Pohang, Jižní Korea

Junior výzkumný asistent

Vývoj numerického modelu pro optimalizaci rovinnosti tlustých plechů s využitím konečně diferenciálních a konečně prvkových metod.

VZDĚLÁNÍ:

Říjen 2010 - Dosud

VUT Brno

Brno

Doktorské studium v oblasti aplikovaných věd v inženýrství

Doktorská práce: Tepelně – mechanická degradace povrchů za vysokých teplot.

Září 2008 – Červen 2010

VUT Brno

Ústav konstruování, Brno

Inženýrské studium, Konstrukční inženýrství

Diplomová práce: Vliv topografie třecích povrchů na kontaktní únavovou životnost

JAZYKOVÉ DOVEDNOSTI:

- Angličtina aktivně slovem i písmem, úroveň B1, složená zkouška pro Ph.D. z technické angličtiny, četba anglické beletrie bez slovníku, psaní odborných článků do sborníků konferencí z mého oboru.
- Aktivní četba anglické beletrie a/nebo technické literatury.
- Znalost Hangulu (Korejská písmo, románská transliterace).

DALŠÍ ZNALOSTI A DOVEDNOSTI:

- Programování v MATLAB, C, C++, APDL
- MKP software: ANSYS Classic V11/V12/V13/V14/V14.5, Autodesk Simulation
- Certifikovaný profesionál pro Autodesk Inventor a Autodesk AutoCAD
- Kancelářský software: Microsoft Word 2013, Excel 2013, Outlook 2013
- Matematický software: Maple, MATLAB, MathCAD
- Uživatel cloudových technologií
- Administrace operačních systémů: Microsoft XP, Vista, 7, 8, Android 4. x a vyšší
- Pokročilé znalosti z diagnostiky HW, sestavování a ladění PC
- Psaní deseti prsty
- Rychločtení