





---

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá statickou analýzou upínacích čelistí zkušebního stroje MTS 810 a jejich částí náchylných k porušení (vločka, izolující keramické destičky) a posouzení jejich bezpečnosti při nízkých teplotách (-180°C) z hlediska různých mezních stavů, tak aby byla zajištěna jejich funkce v náročných laboratorních podmínkách. Součástí práce je návrh vhodného utahovacího momentu, pro utažení vzorku, tak aby při ochlazení celé soustavy nedošlo ke vzniku vůlí nebo poškození čelistí. Pro nezbytné numerické výpočty byl použit MKP systém Ansys. Následně byl proveden návrh konstrukčních úprav čelistí, tak aby lépe vyhovovaly podmínkám, ve kterých jsou provozovány. U navržených úprav bylo maximálně využito stávajících dílů, nevyhovující díly byly na základě provedené analýzy přepracovány.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Statická analýza upínacích čelistí, stanovení utahovacího momentu, MKP modelování,

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is aimed to assessment of safety of screw grips of testing machine MTS 810. Some parts of grips are predisposed to damage at low temperature (-180°C), e.g. spacer, isolating ceramics lamellas, etc. To guarantee its perfect function under hard laboratory conditions the finite element analysis was performed and suitable modifications grips parts have been suggested with respect to maximum of application of recent parts. Part of the thesis is devoted to suggestion of suitable tightening torque of experimental sample under different temperatures. For necessary numerical computations FEM system Ansys was used.

## **KEYWORDS:**

Static analysis Screw grips, determination of tightening torque, FEM modeling,

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VOTROUBEK, T. *Stanovení provozních podmínek upínacích čelistí zkušebního stroje MTS 810*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.

---



---

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, na základě uvedené literatury a pod odborným vedením Ing. Luboše Náhlíka, Ph.D.

V Brně dne 20. 5. 2009

.....  
Podpis





---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Luboši Náhlíkovi, Ph.D za cenné rady, připomínky a návrhy při zpracování této diplomové práce. Dále chci poděkovat panu Ing. Martinu Petrencovi, Ph.D, pracovníkovi Ústavu fyziky materiálů Akademie věd ČR za poskytnutí informací při zpracování práce.

---





**OBSAH**

<b>Úvod</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Přehled současného stavu poznání</b> .....	<b>14</b>
1.1 Únavové zkoušky .....	14
1.2 Výsledky nízkocyklových zkoušek .....	16
1.3 Příklady zkušebních strojů .....	18
1.4 Zkušební stroj MTS 810 .....	19
1.5 Konstrukce čelistí .....	21
<b>2 Formulace řešeného problému a jeho analýza</b> .....	<b>25</b>
<b>3 Vymezení cílů práce</b> .....	<b>26</b>
<b>4 Návrh metodického přístupu k řešení</b> .....	<b>27</b>
4.1 Numerické stanovení osově síly v matici .....	27
4.2 Analytické řešení .....	28
<b>5 Analýza a interpretace získaných výsledků</b> .....	<b>31</b>
5.1 Výpočet utahovacího momentu při zatížení za pokojové teploty.....	31
5.1.1 Popis numerického modelu a okrajových podmínek.....	31
5.1.2 Analýza stávajícího řešení upínacích čelistí.....	32
5.1.3 Nově navržené řešení upínacích čelistí .....	36
5.2 Výpočet utahovacího momentu při zatížení za teploty -180°C.....	40
5.3 Statická analýza izolační keramické destičky .....	44
5.3.1 Numerická analýza stávajícího řešení .....	45
5.3.2 Zatížení izolační keramické destičky za teploty -180°C .....	48
5.3.3 Nově navržené řešení upínacích čelistí .....	50
5.4 Deformačně napjatostní analýza vložky čelistí .....	53
<b>6 Závěr</b> .....	<b>58</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>61</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	<b>62</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>63</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>64</b>
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>65</b>



## ÚVOD

---

Základním cílem složitého procesu projektování strojů a zařízení je směřování ke konstrukci, která vyhovuje požadavkům, jenž jsou na ni kladeny a zároveň, aby byla co nejjednodušší, nejlehčí a i po ekonomické stránce co nejpříjemnější. Výsledné řešení musí brát na zřetel často protichůdná hlediska, jako jsou např. výkonové parametry, použitý materiál, technologie výroby, výrobní a provozní náklady, bezporuchovost a provozní spolehlivost. Při návrhu nových zařízení pak musí být splněna všechna jmenovaná kritéria. Jedním z nejdůležitějších hledisek, jenž je třeba brát do úvahy při návrhu nových zařízení, je tzv. únava materiálu. Literatura srovnává, že až 90% provozních poruch součástí strojů je právě způsobeno tímto jevem, pokud nebyl správně uvážěn [1].

Zatěžování, které se v čase opakuje se nazývá cyklické zatěžování. Poznamenejme, že čistě statické zatěžování je spíše teoretickou záležitostí a většina zatížení, jenž se objevuje v praxi má obvykle cyklický charakter. Cyklické zatížení, jímž jsou konstrukce v provozu namáhány, má obvykle složitý časový průběh. Např. u rotačních strojů, náprav apod. se může jednat o cyklický průběh, se superponovanou náhodnou složkou zatížení.

Navrhování zařízení na základě statických parametrů je nedostatečné, a proto je nutné součásti testovat a navrhovat s ohledem na cyklické zatížení. Průběh reálného zatížení je v laboratořích obtížně realizovatelný a výsledky z něj dosažené by byly těžko porovnatelné, proto se simulace zatížení zjednodušuje a to takovým způsobem, aby experimentální zatěžování a zatížení reálné konstrukce mělo stejný dopad na chování použitého materiálu konstrukce. Výsledky dosažené na laboratorních strojích musí být přenosné na reálné konstrukce. Nejčastěji se nahrazuje náhodné zatížení sinusovým průběhem zátěžného cyklu. Pokud je zkušební stroj vybaven řídicím počítačem a vhodným softwarem, lze simulovat zatížení během, kterého se mění velikost amplitudy.

## **1 1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ**

### **1.1 Únavové zkoušky**

Na proces únavy materiálu lze nahlížet z různých pohledů, poznamenejme, že v dalším textu se zaměříme zejména na tzv. *nízkocyklovou únavu*. Právě na měření materiálových charakteristik vyskytujících se v oblasti nízkocyklové únavy je zkušební stroj MTS 810 na Ústavu fyziky materiálů AV, v.v.i. primárně využíván.

Jako nízkocyklové zatížení uvažujeme případy, kdy počet zátěžných cyklů do porušení je menší než  $10^5$ . Přičemž nízkocyklovou únavou jsou nejčastěji zatíženy součásti energetických zařízení, tlakové nádoby a to jak v klasické, tak i v jaderné energetice, potrubí, parní a vodní turbíny, turbokompresory dopravní a těžební stroje a zařízení. Dále pak tomuto zatížení podléhají součásti plynových turbín, leteckých motorů a součásti kosmických zařízení. [2]

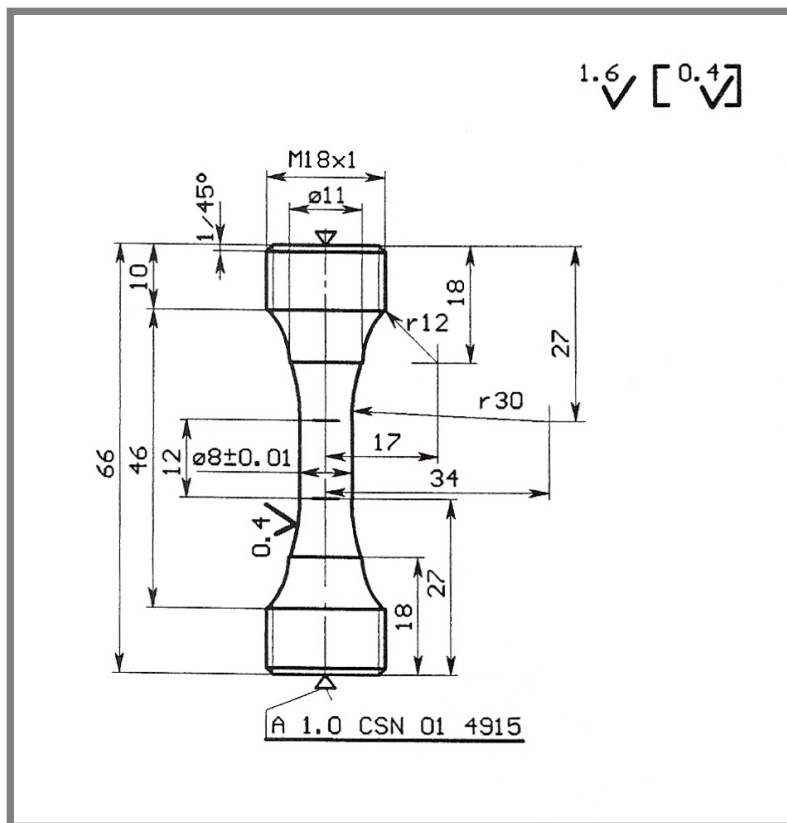
Stroje pro únavové zkoušky lze rozdělit podle několika hledisek a to podle:

- Druhu zatěžování (tah-tlak, ohyb, ohyb za rotace, krut a kombinované namáhání).
- Způsobu zatěžování (konstantní amplitudou napětí nebo konstantní amplitudou celkové deformace).
- Způsobu vzniku zatížení (mechanicky - závažím, pružinou nebo rotací nevyvážených hmot, hydraulicky, elektromagneticky apod.).
- Charakteru změn zatížení (periodické - sinusový nebo pilový průběh, složité náhodné zatěžování řízené počítačem).
- Zatěžovací frekvence (hydraulické stroje pracují s frekvencí 0,1 - 30 Hz a rezonanční pulsátory pracují s frekvencí v rozmezí cca 50 Hz - 100 kHz).
- Tvaru zkušebních vzorků (laboratorní vzorky, konstrukční části).

Na zkušební stroje jsou kladeny vysoké nároky. Stroj musí umožňovat pevné a stabilní upnutí zkušebních vzorků a zaručit, aby se deformoval pouze vzorek, a nikoli rám stroje. Při zkouškách na rezonančních zařízeních musí být tvar a velikost zkušebního tělesa vhodně zvolena tak, aby byla splněna rezonanční podmínka pro danou frekvenci zatěžování. Zvláštní pozornost je nutné věnovat při upínání zkušebních těles vyrobených z netradičních materiálů, např. z keramik, plastických hmot zpevněných vlákny atd., protože by mohlo dojít k jejich poškození.

Nečastěji se v praxi můžeme setkat se zkušebními stroji a zařízeními od firem Schenk, MTS, Amsler, Instron a Zwick, mezi které patří i univerzální únavové zkušební stroje.

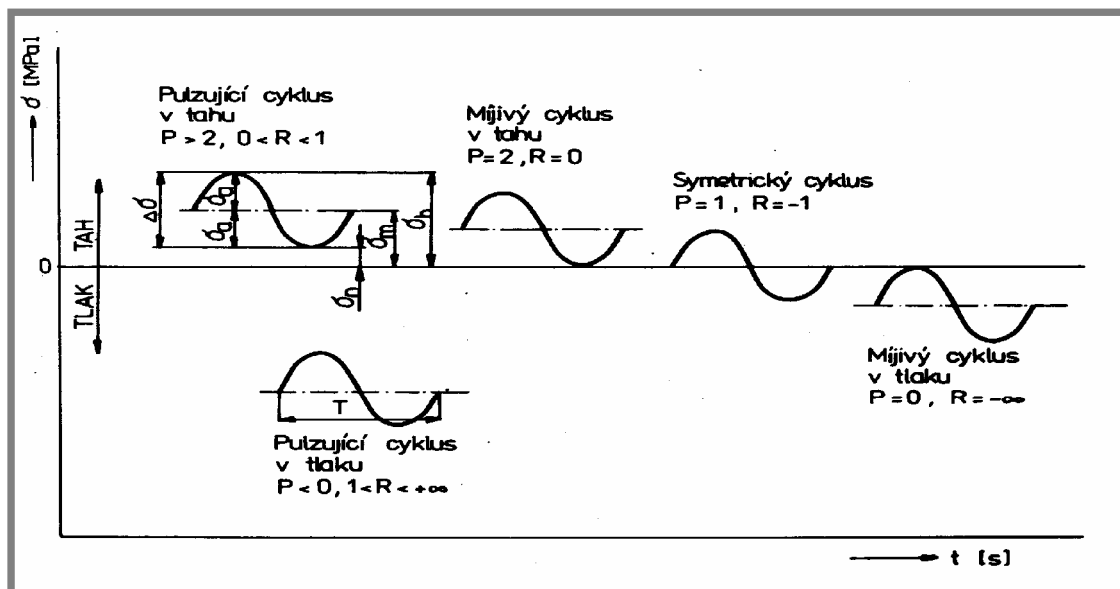
Zkušební tělesa, která se nejčastěji používají pro laboratorní zkoušky, jsou válcová nebo plochá s broušeným a leštěným povrchem o rozměrech funkční části 6 až 20 mm. Tělesa jsou buď hladká nebo s koncentrátorem napětí (vrub, otvor, osazení) pro stanovení vrubového součinitele  $K_f$ . Ukázka zkušebního vzorku je na obr. 1-1.



Obr. 1-1 Válcový zkušební vzorek pro únavové zkoušky [3]

## 1.2 Výsledky nízkocyklových zkoušek

Odezvu materiálu na nízkocyklové zatěžování jsou charakterizovány křivkami zpevnění-změkčení materiálu. Jedná se o křivku Manson-Coffinovu a Bassquinovu křivku. Různé typy sinusových zátěžných cyklů jsou vyobrazeny na obr. 1-2.

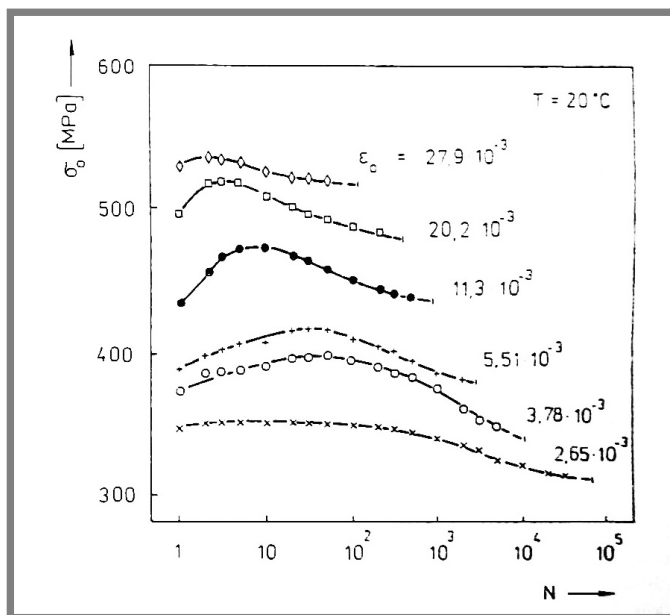


Obr. 1-2 Různé typy sinusových zátěžných cyklů a jejich charakteristiky [3]

V první fázi zatěžování amplituda napětí a deformace roste, tzn. materiál cyklicky zpevňuje. Ve druhé fázi se amplituda napětí téměř nemění, tuto fázi nazýváme saturace. Třetí fáze kdy se vyšší amplituda zatížení projevuje pomalým cyklickým zpevněním popř. pro nízké amplitudy cyklickým změkčením. Některé materiály se složitější strukturou mohou vykazovat v průběhu únavy cyklické zpevnění i změkčení jako např. Cr-Mo ocel 15 313.5, která v první fázi zatěžování zpevňuje, a poté dlouhodobě cyklicky změkčuje, viz obr. 1-3.

Při únavových zkouškách celkové deformace na slitinách Inconel 792-5A při pokojové teplotě a při 500, 700 a 800°C bylo zjištěno, že při zatěžování materiál nejprve zpevňuje, avšak při dalším zatěžování změkčuje pouze při teplotě 800°C. Křivky spolehlivosti závisí na teplotě. S rostoucí teplotou křivky Mannson – Coffin a Basquin vykazují nižší životnost. Stopy skluzů jsou pozorovatelné na povrchu cyklicky namáhaných vzorků při všech teplotách [4].

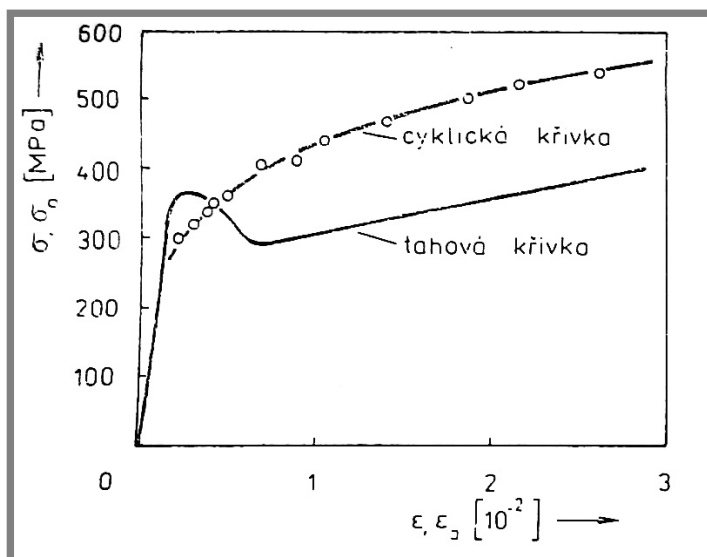
Při studiu únavových zkoušek superslitin IN 713LC a IN 792-5A bylo zjištěno, že Mannson – Coffinova křivka závisí na teplotě v případě IN 713LC. Avšak u IN 792-5A je na teplotě nezávislá. U obou superslitin bylo cyklické plastické napětí lokalizováno v kluzné ploše [5].



Obr. 1-3 Křivky cyklického zpevnění- změkčení Cr-Mo oceli 15 313.5 [2]

Další charakteristickou křivkou, která je výsledkem měření nízkocyklové únavy je cyklická deformační křivka, viz např. obr. 1-4. Jedná se o závislost amplitudy napětí a amplitudy deformace, které určíme z hysterezních smyček zatěžování. Je to jedna z nejdůležitějších únavových charakteristik materiálu. Charakterizuje cyklickou plastickou odezvu materiálu v průběhu únavového života součásti.

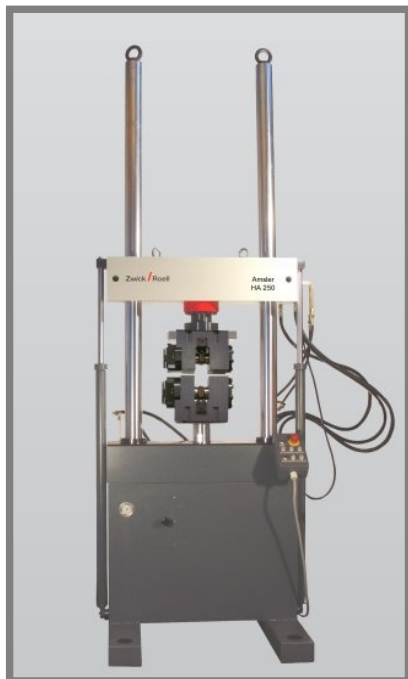
Poznamenejme, že v této kapitole uvedené materiálové charakteristiky byly měřeny přímo na stroji MTS 810 ve skupině Nízkocyklové únavy ÚFM AV ČR, v.v.i., pro který mají být, jako cíl této diplomové práce, navrženy nové upínací čelisti, jenž umožní měření i za velmi nízkých teplot do cca  $-180^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 1-4 Základní cyklická deformační křivka nízkoúhlikové oceli společně s tahovou křivkou [2]

### 1.3 Příklady zkušebních strojů

Příklady používaných zkušebních strojů pro zkoušky nízkocyklové únavy jsou zobrazeny na obr. 1-5 až 1-8.



**Obr. 1-5** Zkušební stroj určený pro nízkocyklové zkoušky od firmy Zwick Amsler HB126/80 [7]



**Obr. 1-6** Zkušební stroj pro zkoušení nízkocyklové únavy od firmy Instron 8801-A1/A2 Std Height [8]





**Obr. 1-7** Zkušební stroj určený pro nízkocyklové zkoušky od firmy Inova Praha s.r.o., zkušební stroj 63 kN s hydraulickými upínacími[9]



**Obr. 1-8** Zkušební stroj určený pro nízkocyklové zkoušky od firmy Inova Praha s.r.o. zkušební stroj 160 kN [9]

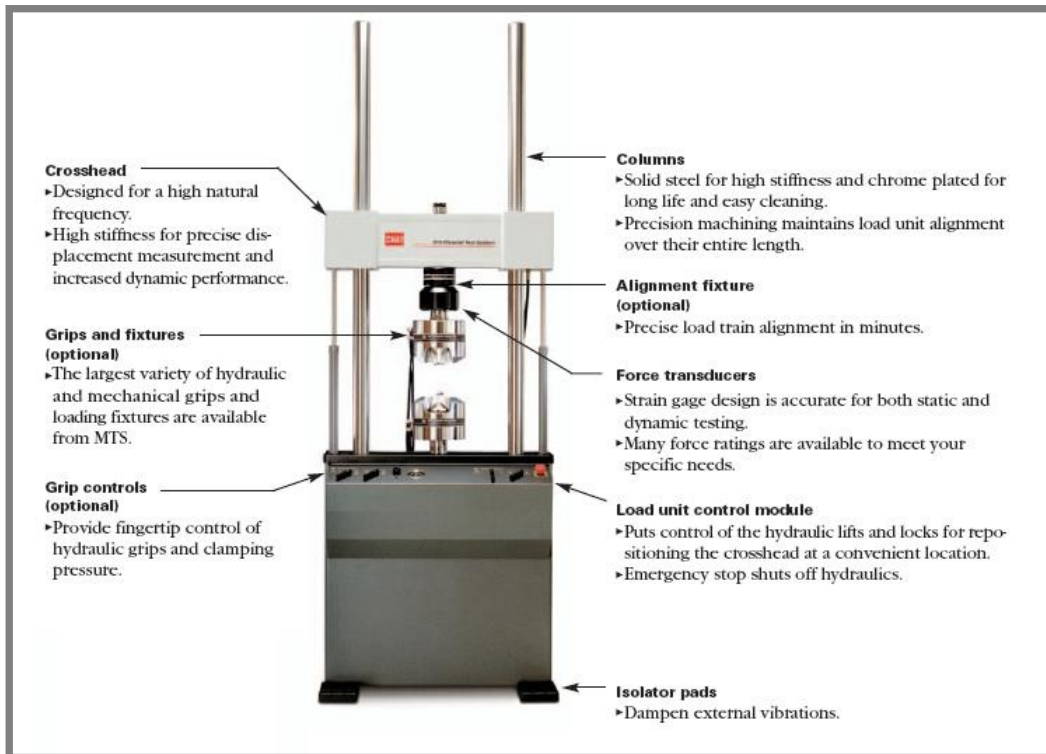
### 1.4 Zkušební stroj MTS 810

1.4

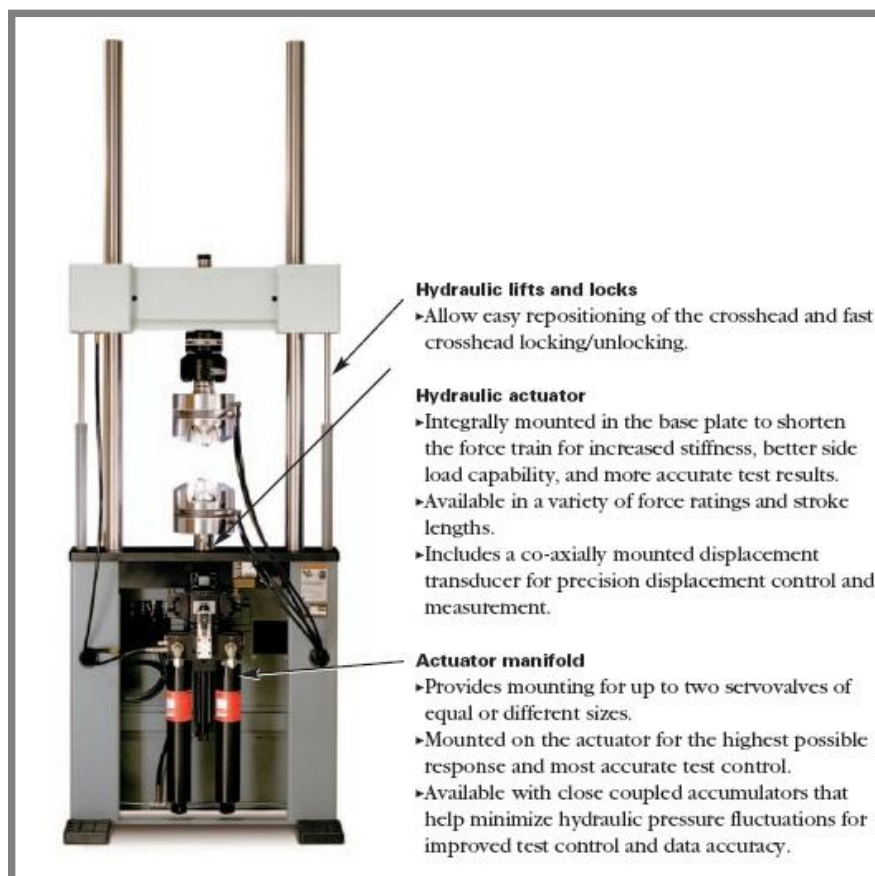
---

Zkušební stroj MTS 810, je zkušební stroj pro zkoušení nízkocyklové únavy, který pracuje na servohydraulickém principu, viz obr. 1-9 a 1-10. Čelisti jsou určeny pro nízkocyklové zkoušky, tj. pro upnutí válcových zkušebních těles (viz např. obr. 1-1), mají být určeny pro zkoušky za nízkých teplot a to až  $-180^{\circ}\text{C}$ . Takto nízké teploty je dosaženo chlazením pomocí par tekutého dusíku. Poznamenejme, že teplota kapalného dusíku je  $-196^{\circ}\text{C}$ . Množstvím par dusíku se reguluje teplota zkušebního vzorku. Teplota vzorku se měří pomocí plášťových termočlánků na bázi Cu-konstantan (slitina mědi a niklu). Pokud by bylo požadováno provést nízkocyklovou únavovou zkouškou za vysokých teplot je to po výměně upínacích čelistí a dodání příslušenství (zejména vhodné ohřívací pece) pro měření za vysokých teplot možné.

Zatěžující síla, kterou musí čelisti přenášet na zkušební vzorek je 30000 N. Při zkoušce se skutečná zatěžující síla měří pomocí dynamometru. Počet cyklů se při zkoušce pohybuje od několika stovek až do cca  $10^5$ . Délka jednoho cyklu je přibližně od 1 do 15 s. Doba trvání celé zkoušky bývá obvykle v rozmezí od 4 hodin až po 14 dní, dle parametrů zkoušky. Aby byla zkouška kompletní je nutné provést zkoušku několika vzorků. Přičemž počet dílčích zkoušek závisí na druhu materiálu a druhu zkoušky.



Obr. 1-9 Zkušební stroj na nízkocyklovou únavu MTS 810 - pohled zepředu [10]



Obr. 1-10 Zkušební stroj na nízkocyklovou únavu MTS 810 - pohled zezadu [10]

Na dané konfiguraci stroje MTS 810 se při zkoušce měří celková deformace, plastická deformace, zatěžující síla, teplota vzorku, čelistí a okolí. Výsledky měření jsou cyklická deformační křivka a křivky zpevnění: Manson-Coffinova a Basquinova křivka. Dále se provádí analýza tvaru hysterezní smyčky a její plochy. Po vybavení zkušebního stroje příslušnou optikou, zejména CCD kamerou (která je také součástí vybavení dostupného na ÚFM AV ČR) lze studovat šíření trhlin ve zkušebním vzorku.

### 1.5 Konstrukce čelistí

1.5

---

Čelisti se skládají z několika součástí, jež jsou zobrazeny na obr. 1-11. Na obr. 1-12 a 1-13 je zobrazeno schéma používaných čelistí resp. jejich 3D model. Detail provedení čelistí, na kterém je znázorněno upnutí zkušební vzorku je zobrazen na obr. 1-14. Pro tvorbu modelu čelistí bylo využito podkladů poskytnutých pracovníky ÚFM [11]. Kompletní dokumentace je součástí Přílohy.

Z důvodu měření za velmi nízkých teplot je nutné použít vlastní konstrukci čelistí, protože výrobce nedodává žádné čelisti, které by vyhovovali zadaným požadavkům.



Obr. 1-11 Jednotlivé součásti stávajících čelistí

Čelist a zkušební těleso je vyrobeno z austenitické oceli 316L, s obsahem 18% Cr a 9 % Ni  $R_e = 220$  MPa,  $R_m = 480$  MPa, při  $-180^\circ\text{C}$  je  $R_e = 300$  MPa,  $R_m = 520$  MPa.

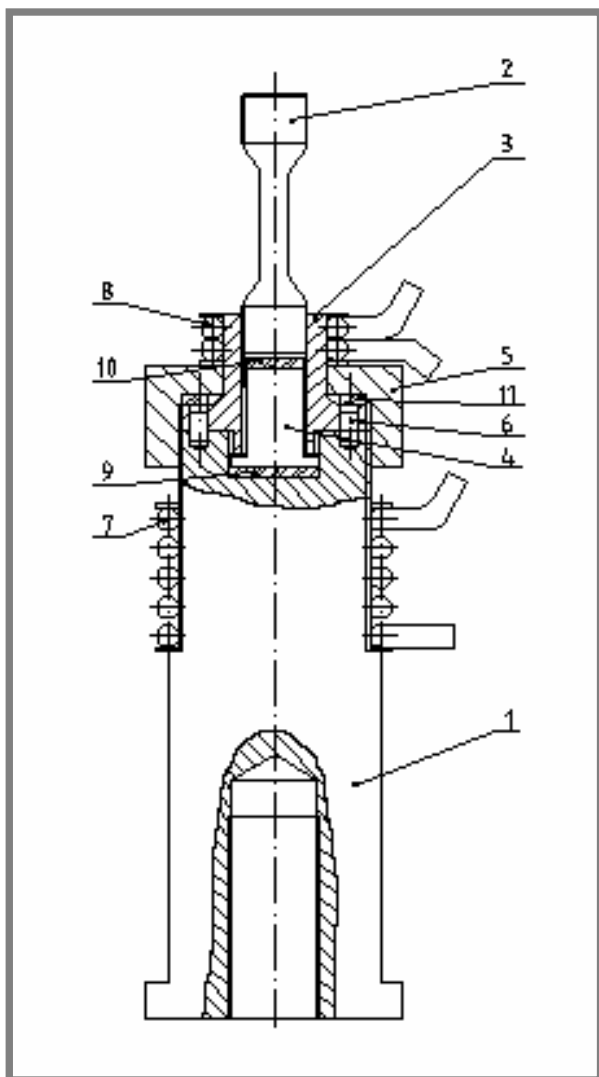
Vložka a čep jsou vyrobeny z oceli 17 029.7, jsou kaleny a popuštěny, z čehož vyplývají jejich vynikající mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi.  $R_e = 600$  MPa,  $R_m = 1100$  MPa, tvrdost 50 HRC, při  $-180^\circ\text{C}$  je  $R_e = 700$  MPa,  $R_m = 1150$  MPa.

Matice je vyrobená z korozivzdorné oceli 17027.6,  $R_e = 400$  MPa,  $R_m = 600$  Mpa,

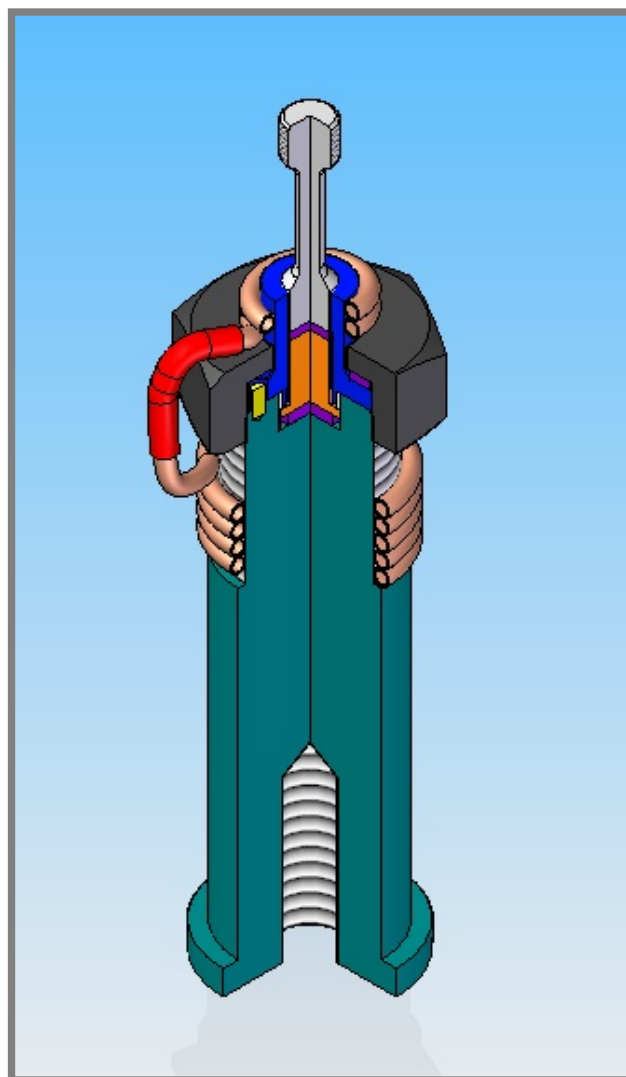
Chladicí potrubí je vyrobeno z polykrystalické mědi o čistotě 99,9%.

Keramické podložky jsou vyrobeny z keramického materiálu na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Kalení jednotlivých součástí čelistí je důležité, kvůli jejich mechanickým vlastnostem, protože se jedná o velice namáhané součásti. Kalení probíhá při teplotě  $1050^\circ\text{C}$ , při této teplotě dochází k difuzi chromu, jehož minimální obsah v těchto ocelích je 16%, z hranic zrn do zrn austenitu. Následným zakalením, kdy prudkým ochlazením dojde ke změně krystalické mřížky vznikne martenzit s vysokým obsahem chromu. Pokud je obsah chromu v této matici vyšší než 13 % je nově vzniklý materiál korozivzdorný, což je pro danou aplikaci žádoucí.



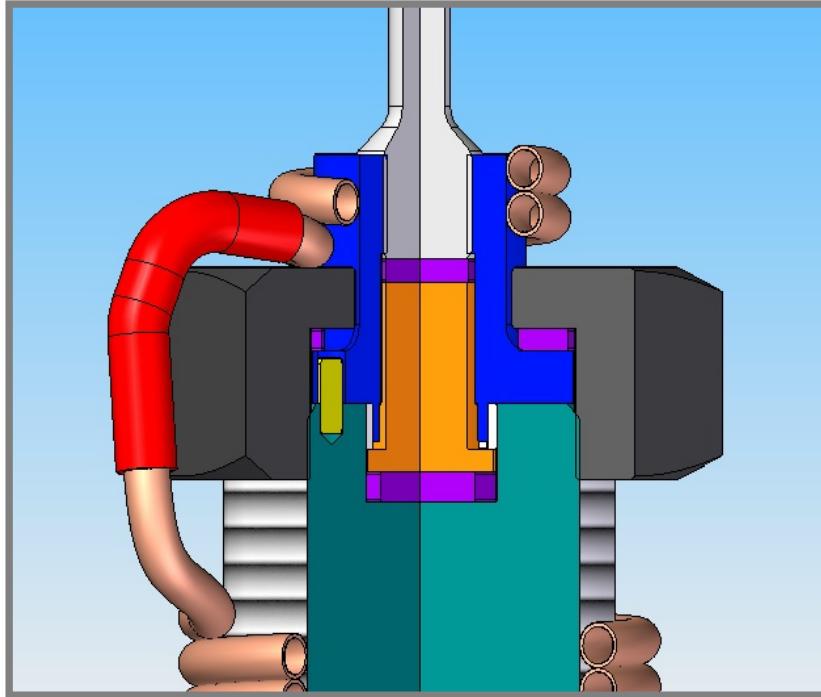
Obr. 1-12 Schéma upínacích čelistí



Obr. 1-13 3D model upínacích čelistí

- 1 – Čelist
- 2 – Zkušební těleso
- 3 – Vložka
- 4 – Čep
- 5 – Matice
- 6 – Kolík

- 7 – Chladicí potrubí 1
- 8 – Chladicí potrubí 2
- 9 – Keramická podložka 22 × 22 × 3
- 10 – Keramická podložka  $\varnothing$  16 × 3
- 11 – Keramická podložka 8 × 15 × 3



Obr. 1-14 Detail upínacích čelistí

## 2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

2

Při používání současných speciálních upínacích čelistí zkušebního stroje MTS 810, které byly navrženy pro pokojové, respektive vyšší teploty dochází ke vzniku trhlin ve vložce (pozice 3 na obr. 1-12). To je z hlediska funkce čelistí zcela nepřijatelné. Dále, jak je vidět z obrázku detailu upínacích čelistí (obr. 1-14), jsou zde použity keramické podložky, které zabraňují vedení tepla a tím ohřívání zkušební vzorku. Na obrázku 1-14 jsou zobrazeny fialovou barvou. Při konstrukci čelistí nebyl stanoven utahovací moment matice. To má za následek, že při utažení matice velkým utahovacím momentem může dojít k rozdrčení, respektive k porušení izolačních keramických destiček. Při použití malého utahovacího momentu může nastat situace, kdy čelisti budou utaženy nedostatečně, následkem čehož může nastat vůle mezi vzorkem, čepem, keramickými podložkami a čelistí, což při zkoušce nízkocyklové únavy, kdy je celá soustava zatěžována cyklicky tahem-tlakem, případně silně podchlazena až na teplotu  $-180^{\circ}\text{C}$ , může dojít ke zkreslení výsledků měření, ale také k poničení čelistí, zejména pak křehkých keramických podložek.

Znehodnocení průběhu zkoušky jednoho zkušební tělesa má negativní dopad na průběh celého měření, jenž se skládá z měření na několika zkušebních tělesech (6-ti a více). Vzniklá finanční ztráta může být vyčíslena i v řádu desítek tisíc Kč. Je třeba si uvědomit, že kusová výroba zkušebních těles není levná záležitost, že hodnota zkoušeného materiálu se pohybuje často v řádu tisíců Kč/kg, navíc se jedná o vysoce pevné materiály s velmi špatnou obrobiteľností. Náklady na běh stroje, jeho údržbu a kvalifikovanou obsluhu se pohybují cca okolo 4000 Kč/den. Pokud se zkouška provádí za vysokých teplot narůstají dále náklady na zkoušku díky vyšší spotřebě elektrické energie a nutnosti použít speciální pec. Za nízkých teplot se zkouška prodraží díky použití speciálního chladicího zařízení s kapalným dusíkem a velké spotřebě chladicího média. Navíc je za vysokých i nízkých teplot ztížena manipulace se zkušebními vzorky i s použitými měřicími zařízeními, což prodlužuje čas na vykonání zkoušky a tím i náklady. V extrémním případě může dojít k znehodnocení materiálu na výrobu zkušebních vzorků jehož znovuzískání je v podstatě nemožné (jedná se např. o materiály na reaktorové nádoby atomových elektráren 4. generace). V takovém případě může být ohrožen i výsledek řešení projektu, kde přímé finanční ztráty jsou pouze menší zlo, v porovnání se ztrátou kreditu výzkumné skupiny, či instituce.

Z uvedeného stručného výčtu je zřejmé, proč je nutné věnovat se návrhu vhodných čelistí zkušebního stroje MTS 810, a že finanční ztráty v případě nevhodně zvolené konstrukce by mohly být dosti vysoké. Navíc by se zbytečně blokoval provoz drahého experimentálního zařízení, jenž s přihlédnutím k jeho dalšímu příslušenství, můžeme považovat za unikátní a to nejen v České republice.

### **3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE**

Cílem diplomové práce je statická analýza vybraných částí stávajících upínacích čelistí zkušebního stroje MTS 810 náchylných k porušení (vločka, izolující keramické destičky) a posouzení jejich bezpečnosti při nízkých teplotách ( $-180^{\circ}\text{C}$ ), z hlediska různých mezních stavů, jež v jednotlivých případech mohou hrát významnou roli (např. mezní stav křehké pevnosti, mezní stav deformace), tak aby byla zajištěna jejich bezvadná funkce v náročných laboratorních podmínkách. Dále návrh vhodného utahovacího momentu, pro utažení vzorku, tak aby nedošlo při ochlazení celé soustavy ke vzniku vůlí nebo poškození čelistí. Pro nezbytné numerické výpočty použít MKP systém Ansys. Po celkové analýze bude proveden návrh konstrukčních úprav stávajících čelistí, tak aby vyhovovaly podmínkám, ve kterých jsou provozovány, tj. zejména budou moci sloužit pro měření za pokojových teplot i teplot blízkých  $-180^{\circ}\text{C}$ . Bude maximálně využito stávajících dílů, pokud budou vyhovovat zadání, nevyhovující díly budou na základě konečnoprvkové analýzy přepracovány.



## 4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4

Navržené řešení problému se skládá ze dvou částí, numerické, ze které jako výsledek vzejde stanovení osového zatížení matice při utahování vzorku, a analytické, jejímž účelem je stanovení utahovacího momentu z empirických vztahů.

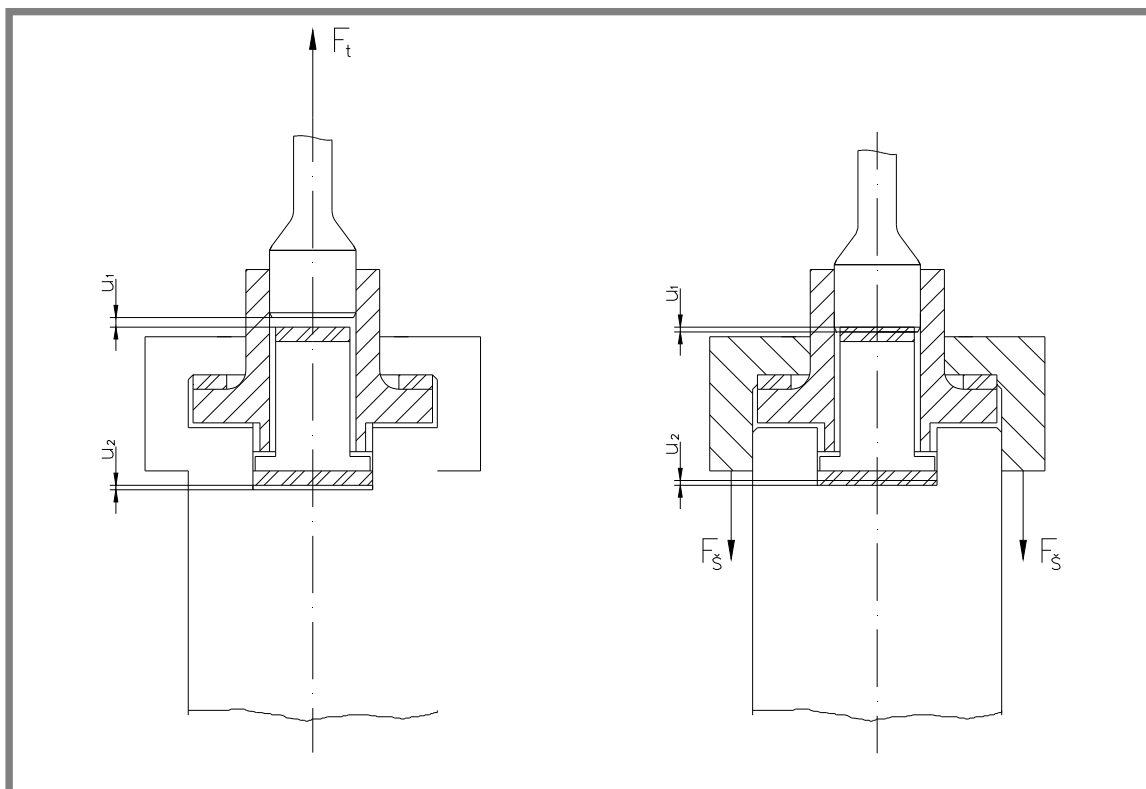
Stanovení bezpečnosti vybraných částí čelistí bude provedeno za pomoci numerického výpočtu v prostředí Ansys.

### 4.1 Numerické stanovení osových sil v matici

4.1

Stanovení osových sil v matici bylo provedeno na zjednodušeném modelu čelistí. Zjednodušení spočívalo zejména v tom, že nebyl modelován závit mezi čelistí poz. 1 a maticí poz. 5 na obr. 1-12, a to z důvodu náročnosti modelování. Jednalo by se o složitou 3D kontaktní úlohu, u které byly pochybnosti o tom, zda by bylo možné takovou úlohu numericky řešit a simulovat utahování matice pomocí stávajícího programového a hardwarového vybavení. V oblasti závitu by musela být značně zjemněna síť, čímž by neúměrně narostl počet prvků v modelu a dále by byla úloha značně složitá díky velkému počtu kontaktních ploch. Také by bylo komplikované namodelovat „utažení“ matice, kdy se jedná o dva pohyby, které se konají současně a to rotační a posuvný.

Z uvedených důvodů byl zvolen jiný postup umožňující odhadnout osovou sílu v utažené matici a následně, v kombinaci s analytickým výpočtem, také velikost utahovacího momentu.



Obr. 4-1 Schéma zobrazení vůle mezi součástmi

Velikost osově síly v matici byla určena ze dvou MKP výpočtů, viz obr. 4-1. První simuloval pevné spojení matice a vložky. Celá soustava byla namáhána tahovou silou, jež odpovídala maximálně možnému zatížení experimentálního tělesa (30 kN).

$$\Delta u_{\text{tah}} = u_1 - u_2. \quad (4.1)$$

O zjištěnou velikost  $\Delta u_{\text{tah}}$  musí být „předepnut“ čep (pozice 4 na obr. 1-12) na začátku měření, aby v jeho průběhu nedošlo ke vzniku vůle mezi čepem a vložkou. Požadovaného předepnutí lze dosáhnout utažením převlečné matice (pozice 5 na obrázku 1-12) při upínání zkušební tělesa.

Druhý MKP výpočet byl tedy zaměřen na zjištění velikosti osově síly nutné k deformaci čepu o vhodnou velikost zjištěnou prvním výpočtem. Za tímto účelem byl vytvořen druhý model (viz obr. 5-3). Zde byla zatížena matice silou na spodním okraji, která byla převlečena přes vložku a iteračně byla zjištěna vhodná velikost zatěžující síly taková, aby výsledná deformace v oblasti čepu  $\Delta u_{\text{utah}}$  byla stejně velká jako v případě prvního výpočtu, ale s opačným znaménkem, tedy:

$$\Delta u_{\text{tah}} + \Delta u_{\text{utah}} = 0, \quad (4.2)$$

kde  $\Delta u_{\text{tah}}$  je velikost deformace v prostoru čepu při maximálně přípustném zatížení tahem a  $\Delta u_{\text{utah}} = u_1 - u_2$ , přičemž  $\Delta u_{\text{utah}}$  je velikost deformace v oblasti čepu způsobená utažením matice viz obr. 4-1.

Výsledné působení na soustavu čelistí je tedy superpozicí obou zátěžných stavů. Poznamenejme, že uvedený způsob výpočtu je možný, neboť se jedná o elastické řešení. Stanovení velikosti utahovacího momentu probíhalo za pomoci analytického výpočtu, viz další text.

## 4.2

## 4.2 Analytické řešení

Pro výpočet utahovacího momentu matice čelistí bylo použito analytické řešení nalezené v publikaci [12]. Pro výpočet momentu byla použita velikost osově síly v matici  $F_S$  (poznamenejme, že na základě principu akce a reakce má osově zatížení matice stejnou hodnotu jako osově zatížení šroubu, pouze je opačně orientované), zjištěná z numerického řešení.

Výsledný utahovací moment  $M_U$  je dán součtem třecího momentu  $M_{M/H}$  v dosedací ploše matice šroubového spoje a třecího momentu  $M_Z$  v závitech při utahování šroubového spoje:

$$M_U = M_{M/H} + M_Z. \quad (4.3)$$

Třecí moment je definován jako:

$$M_{M/H} = F_S \times \frac{d_s}{2} \times f_{M/H}, \quad (4.4)$$

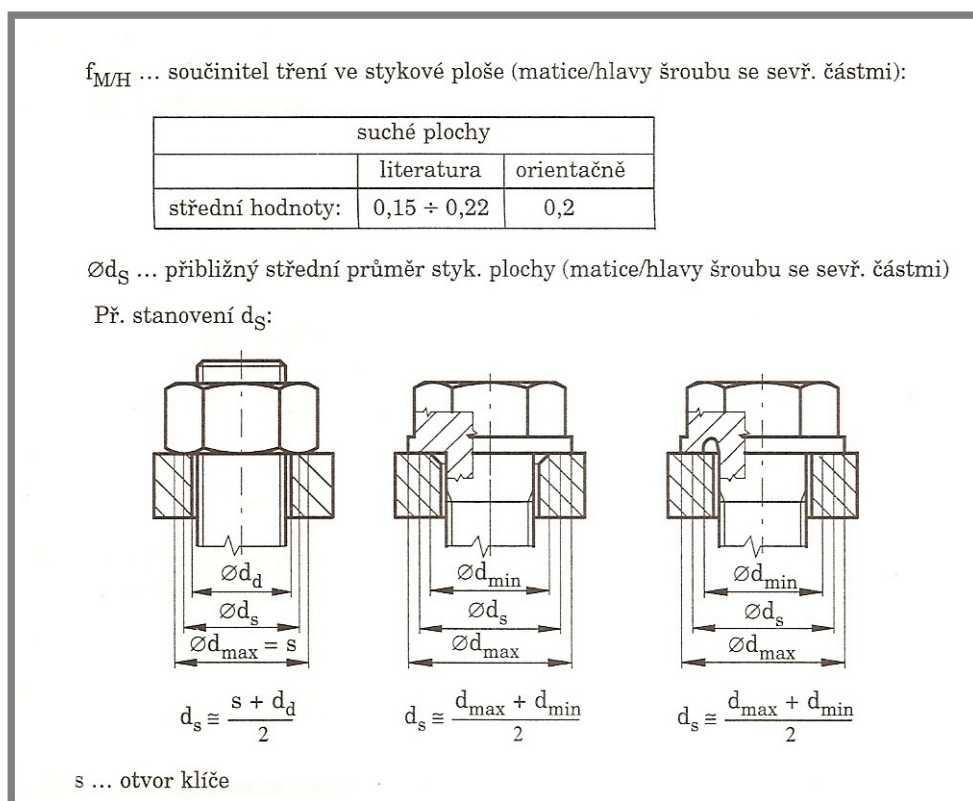
kde:

$M_{M/H}$  [Nmm] - velikost třecího momentu v dosedací ploše matice šroubového spoje

$\varnothing d_s$  [mm] - přibližný střední průměr styk. plochy (viz obr. 4-2)

$f_{M/H}$  [-] - součinitel tření ve stykové ploše (viz tabulka na obr. 4-2)

$F_\xi$  [N] - zatížení v ose šroubu (viz obr. 4-1)



Obr. 4-2 Zobrazení veličin nezbytných pro výpočet třecího momentu [12]

Pro třecí moment v závitech šroubu je v uvedené literatuře odvozen výraz:

$$M_Z = F_\xi \times \frac{d_2}{2} \times \left( \frac{P_h}{\pi \times d_2} + \frac{f_Z}{\cos \frac{\beta}{2}} \right), \quad (4.5)$$

kde:

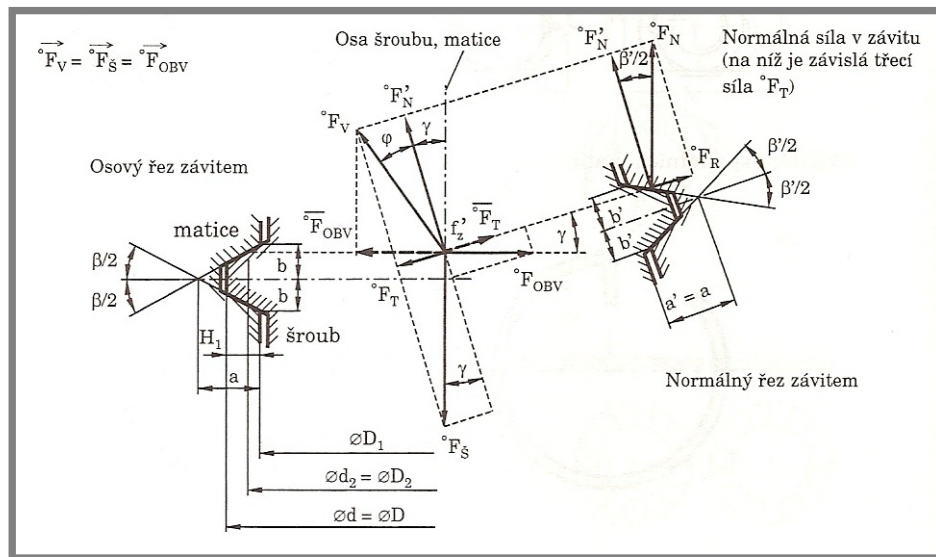
$F_\xi$  [N] - zatížení v ose šroubu (viz obr. 4-3)

$\varnothing d_2$  [mm] - střední průměr závitu čelisti (viz obr. 4-3)

$P_h$  [mm] - stoupání závitu

$f_Z$  [-] - součinitel tření v závitech (viz tab. 1)

$\beta$  [°] - vrcholový úhel závitu (viz obr. 4-3)



Obr. 4-3 Zobrazení geometrie závitu [12]

Tab. 1 Hodnoty součinitele tření v závitech  $f_z$  [12]

suché plochy		
povrch	literatura	orientačně
obrobený	0,20 – 0,35	(0,1 – 0,4) → ≈ 0,30
fosfátovaný	0,28 – 0,40	
pozinkovaný	0,15 – 0,35	
kadmiovaný	0,10 – 0,18	

Poznamenejme, že stanovení utahovacího momentu bylo provedeno pro obě požadované teploty, tj. pro pokojovou (20°C) a -180°C.

Na základě výpočtů uvedených v kapitole 4.1 byly také vytipovány problematické části čelistí a stanovena jejich bezpečnost k patřičnému meznímu stavu, či dokonce navrhuta jejich úprava, tak aby nebyly zbytečně přetěžovány. Detaily jsou uvedeny ve výsledkové části práce.

Dalším krokem výpočtu bylo zjištění zatěžujícího napětí na izolující keramické destičce za pomoci 3D modelu v programu Ansys Workbench. Poté byla provedena deformačně napěťová analýza na modelu osminy keramické destičky v programu Ansys, pro přesné stanovení zatížení keramické destičky. Výpočet byl proveden pro teplotu 20 a -180°C.

**5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ****5****5.1 Výpočet utahovacího momentu při zatížení za pokojové teploty**

5.1

**5.1.1 Popis numerického modelu a okrajových podmínek**

5.1.1

Výpočet průběhu a velikosti deformací a napětí v upínacích čelistech byl proveden elastickou analýzou pomocí programu Ansys Workbench. Nejprve byly vymodelovány čelisti v programu Solid Edge. Poté z důvodu ušetření množství prvků a tím i výpočtového času byl importován čtvrtinový model do programu Ansys Workbench. Model, který byl počítán, byl zjednodušený. Použité okrajové podmínky, jsou zobrazeny na obr. 5-1.

Způsob jakým byl model zjednodušen je popsán v kapitole 4.1. Model tvoří téměř 75000 prvků. Jedná se především o prvky SOLID 186 což jsou 3D 20 uzlové prvky s kvadratickou bázovou funkcí, SOLID 187, což je degenerovaný 10 uzlový prvek 186. Na plochy, na kterých jsou použity podmínky zajišťující symetrii jsou použity prvky SURF 154. V oblasti kontaktu jsou použity prvky CONTACT 174, jedná se o 3D 8 uzlové kontaktní prvky. Na dosedací plochy byly použity prvky TARGET 170.

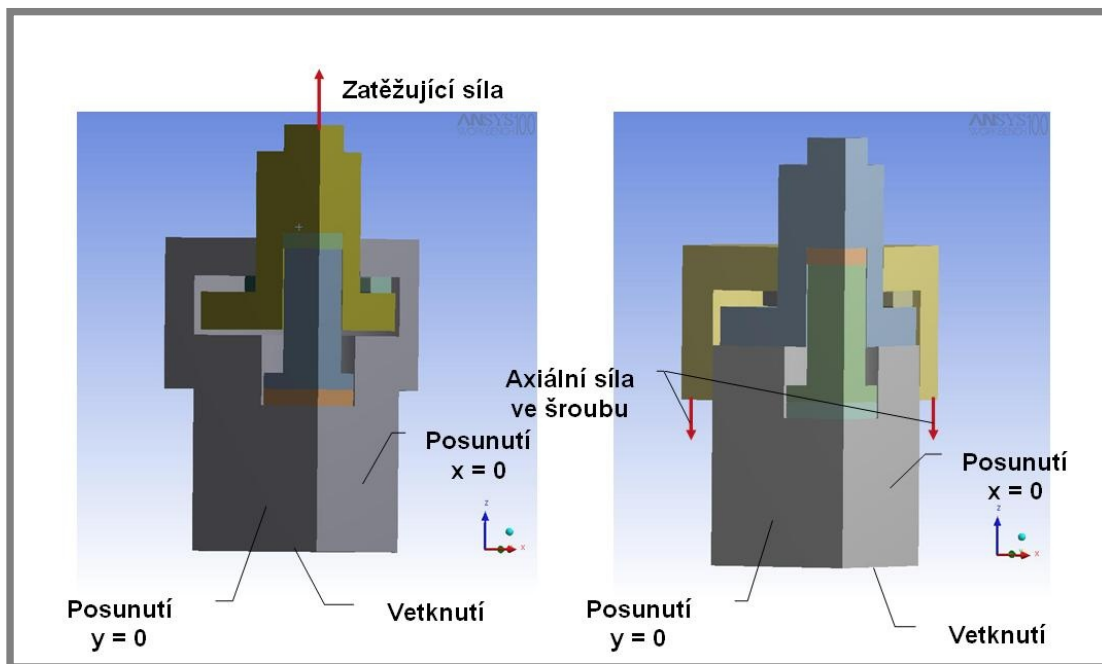
Pro ocelové součásti čelistí byly použity materiálové charakteristiky:

Youngův modul pružnosti v tahu	$2 \times 10^5$ MPa
Poissonova konstanta	0,3
Hustota	$7,85 \times 10^{-6}$ kg/mm <sup>3</sup>
Tepelná roztažnost	$1,2 \times 10^{-5}$ 1/°C
Součinitel tepelné vodivosti	$6,05 \times 10^{-2}$ W/mm·°C

Mechanické vlastnosti jsou popsány v kapitole 1.5

Pro keramické destičky (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [13]:

Youngův modul pružnosti v tahu	$3,7691 \times 10^5$ MPa
Poissonova konstanta	0,21
Hustota	3,96 kg/mm <sup>3</sup>
Tepelná roztažnost	$5,5 \times 10^{-6}$ 1/°C
Součinitel tepelné vodivosti	$4,6 \cdot 10^{-2}$ W/mm·°C
Mez pevnosti v tlaku	3000 MPa

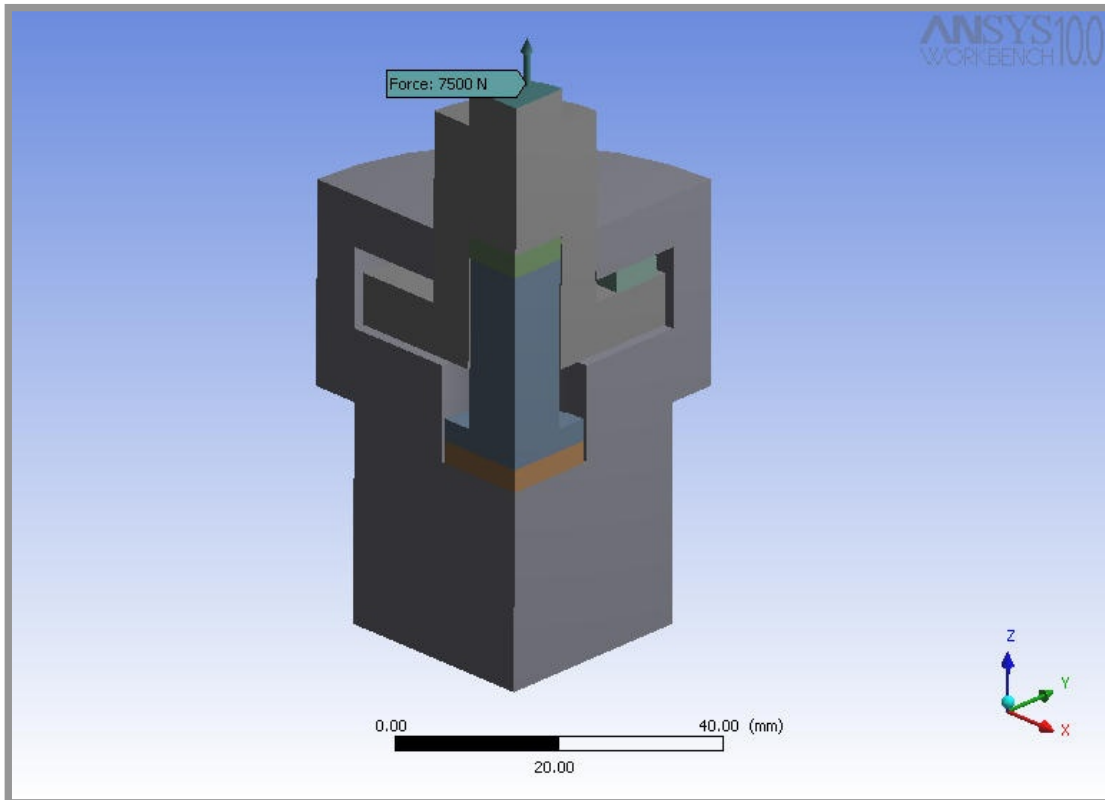


Obr. 5-1 Okrajové podmínky

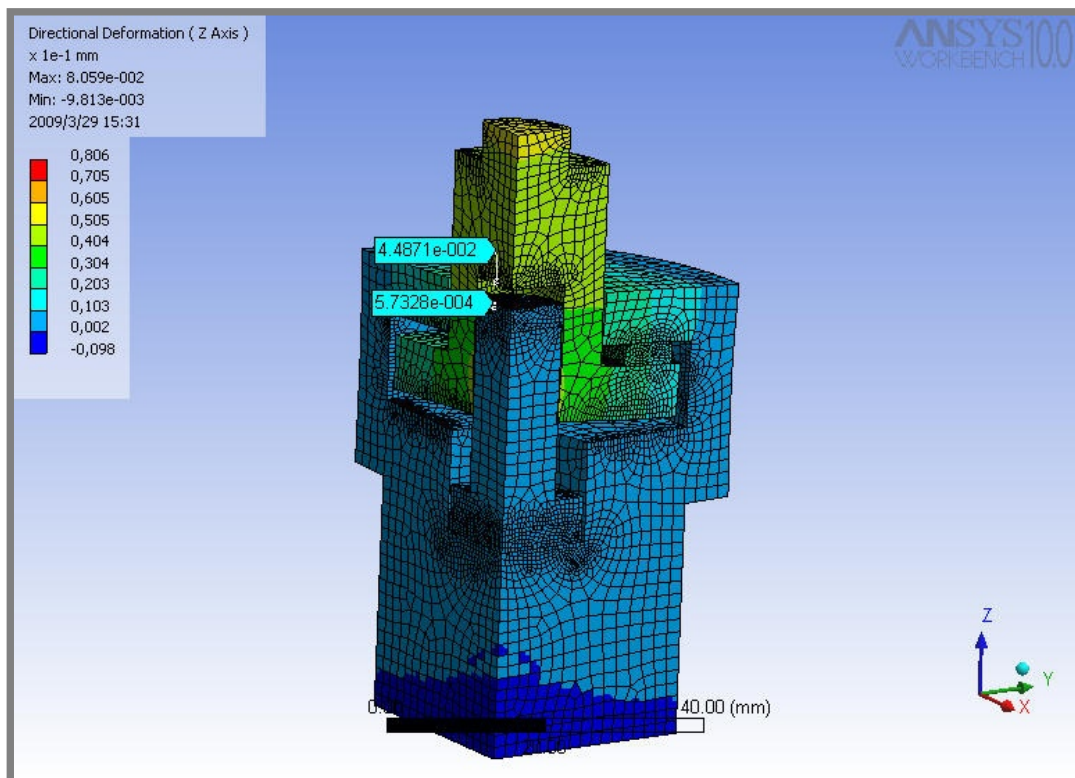
## 5.1.2

**5.1.2 Analýza stávajícího řešení upínacích čelistí**

Jak bylo popsáno výše, výpočet byl proveden na dvou modelech. Nejdříve byla vypočítána velikost deformace – velikost vůle, která vznikne mezi součástmi při zatížení tahem. Maximální zatížení čelistí bylo v modelu realizováno silou  $30000 / 4 = 7500\text{N}$ , což odpovídalo maximálnímu zatížení čelistí (viz obr. 5-2). Výsledné hodnoty posunutí v ose čelistí jsou uvedeny na obrázku 5-3.



Obr. 5-2 Zatížení čelistí tahem

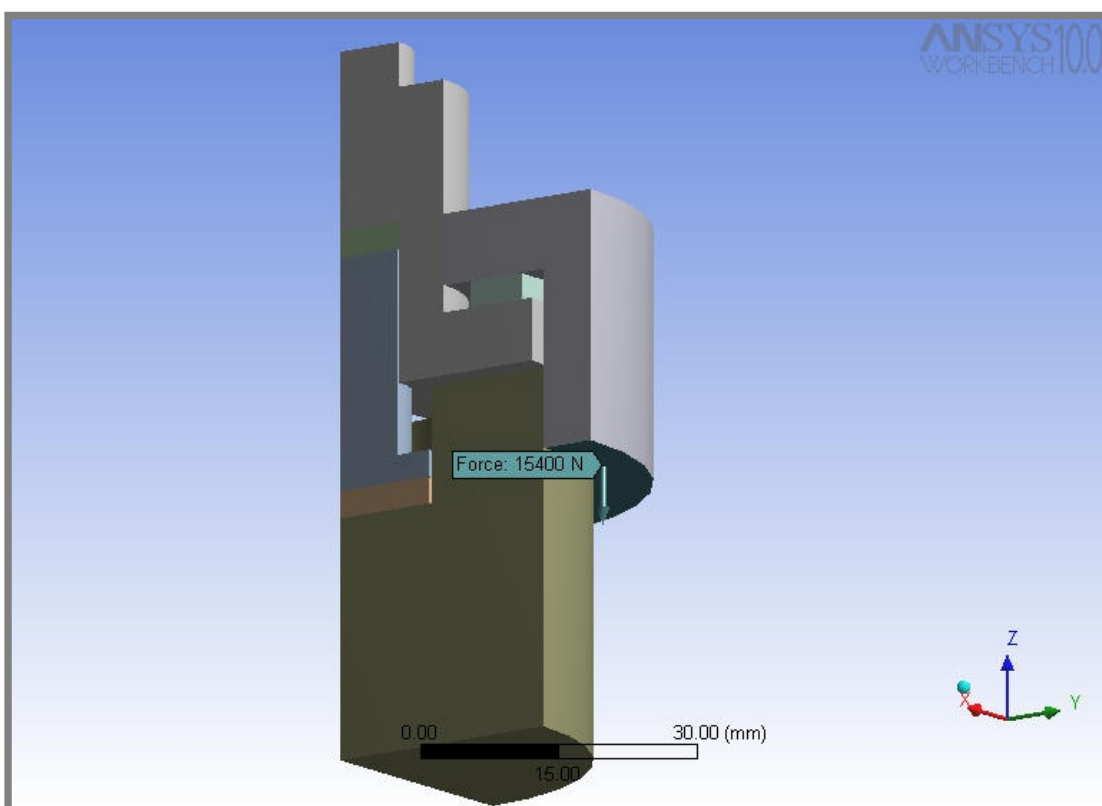


Obr. 5-3 Výsledek výpočtu - zobrazení velikosti vůle vzniklé při zatížení tahem

Do výpočtu vůle mezi vzorkem a keramickou destičkou (viz vztah 4.2) byly použity hodnoty, které jsou zobrazeny na obr. 5-3:

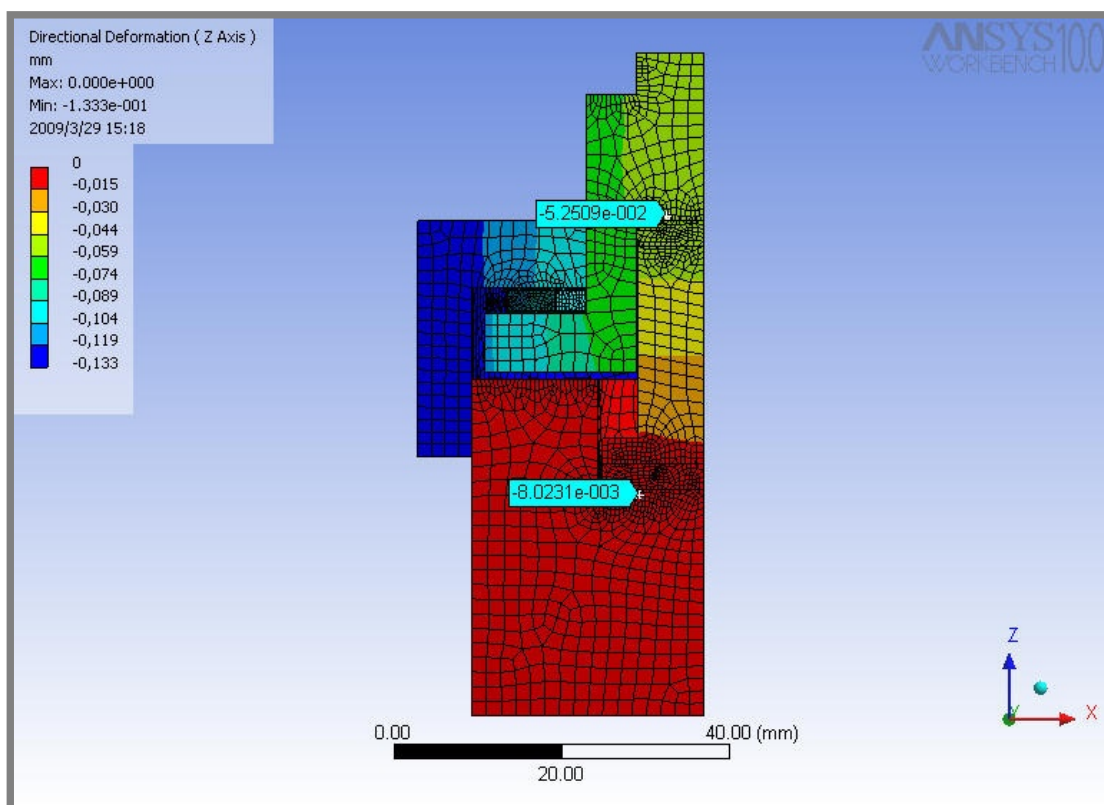
$$\Delta u_{\text{tah}} = u_1 - u_2 = 4,49 \times 10^{-2} - 5,73 \times 10^{-4} = 0,044327 \text{ mm}$$

V dalším kroku bylo iteračně hledáno takové zatížení matice, které by způsobilo stejně velkou deformaci v prostoru čepu v opačném směru zatěžování (při pomyslném utahování matice), aby došlo k vyrovnání deformací vzniklých při maximálním zatížení tahovou silou a nenastala vůle mezi vzorkem a keramikou destičkou. Způsob zatížení matice je zobrazen na obr. 5-4. Velikost síly, která odpovídá hledané deformaci je 15400 N na čtvrtinovém modelu. Výsledné rozložení deformací v ose modelu při zatížení výslednou silou je zobrazeno na obr. 5-5. Celková stanovená síla na čelist je tedy  $15400 \times 4 = 61600\text{N}$ .



Obr. 5-4 Obrázek zatížení simulující utahení matice





Obr. 5-5 Deformace čelistí při utahení matice

Výpočet deformace při utahení matice – stanoveno na základě výsledků na obr. 5-5

$$\Delta u_{\text{utah}} = u_1 - u_2 = -5,25 \times 10^{-2} - (-8,02 \times 10^{-3}) = -0,04448 \text{ mm},$$

což je hodnota odpovídající vůli  $\Delta u_{\text{tah}}$  při zatížení tahem.

Z velikosti vypočítané osové síly, kterou musí matice stlačit čelisti, je vypočítána velikost utahovacího momentu  $M_U$  podle vztahů 3.1, 3.2 a 3.3.

$$M_{M/H} = 61600 \times \frac{40}{2} \times 0,15$$

$$M_{M/H} = 184800 \text{ Nmm}$$

Při výpočtu třecího momentu v dosedací ploše  $M_{M/H}$  byla dosazena za  $F_s$  – velikost zatěžující síly vypočtené pomocí MKP, za  $d_s$  přibližný střední průměr stykové plochy matice a keramickými destičkami, byl zvolen  $\varnothing 40$  mm, za  $f_{M/H}$  velikost součinitele tření ve stykové ploše mezi maticí a keramickými podložkami. Hodnota  $f_{M/H}$  byla zvolena 0,15.

$$M_Z = 61600 \times \frac{55,350}{2} \times \left( \frac{1,25}{\pi \times 55,350} + \frac{0,2}{\cos \frac{60}{2}} \right)$$

$$M_Z = 405957 \text{ Nmm}$$

Při výpočtu třecího momentu v závitech  $M_Z$  při utahování šroubového spoje bylo dosaženo za  $F_s$  velikost zatěžující síly, vypočtené pomocí MKP, za  $d_2$  velikost středního průměru závitu ( $\varnothing 55,350$  mm), za  $P_h$  stoupání závitu 1,25 mm, za  $f_Z$  součinitel tření v závitech. Jelikož se jedná o suchý obrobený povrch, tak byla zvolena velikost  $f_Z = 0,2$ . Za  $\beta$  velikost vrcholového úhlu profilu závitu  $60^\circ$ .

$$M_U = 184800 + 405957 = 590757 \text{ Nmm}$$

Hodnota výsledného utahovacího momentu je 590,757 Nm. Tato hodnota je na první pohled značná. Po konzultaci s techniky ÚFM se ale ukázalo, že tato hodnota je reálná. Praktický postup utahování totiž probíhá za pomoci klíče M72 jenž má více než 0,5 m dlouhou rukojeť. Navíc je využito maximálně možné síly jež je technik vůbec schopen vyvinout, přičemž se využívá v poslední fázi utahování i dynamického trhnutí, do kterého vloží technik veškerou svoji váhu i fyzickou sílu. Podle zkušeností techniků je tento namáhavý způsob upnutí nutný k dostatečnému dotažení zkušební tělesa. Velikost dynamického momentu jež působí při upínání vzorku na matici, lze jen stěží odhadnout. Snadno lze odhadnout, že kdyby technik nevyužíval veškerý svůj fyzický potenciál a působil by pouze statickou silou dosáhl by utahovacího momentu nejméně 250 Nm. Vzhledem ke skutečnosti, že ke správnému upnutí je zapotřebí několikanásobného „škubnutí“ za využití všech fyzických možností obsluhujícího technika, není vypočítaná hodnota utahovacího momentu 590 Nm nereálná.

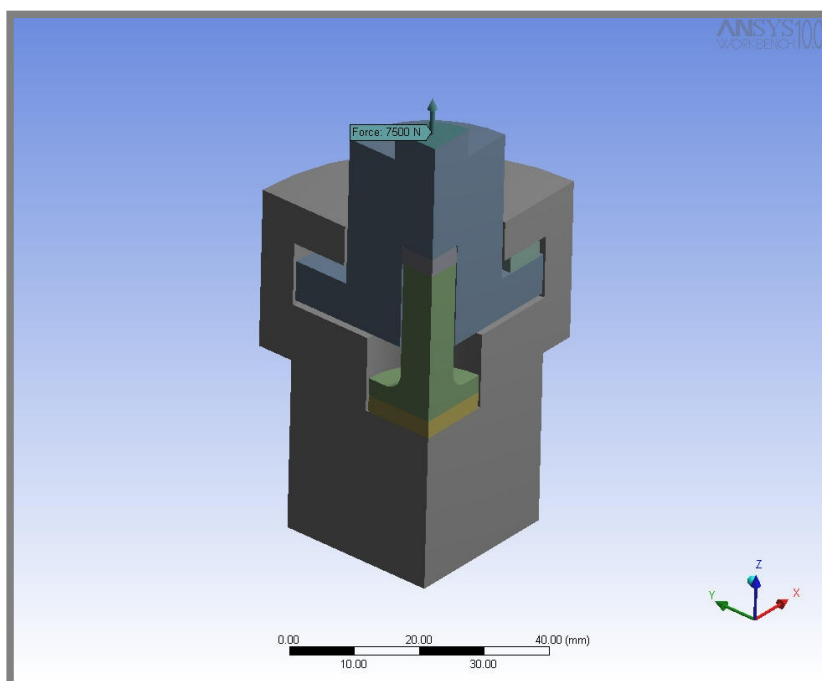
Právě tento problematický a necitlivý způsob upínání je příčinou občasného praskání izolačních keramických destiček. Proto byla další část řešení zaměřena na zmenšení nezbytného utahovacího momentu a tím také na citlivější dotažení experimentálního tělesa, jenž by ve výsledku vedlo k méně častému výskytu poruch keramických destiček a tím také k větší spolehlivosti prováděných zkoušek.

### 5.1.3 Nově navržené řešení upínacích čelistí

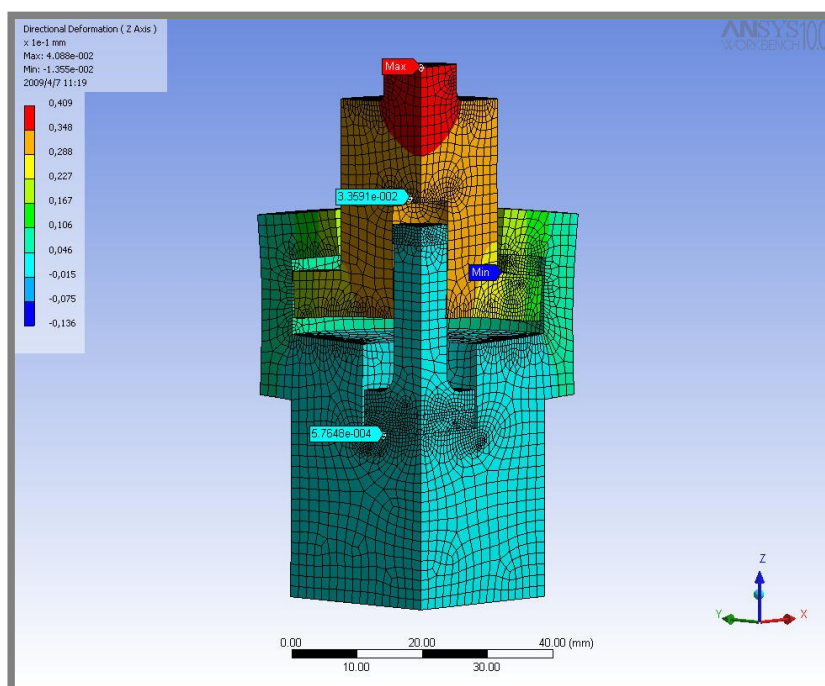
Z výpočtu utahovacího momentu při zatížení za pokojové teploty mimo jiné vyplývá, že stávající řešení je nedostatečné, protože není možné zaručit, že při průběhu únavové zkoušky nedojde k situaci, kdy vznikne mezi součástmi čelistí vůle. Z tohoto důvodu byly navrženy úpravy stávajících čelistí. Navrhované změny čelistí byly voleny tak, aby se dotkly co nejmenšího počtu dílů a tím pádem byly také co nejlevněji a nejrychleji dosažitelné.

Navrhované úpravy se týkají vložky poz. 3 a čepu poz. 4 na obr. 1-12. Vložka byla upravena tak, aby se v rámci dostupných možností zvětšila její tuhost, která je

rozhodující pro deformaci při tahovém zatěžování. Jedná se především o změny průměrů zvětšení  $\varnothing 28$  na  $\varnothing 32$ ,  $\varnothing 52$  na  $\varnothing 54$  a zmenšení  $\varnothing 19$  na  $\varnothing 12$  viz výkres součásti v příloze. Následkem úpravy rozměrů vložky bylo nutné změnit rozměry čepu. Jedná se o zmenšení  $\varnothing 15,5$  na  $\varnothing 11,5$  a přechod z  $\varnothing 11,5$  na  $\varnothing 24$  bude zaoblen rádiusem R2. Nový výpočtový model je zobrazen na obr. 5-6. V důsledku navrhovaných úprav, bylo předpokládáno snížení velikosti utahovacího momentu, kterým se upíná zkušební vzorek.



Obr. 5-6 Zatížení čelistí tahem

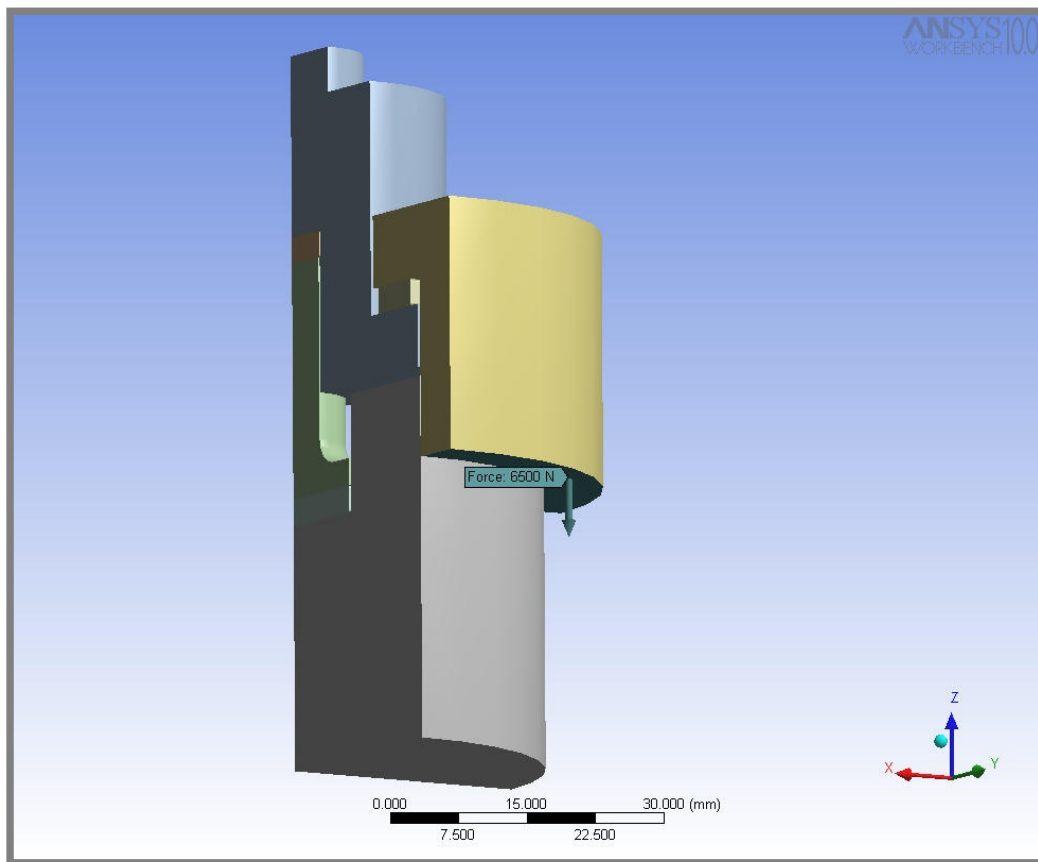


Obr. 5-7 Zobrazení velikosti vůle vzniklé při zatížení tahem

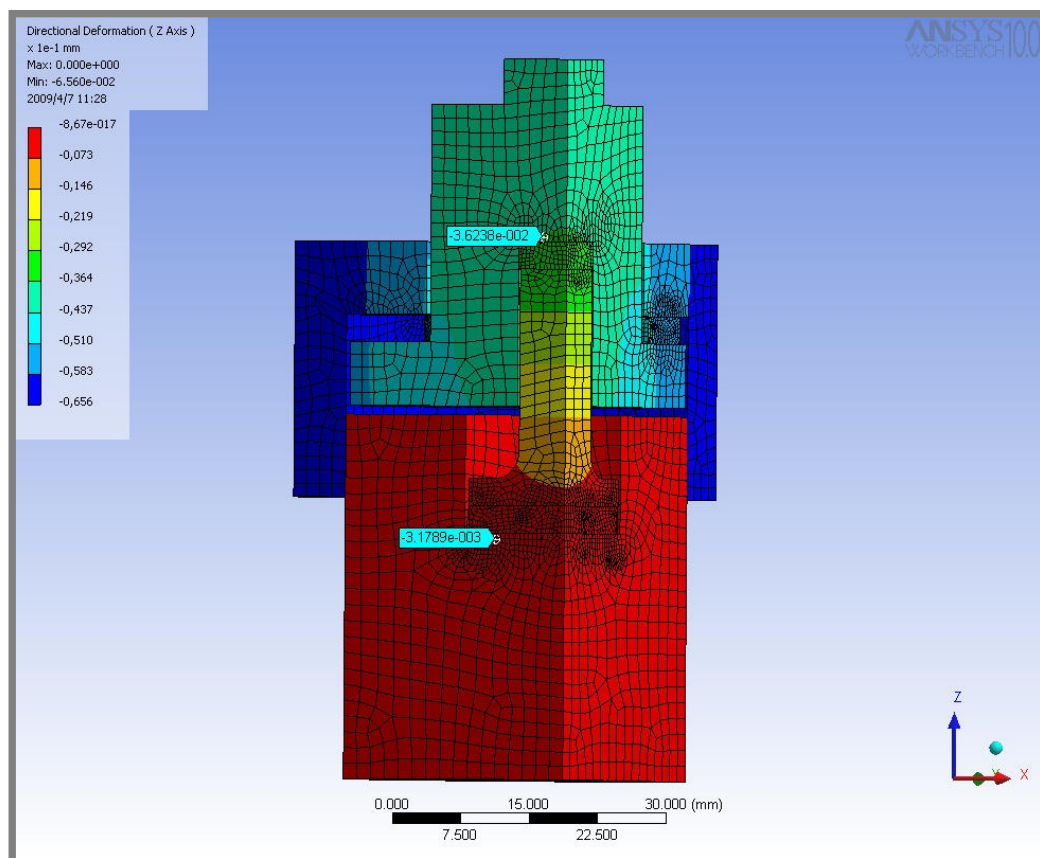
Upravený model čelistí byl znovu podroben konečnoprvkové analýze zatížení modelu je zobrazeno na obr. 5-6 a vypočítané hodnoty posunutí v osovém směru, pomocí nichž byla zjištěna velikost vůle v oblasti čepu, jsou zobrazeny na obr. 5-7:

$$\Delta u_{\text{tah}} = u_1 - u_2 = 3,36 \times 10^{-2} - 5,76 \times 10^{-4} = 0,033024 \text{ mm}$$

Poté bylo opět iteračně hledáno takové zatížení matice, které by dosáhlo stejné deformace v opačném směru zatěžování, aby došlo k vyrovnání těchto deformací a nenastala vůle mezi vzorkem a keramikou destičkou. Nově zjištěná velikost síly, která odpovídá deformaci je 6500 N, viz obr. 5-8, na čtvrtinovém modelu. => celková síla je  $6500 \times 4 = 26000\text{N}$ .



Obr. 5-8 Obrázek zatížení při utahení matice



Obr. 5-9 Deformace čelistí, při utažení matice

Při utahování matice byla zjištěna hodnota deformace v oblasti čepu viz obr. 5-9:

$$\Delta u_{\text{utah}} = u_1 - u_2 = -3,62 \times 10^{-2} - (-3,18 \times 10^{-3}) = -0,03302 \text{ mm}$$

Z velikosti vypočítané síly, kterou musí matice stlačit čelisti, byla vypočítána podle vztahů 3.1, 3.2 a 3.3 velikost utahovacího momentu  $M_U$ .

$$M_{M/H} = 26000 \times \frac{40}{2} \times 0,15$$

$$M_{M/H} = 78000 \text{ Nmm}$$

$$M_z = 26000 \times \frac{55,350}{2} \times \left( \frac{1,25}{\pi \times 55,350} + \frac{0,2}{\cos \frac{60}{2}} \right)$$

$$M_z = 171345,49 \text{ Nmm}$$

$$M_U = 78000 + 171345,49 = 249345,49 \text{ Nmm}$$

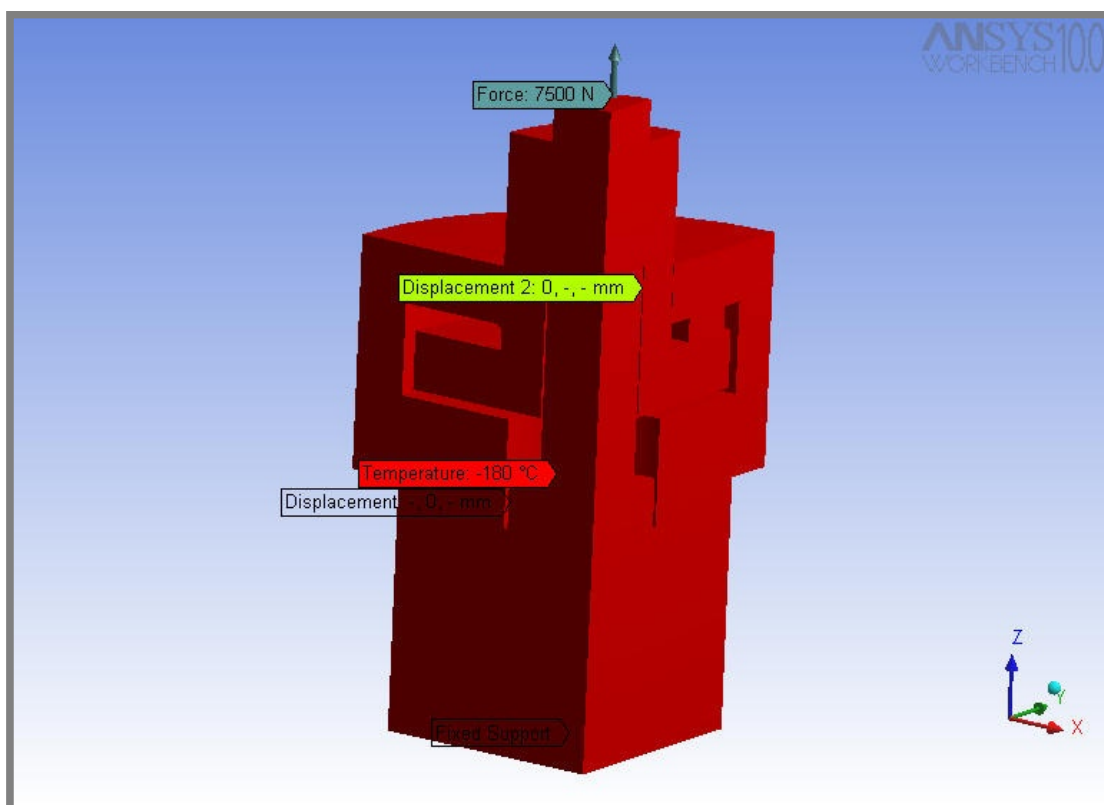
Hodnota výsledného vypočítaného utahovacího momentu je 250 Nm, což je hodnota relativně vysoká, ale lze ji dosáhnout kvazistatickým utahováním bez dynamického působení (škubání) během utahování zkušební tělesa. Tím se zvětší citlivost při upínání vzorku a zmenší pravděpodobnost porušení, než při dynamickém namáhání citlivých izolačních keramických destiček. Navrhovaná varianta předpokládá úpravu pouze dvou dílů čelistí, vložky a čepu, čímž je splněna podmínka minimálního zásahu do konstrukce čelistí.

Pokud bychom vyžadovali další snížení utahovacího moment čelistí (pro danou funkci již, ale není nutné), bylo by třeba zásadně změnit geometrii stávajících čelistí, či ještě lépe navrhnout zcela jiné konstrukční řešení čelistí.

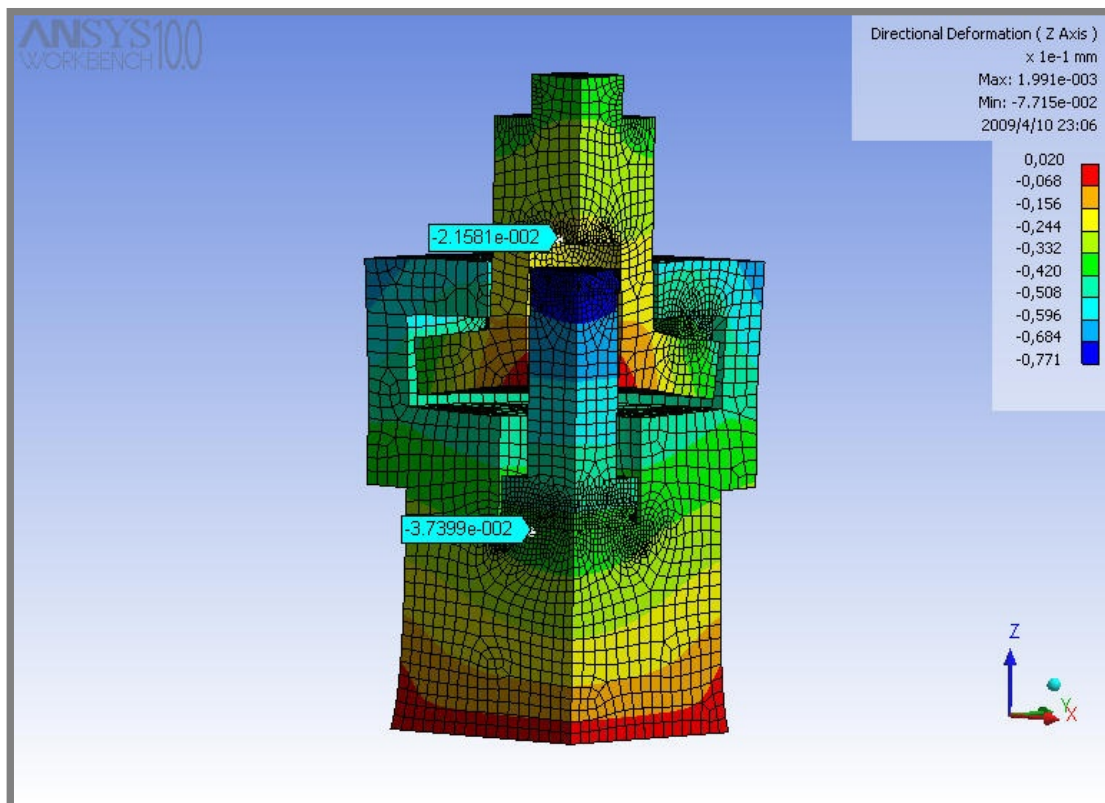
## 5.2

## 5.2 Výpočet utahovacího momentu při zatížení za teploty $-180^{\circ}\text{C}$

Zatížení čelistí a okrajové podmínky při výpočtu za teploty  $-180^{\circ}\text{C}$  jsou zobrazeny na obr. 5-10. Maximální zatížení čelistí je realizováno silou o stejné velikosti jako při výpočtu za pokojové teploty.



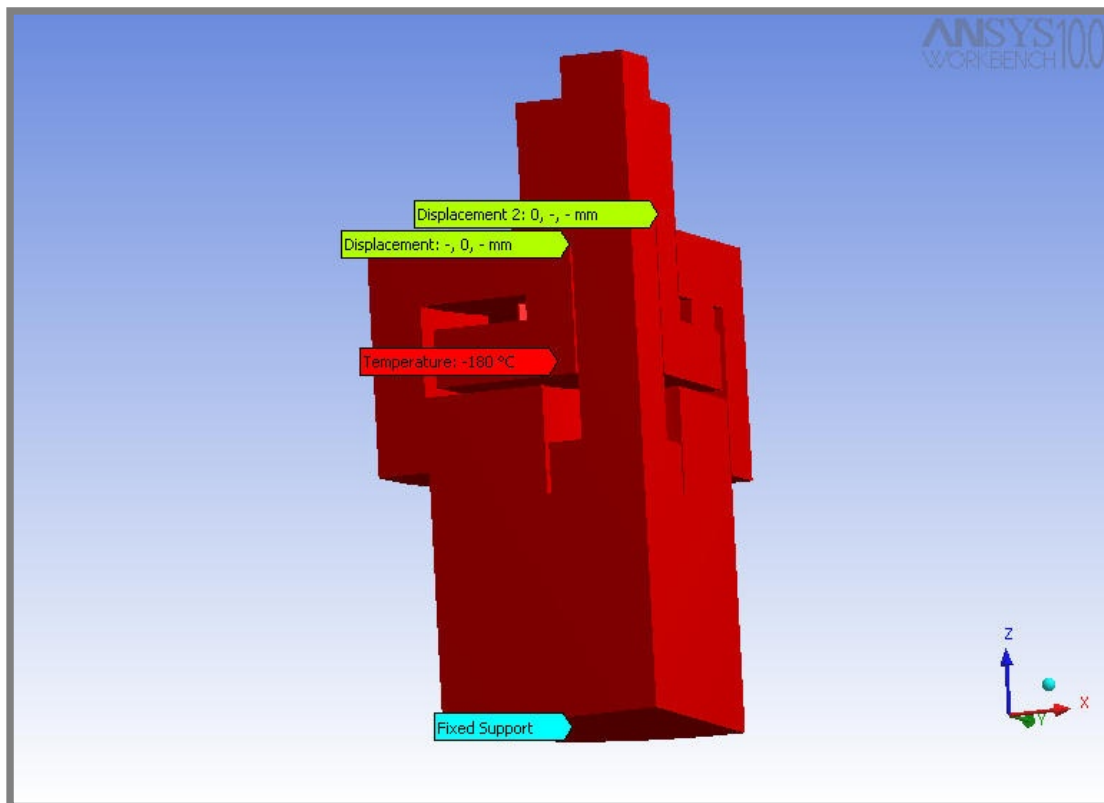
Obr. 5-10 Okrajové podmínky čelistí při zatížení tahem za nízkých teplot



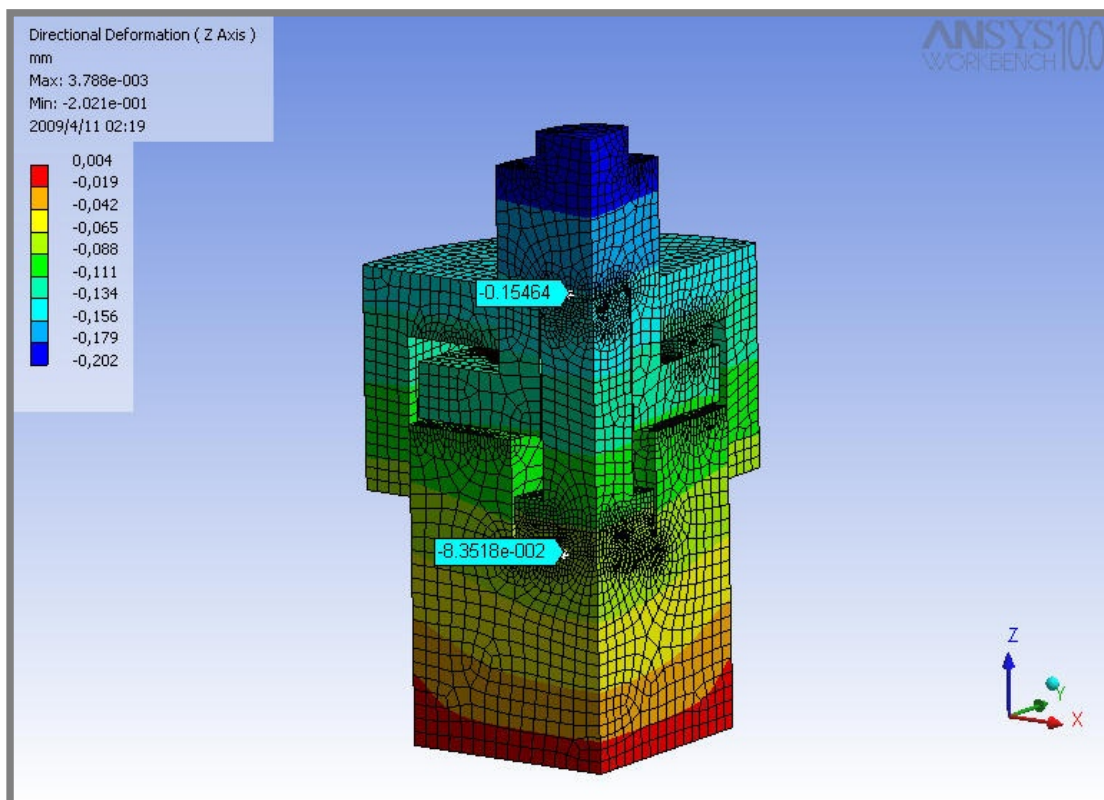
Obr. 5-11 Výsledky deformace ve svislé ose z.

Výpočet vůle mezi vzorkem a keramickou destičkou, hodnoty které byly dosazeny jsou získány z výsledku numerického výpočtu uvedeného na obr. 5-11.

$$\Delta u_{\text{tah}} = u_1 - u_2 = -2,16 \times 10^{-2} - (-3,74 \times 10^{-2}) = 0,0158 \text{ mm} \quad (5.1)$$



Obr. 5-11 Zatížení čelistí za nízkých teplot



Obr. 5-12 Deformace při nízké teplotě



Hodnoty pro výpočet deformace čelistí při nízké teplotě byly získány z výsledku výpočtu viz obr. 5-12. Na obr. 5-11 jsou zobrazeny okrajové podmínky numerického výpočtu.

$$\Delta u_{\text{tah}} = u_1 - u_2 = -0,155 - (-8,35 \times 10^{-2}) = -0,0715 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Z vypočítaných hodnot je zřejmé, že deformace způsobená tepelným zatížením  $-180^\circ\text{C}$  je vždy v absolutní hodnotě větší, než k jaké dojde vlivem působení zatěžující síly 30 kN, viz vztahy 5.1 a 5.2. Důsledkem je, že při zatěžování čelistí za nízkých teplot nedojde k vytvoření vůle i v případě, že matice bude dotažena pouze minimálním utahovacím momentem, nezbytným pro vymezení vůlí a upevnění vzorku.

Na základě výše uvedeného byl pro únavové zkoušky za nízké teploty  $-180^\circ\text{C}$  zvolen utahovací moment 10 Nm. Aby bylo zjištěno zatížení izolujících keramických destiček za nízkých teplot bylo nutné utahovací moment přepočítat na osovou sílu v závitu. Velikost síly byla odvozena ze vztahů pro výpočet velikosti utahovacího momentu 3.1, 3.2 a 3.3:

$$F_s = \frac{M_U}{\frac{d_s}{2} \times f_{MH} + \frac{d_2}{2} \times \left( \frac{P_h}{\pi \times d_2} + \frac{f_z}{\cos\beta} \right)}$$

$$F_s = \frac{10000}{\frac{40}{2} \times 0,15 + \frac{55,350}{2} \times \left( \frac{1,25}{\pi \times 55,350} + \frac{0,2}{\cos 30} \right)}$$

$$F_s = 505,8 \text{ N}$$

Poznamenejme, že na ÚFM byla při zadání diplomové práce zkušenost s funkcí analyzovaných čelistí za pokojové teploty. Z této zkušenosti vyplývaly obavy o funkci čelistí při testech za velmi nízkých teplot, jež měly následovat. Pozitivní informace a výsledky zde uvedeného výpočtu byly pracovníkům ÚFM poskytnuty ještě před odevzdáním diplomové práce, a na jejich základě bylo přistoupeno k testům za teploty  $-180^\circ\text{C}$ , přičemž čelist byla dotažena pouze minimálně a spoléhalo se na to, že vlivem velkého ochlazení nedojde ke vzniku vůlí mezi vzorkem a čepem, tak jak predikoval výpočet. První testy za nízkých teplot, které proběhly v měsíci dubnu, ukázaly, že výpočet byl správný, a že k upnutí zkušební tělesa stačí pouze minimální utahovací moment a tedy, že smrštění čelistí je natolik značné, že vůle v soustavě nevznikají.

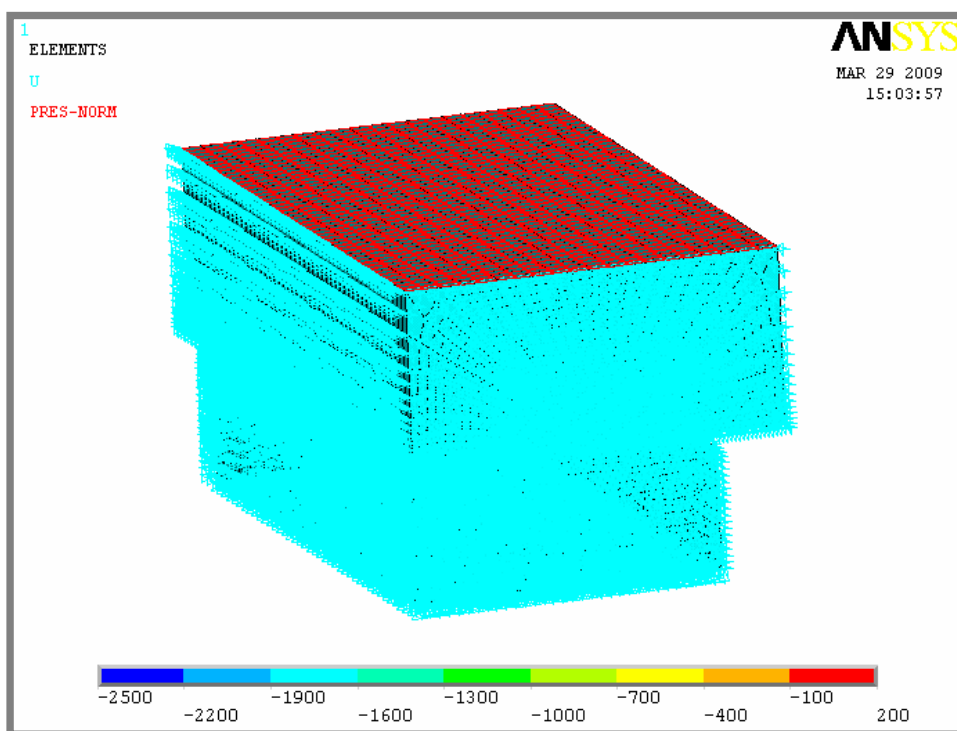
Další doplňující výpočty byly věnovány určení zatížení v nejrizikovějších částech čelistí tj. v izolačních keramických destičkách a vložce čelistí.

### 5.3 Statická analýza izolační keramické destičky

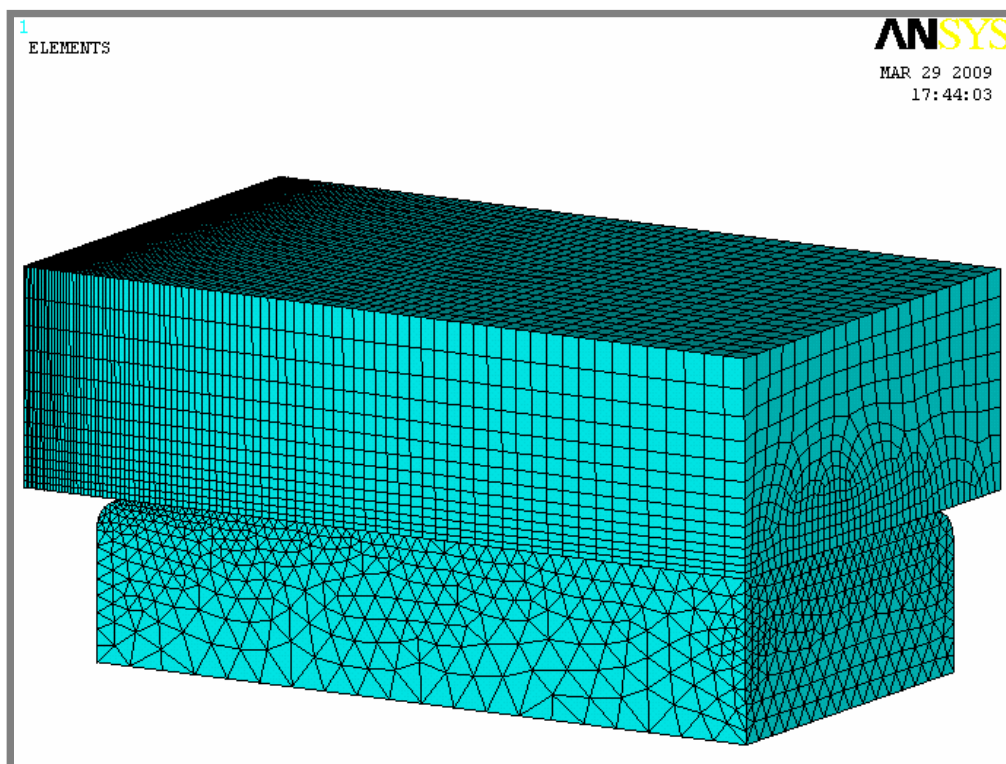
Po provedení statické analýzy čelistí byla provedena statická analýza nejvíce namáhaných součástí, tedy izolačních keramických destiček a vložky.

Z výsledků předchozích výpočtů byla získána velikost a průběh napětí a deformace v čelistech. Další část řešení práce se bude zabývat detailnějším popisem napětí na keramických destičkách mezi vložkou a maticí. Po konzultacích s techniky obsluhujícími zkušební stroj, jsou právě tyto destičky náchylné k porušení. Proto je nutné se zabývat napětím, kterým jsou keramické destičky zatíženy.

Pro výpočty byl použit program Ansys. Pro zjednodušení byla vymodelována osmina destičky a byly použity okrajové podmínky, které zaručují symetrii zatěžovaných součástí, viz obr. 5-13.



Obr. 5-13 Osmina destičky s okrajovými podmínkami



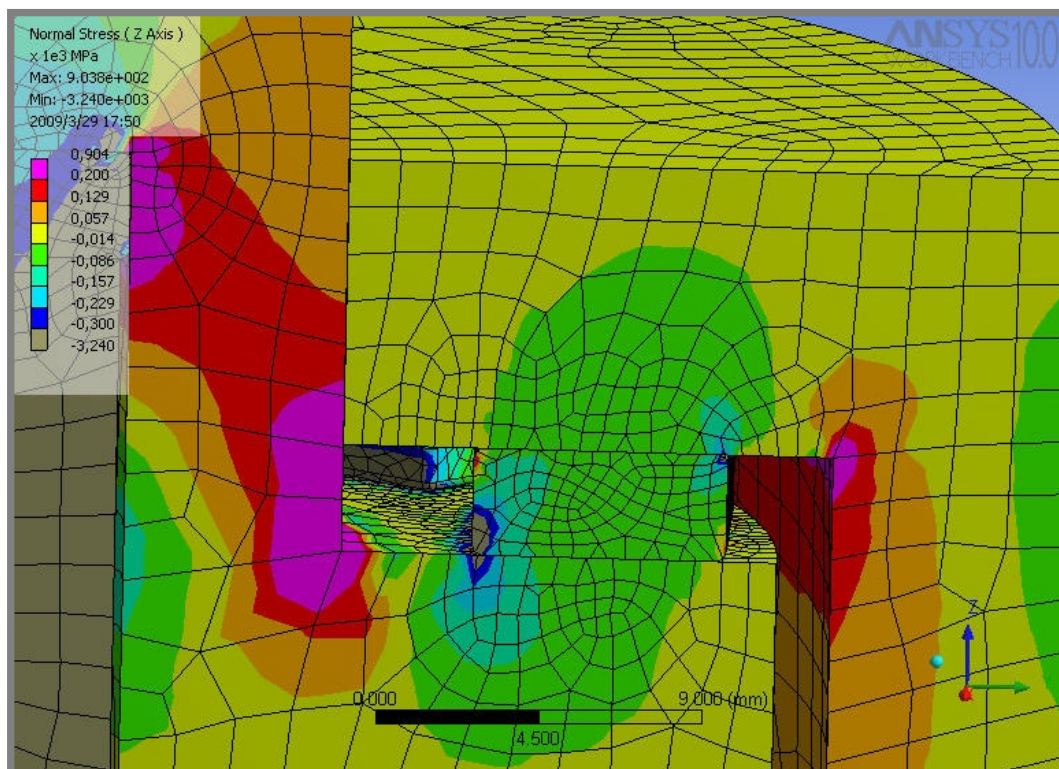
Obr. 5-14 Síť konečných prvků numerického modelu keramické destičky

Na modelu osminy destičky a části matice viz obr. 5-14 byla analyzována velikost napětí způsobující porušení destičky. Mezi maticí a destičkou byl nadefinován kontakt. Vzhledem k pravidelnému tvaru matice byla použita mapovaná síť. V případě destičky, která má zaoblené hrany, nebylo možné mapovanou síť použít a je tedy použita síť volná.

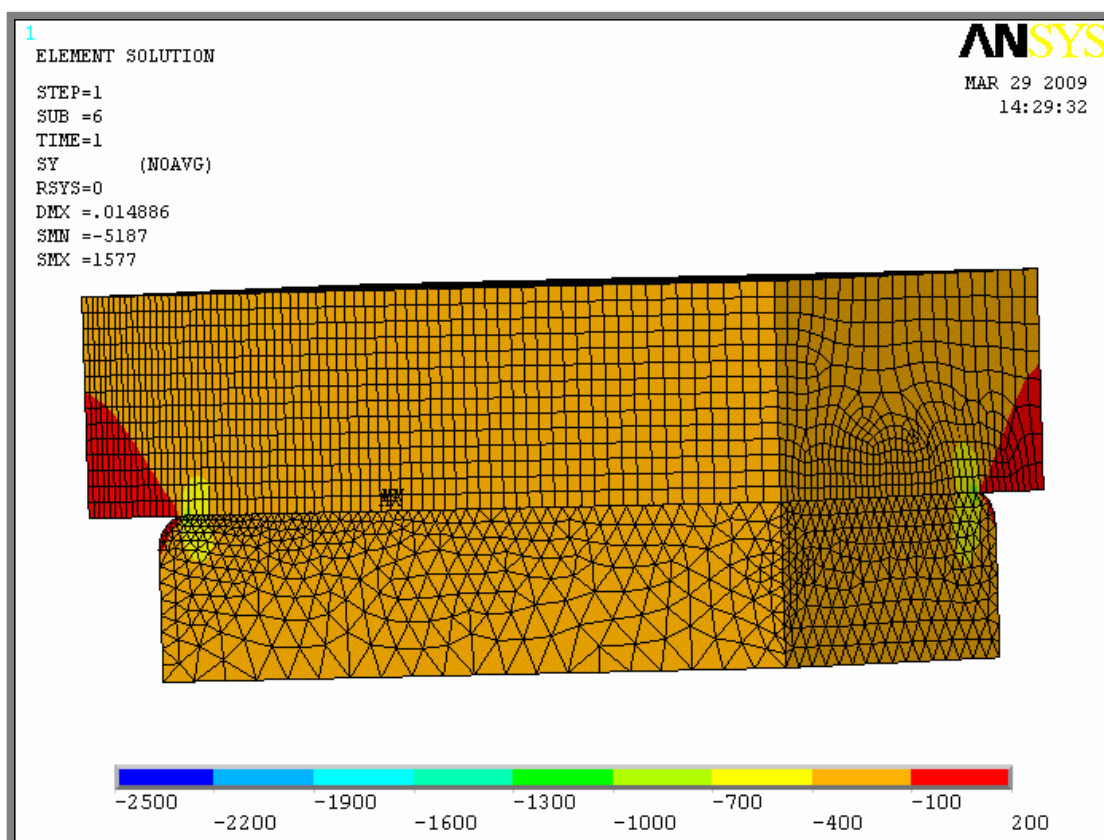
### 5.3.1 Numerická analýza stávajícího řešení

5.3.1

Pro výpočet napětí na destičce ve stávajícím stavu byly použity výsledky napětí, které byly získány při deformačně napjatostní analýze celých čelistí. Použité okrajové podmínky jsou zobrazeny na obr. 5-13. Hodnota napětí, která byla použita při výpočtu je 300 MPa, která odpovídá nejvyšší hodnotě zatížení destičky, viz obr. 5-15.

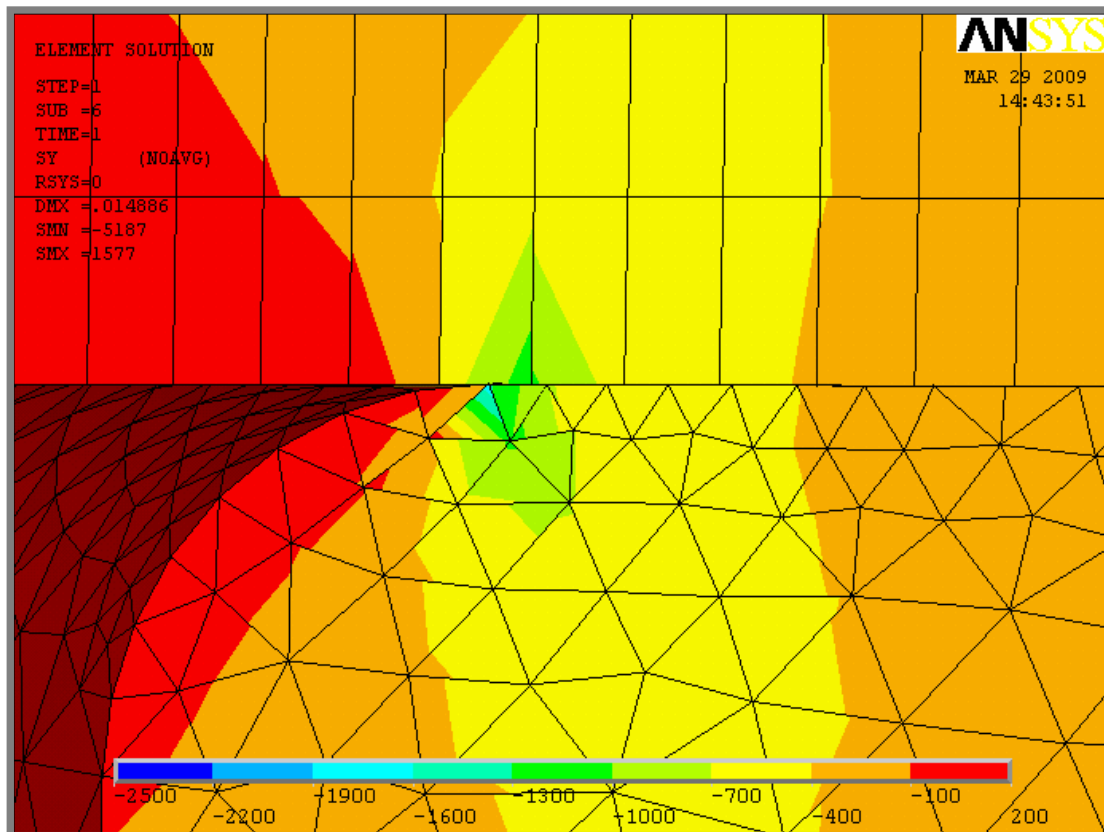


Obr. 5-15 Napětí v čelistech za pokojové teploty ve směru svislé osy z



Obr. 5-16 Celkový pohled na rozložení napětí na destičce ve směru svislé osy

Na obrázku 5-16, kde je zobrazen celkový pohled na rozložení napětí v izolační keramické destičce, přesnější odečtení výsledků bylo možné z obrázku detailu.

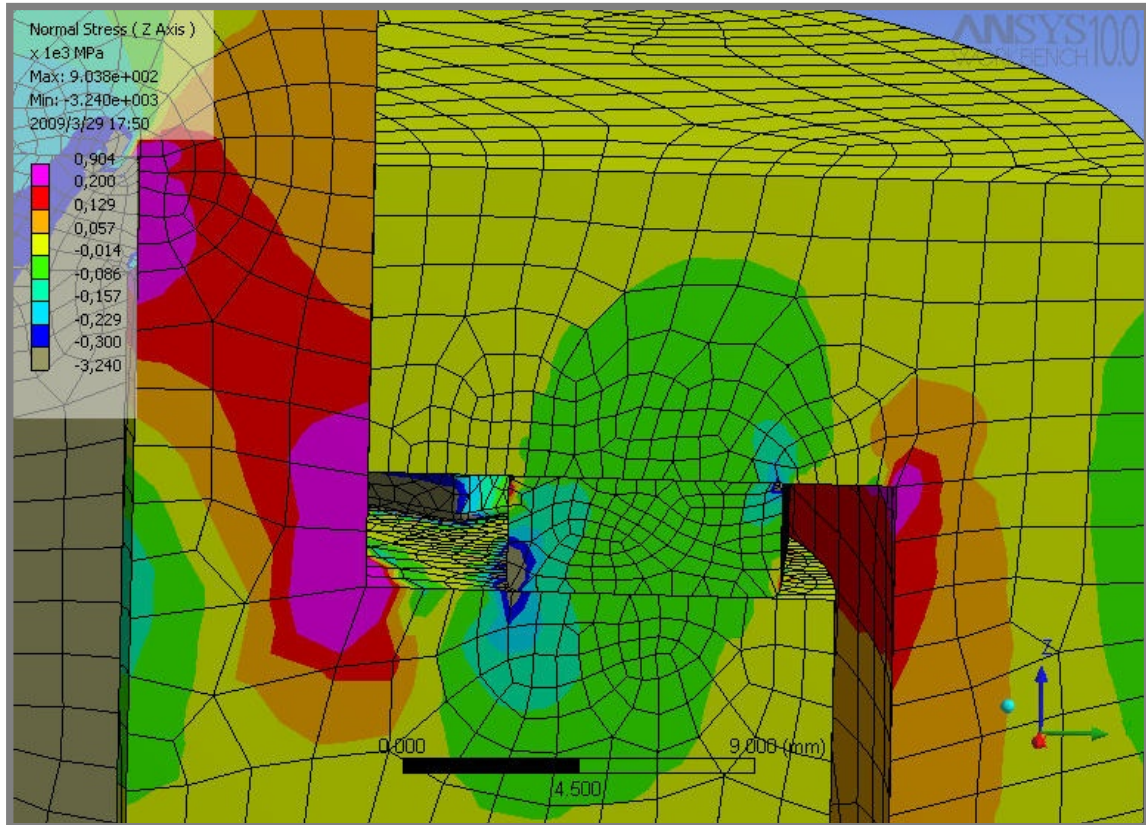


Obr. 5-17 Detailní pohled na rozložení maximálního napětí ve směru svislé osy

Na obrázku 5-17 detailního pohledu na rozložení napětí v kontaktu destičky a matice byla odečtena hodnota napětí, která dosahovala hodnot až -1900 MPa. Mez pevnosti v tlaku keramiky, ze které jsou izolační destičky vyrobeny, má hodnotu 3000 MPa. Takže by v tomto případě nemělo docházet k porušení destiček. Vypočítaná hodnota napětí je teoretická a ve skutečnosti v místě kontaktu hodnoty napětí nebudou dosahovat tak vysokých hodnot. Avšak v reálných podmínkách občas dochází k tomu, že keramická destička praskne. Tento nežádoucí stav nastává, zejména v případě, kdy je matice dotahována nerovnoměrným působením utahovacího momentu a v případě kdy je utahování prováděno dynamicky působící silou.

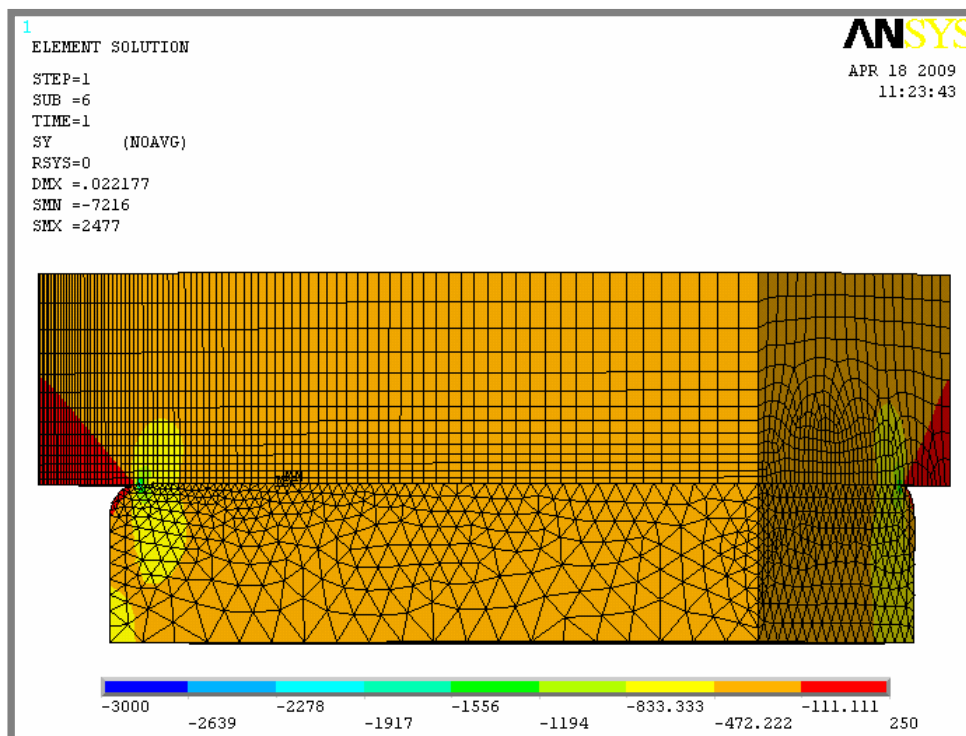
**5.3.2 Zatížení izolační keramické destičky za teploty  $-180^{\circ}\text{C}$** 

Při výpočtu napětí za nízké teploty  $-180^{\circ}\text{C}$  na destičce bylo postupováno obdobně, jako při výpočtu za pokojové teploty, kdy bylo použito zatěžující napětí 300 MPa, které bylo získáno při deformačně napjatostní analýze čelistí (obr. 5-18).



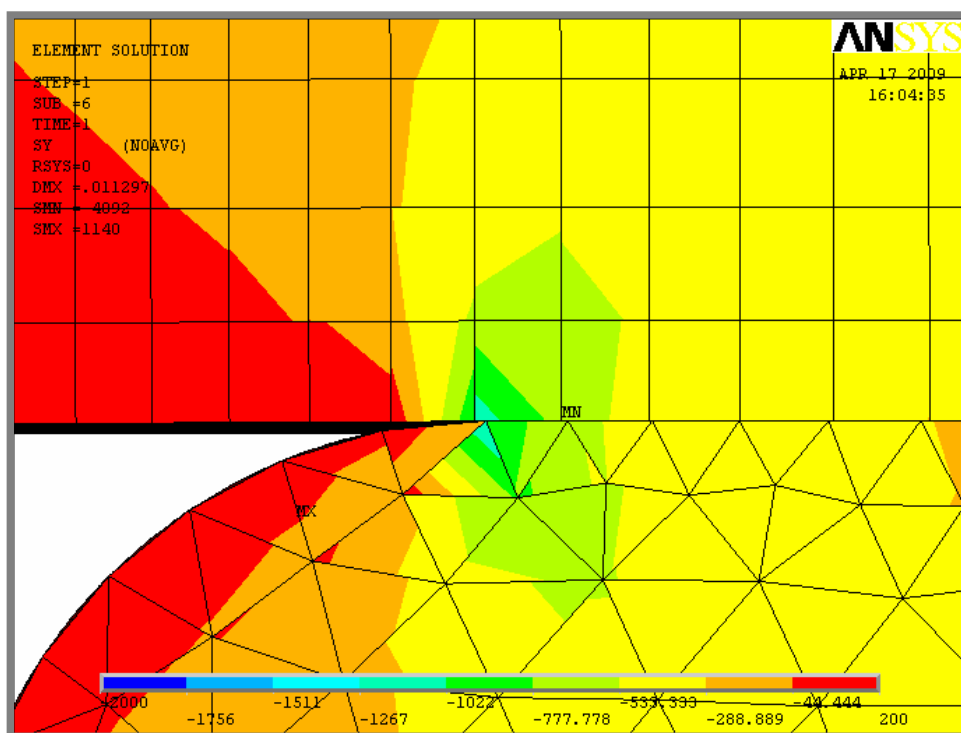
Obr. 5-18 Napětí v čelistech za pokojové teploty ve směru svislé osy z

Obdobně jako při statické analýze za pokojové teploty byla na modelu osminy destičky a části matice analyzována velikost napětí. Model destičky a části matice byl totožný, při výpočtu byly stejné okrajové podmínky, pouze byla změněna velikost zatížení působícího na součásti, jehož velikost byla odečtena z výsledku řešení na obr. 5-18 a výpočet byl proveden za teploty  $-180^{\circ}\text{C}$  viz obr. 5-19.



Obr. 5-19 Celkový pohled na rozložení napětí v destičce ve směru svislé osy při zatížení při teplotě  $-180^{\circ}\text{C}$

Na obrázku 5-19, je zobrazen celkový pohled na rozložení napětí v destičce a matici. Na obr. 5-20 je zobrazeno napětí v nejnamáhanějším místě izolační destičky.



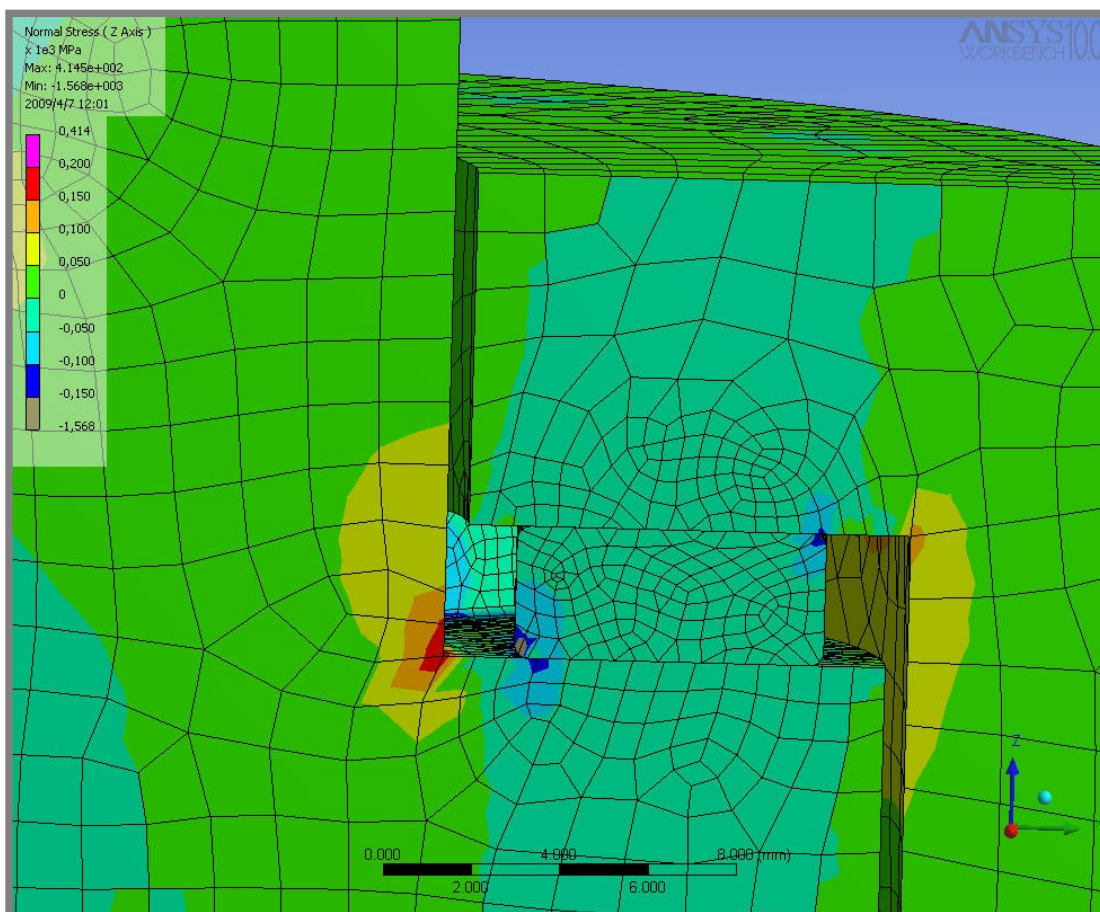
Obr. 5-20 Detailní pohled na rozložení maximálního napětí ve směru svislé osy při zatížení při teplotě  $-180^{\circ}\text{C}$

Z detailu obrázku rozložení napětí ve svislé ose při teplotě  $-180^{\circ}\text{C}$  byly odečteno napětí v kontaktu, které dosahovalo hodnoty až  $-1267\text{ MPa}$ . Tato hodnota není nikterak malá, ale mechanické vlastnosti keramiky dovolují i vyšší zatížení, nemělo by tedy docházet k praskání izolačních destiček, pokud budou zatěžovány rovnoměrným zatížením.

## 5.3.3

### 5.3.3 Nově navržené řešení upínacích čelistí

Pro výpočet napětí v destičce upravených čelistí byly použity výsledky napětí, které byly získány při deformačně napjatostní analýze, kdy byly zvětšeny rozměry vložky za účelem zvýšení jejich tuhosti, viz obr. 5-21. Napětí, které bylo použito při výpočtu, má hodnotu  $150\text{ MPa}$ , přestože na obrázku je v místě zaoblení destičky napětí vyšší, toto napětí nebylo uvažováno při výpočtu, protože se jedná o hodnotu napětí, které je ovlivněno zaoblením destičky, které zde působí jako koncentrátor napětí.

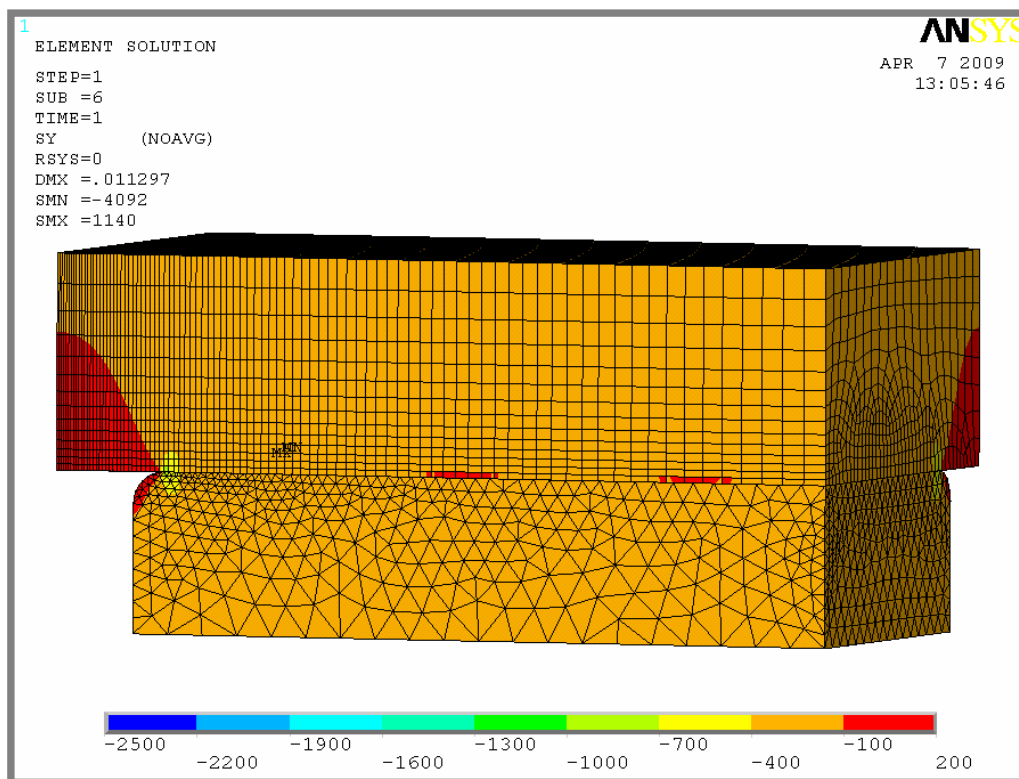


Obr. 5-21 Napětí na čelistech za pokojové teploty ve směru svislé osy z

Na modelu osminy destičky a části matice byla analyzována velikost napětí. Z důvodu možnosti porovnání výsledků byl opět použit stejný model jako v předchozím případě, okrajové podmínky zůstaly shodné jako v případě výpočtu

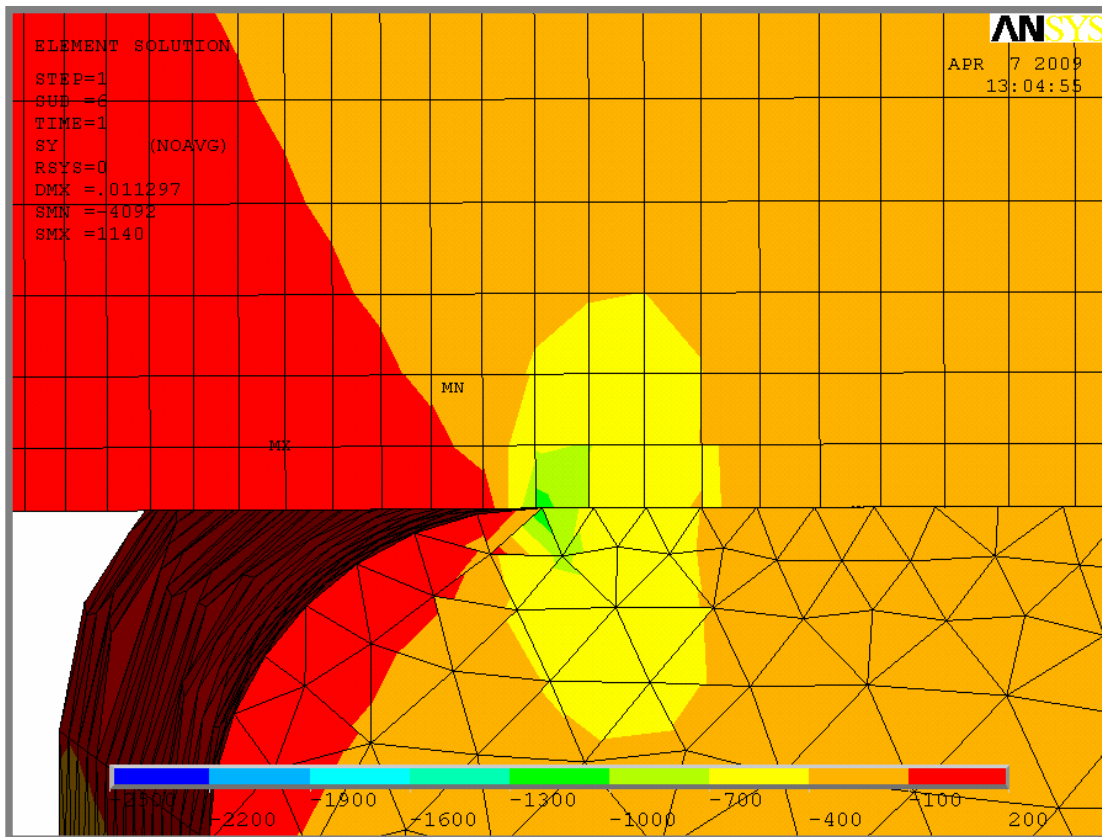


stávajících čelistí, pouze bylo upraveno zatížení součástí. Okrajové podmínky výpočtu jsou zobrazeny na obr. 5-13.



Obr. 5-22 Celkový pohled na rozložení napětí v destičce ve směru svislé osy

Na obrázku 5-22, na kterém je zobrazen celkový pohled na rozložení napětí v destičce ve směru svislé osy. Přesné odečtení hodnoty napětí je možné z detailu obrázku.



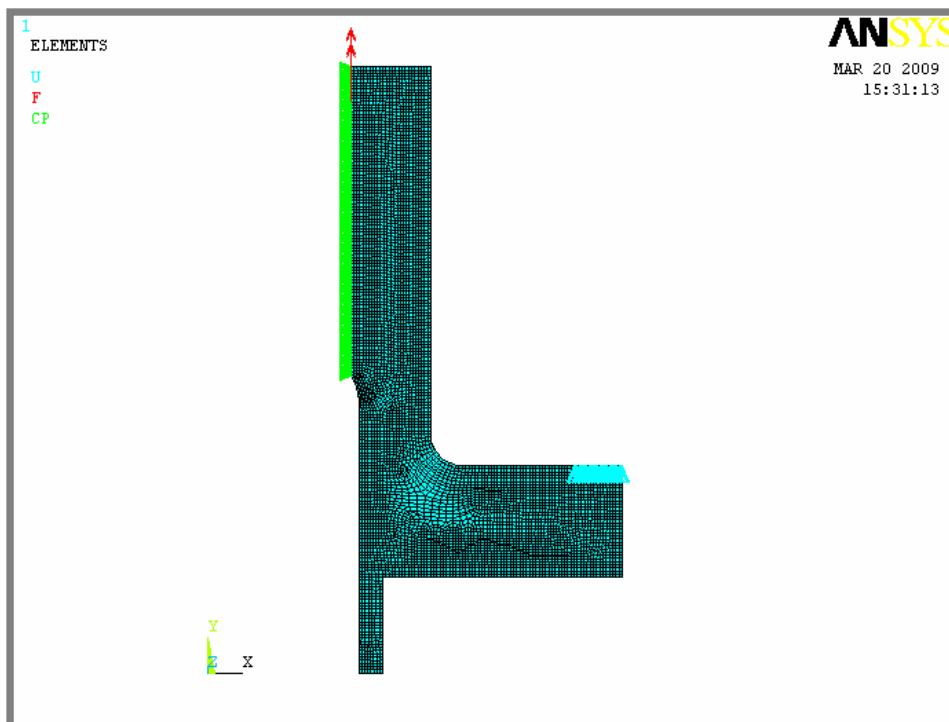
Obr. 5-23 Detailní pohled na rozložení maximálního napětí ve směru svislé osy

Na obrázku 5-23 detailu rozložení napětí v místě kontaktu ve směru svislé osy mezi destičkou a maticí byla v nejnamáhanějším místě izolační keramické destičky odečtena hodnota napětí -1300 MPa, na kterou se snížila z původních -1900 MPa. Při této hodnotě napětí nebude docházet k praskání destiček, pokud bude matice čelistí dotahována rovnoměrným utahovacím momentem. Působení rovnoměrného utahovacího momentu je zajištěno jeho snížením na hodnotu 249 Nm, čehož bylo dosaženo změnou konstrukce vložky a čepu.

## 5.4 Deformačně napjatostní analýza vložky čelistí

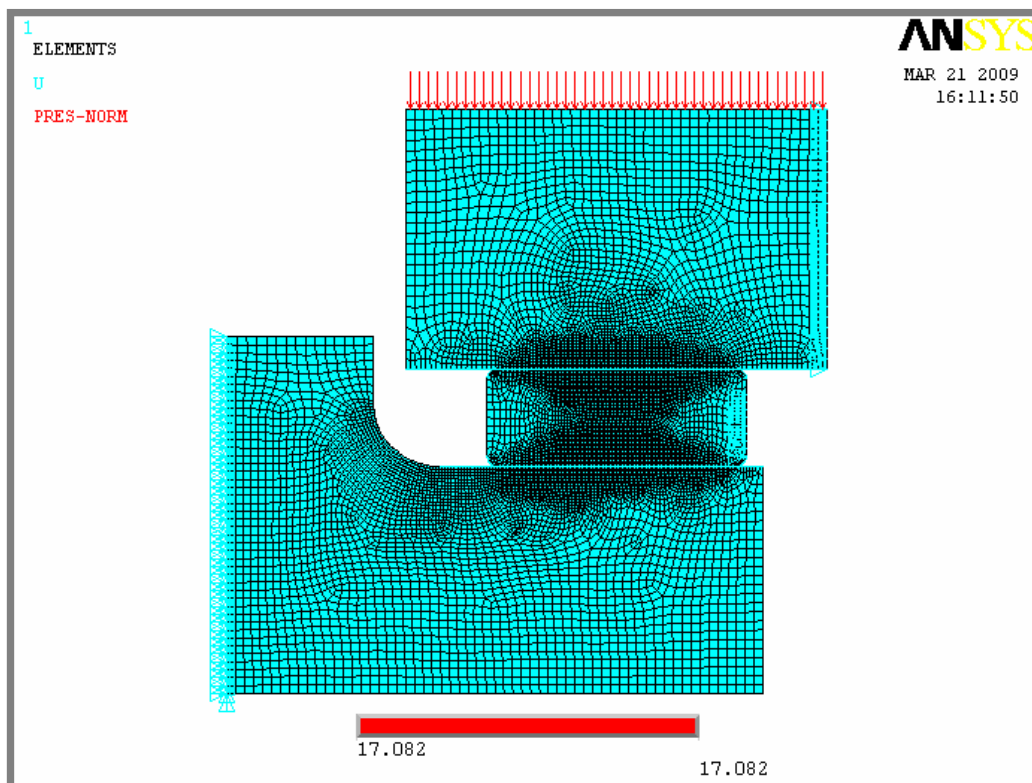
5.4

Po analýze napětí mezi izolační keramickou destičkou a maticí byla provedena analýza vložky, která také patří mezi vysoce namáhané součásti čelistí. Byl tedy proveden výpočet rovinného osově symetrického modelu vložky pozice 3 na obr. 1-12. Model byl zatížen silou 30 kN, která odpovídá maximální síle zkušebního stroje, v místě keramické destičky bylo zabráněno posuvu ve svislé ose. V horní části vložky bylo zabráněno deformaci ve vodorovné ose  $x$ , použitím couplingu viz obr. 5-24.

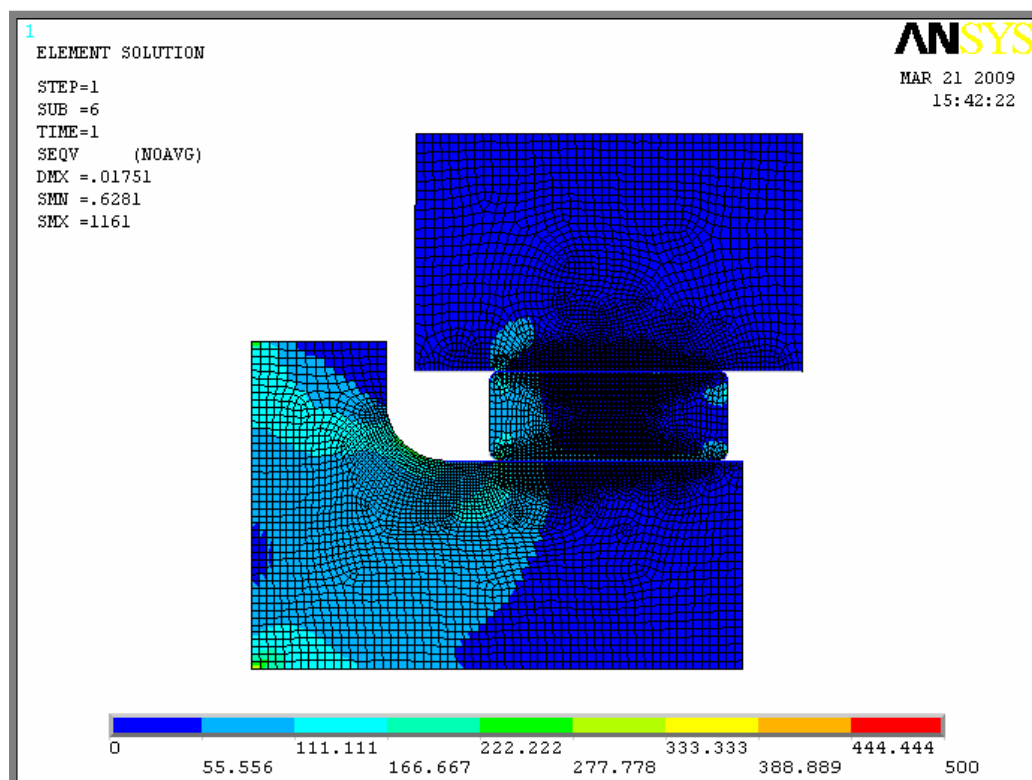


Obr. 5-24 Okrajové podmínky rovinného osově symetrického modelu vložky s jemnou sítí

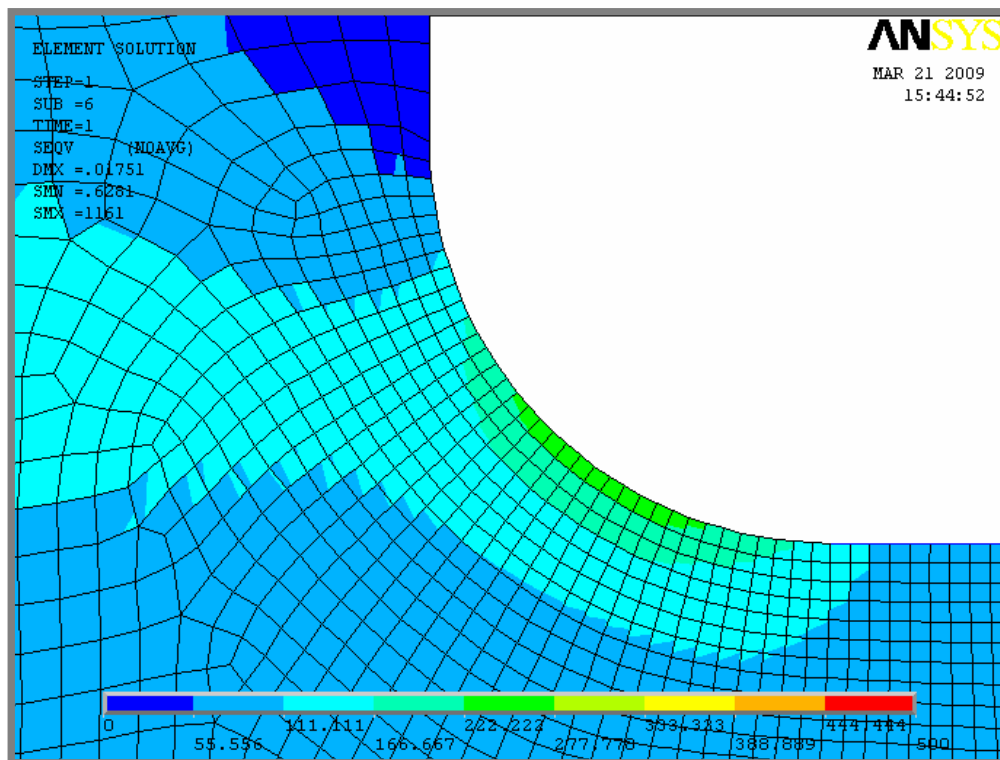




Obr. 5-26 Okrajové podmínky rovinného modelu se zaoblením 2 mm



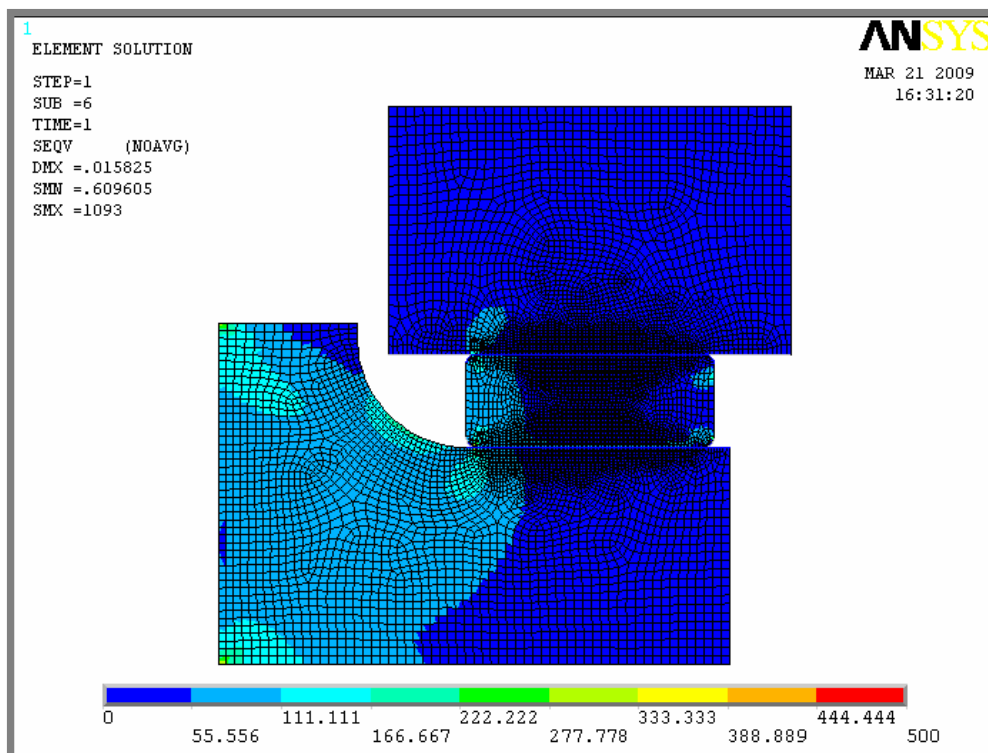
Obr. 5-27 Průběh redukovaného napětí na rovinném modelu se zaoblením 2 mm



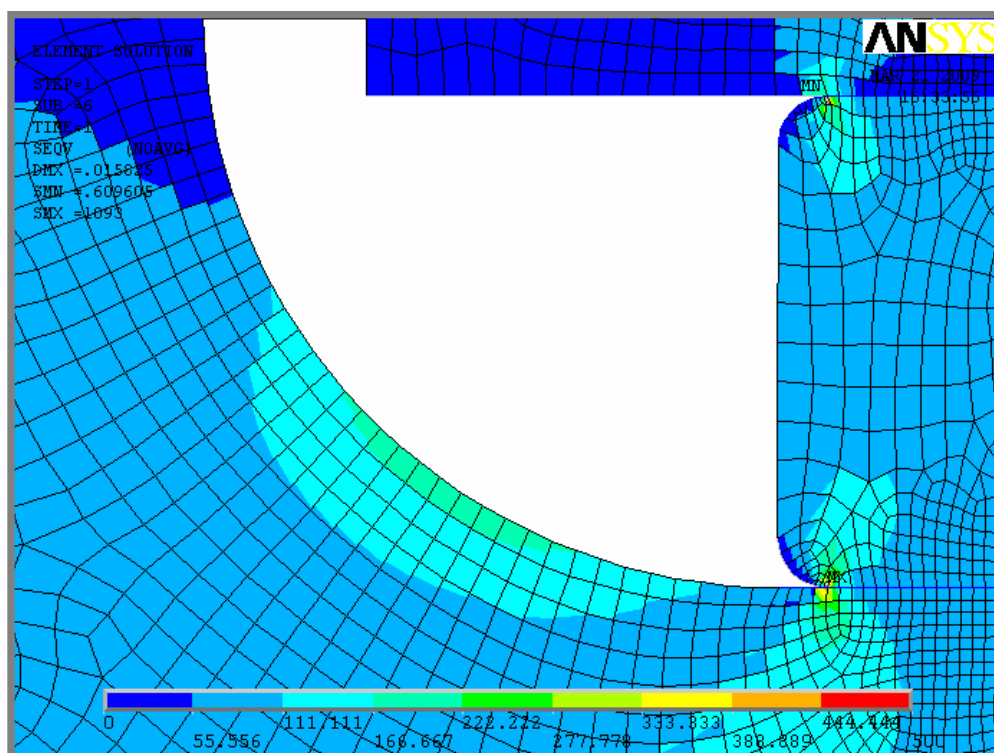
Obr. 5-28 Detail průběhu redukovaného napětí v místě max. koncentrace napětí

Na vložce bylo namodelováno zaoblení 2 mm, které je na skutečné součásti. Na obr. 5-27 je zobrazen výsledek rozložení napětí na rovinném modelu. Přesnější odečtení hodnot je možné z detailu na obr. 5-28, kde dosahuje maximální hodnota redukovaného napětí až 278 MPa.

Přestože napětí nedosahovalo meze kluzu, vzhledem k tomu že je součást cyklicky namáhána, po určitém počtu cyklů se na ní vyskytly únavové trhliny. Jako opatření proti tomuto nežádoucímu jevu bylo navrženo opatření, které tento stav odstraní a to takové, že zaoblení na vložce bude 3,5 mm, což je maximálně možná velikost poloměru zaoblení vzhledem k funkci součásti. Pokud by byl použit větší rádius zaoblení, nebylo by možné na vložku nalepit keramické destičky z důvodu nedostatku prostoru pro jejich umístění. Navrženou úpravou dojde ke snížení redukovaného napětí v oblasti zaoblení na hodnotu 222 MPa viz obr. 5-29 resp. 5-30.



Obr. 5-29 Průběh redukovaného napětí na rovinném modelu se zaoblením 3,5 mm



Obr. 5-30 Detail průběhu redukovaného napětí na rovinném modelu se zaoblením 3,5 mm

## 6 ZÁVĚR

Tématem předložené diplomové práce bylo stanovení provozních podmínek upínacích čelistí zkušebního stroje MTS 810, přičemž speciální pozornost měla být věnována zejména stanovení vhodného utahovacího momentu zkušební vzorku.

Popis řešeného problému: U speciálních čelistí zkušebního stroje MTS 810 určených ke zkouškám za pokojových i velmi nízkých teplot dochází k porušení izolačních keramických destiček vlivem značného utahovacího momentu nutného ke správnému upnutí zkušební vzorku. Porušení destiček vede ke znehodnocení celé únavové zkoušky a k nemalým finančním nákladům na opakování zkoušky, a nahrazení poškozených částí čelistí.

Na základě výše definovaného problému byly zvoleny následující cíle diplomové práce:

- a. statická analýza vybraných částí čelistí zkušebního stroje MTS 810 náchylných k porušení (vločka, izolující keramické destičky),
- b. posouzení jejich bezpečnosti při nízkých teplotách ( $-160^{\circ}\text{C}$ ), návrh vhodného utahovacího momentu pro utažení vzorku, tak aby nedošlo při ochlazení celé soustavy ke vzniku vůlí nebo poškození čelistí.
- c. Pro nezbytné numerické výpočty měl být použit MKP systém Ansys dostupný na Fakultě strojního inženýrství.

Postupně při řešení diplomové práce bylo upraveno zadání v tom smyslu, že čelisti budou provozovány za nízké teploty až  $-180^{\circ}\text{C}$  a ne za původně předpokládané teploty  $-160^{\circ}\text{C}$ . Z toho důvodu byla při řešení diplomové práce uvažována teplota  $-180^{\circ}\text{C}$ .

Geometrie modelu byla připravena v programu Solid Edge a samotný numerický výpočet probíhal v prostředí Ansys Workbench a Ansys Multiphysics. V Ansys Workbench byla provedena analýza napětí a deformací čelistí na dvou zjednodušených 3D modelech čelistí. Pomocí modelu namáhaného tahem byla zjištěna velikost deformace při maximálním zatížení. Pomocí druhého modelu, kdy byla matice zatěžována silou, kterou jsou čelisti stlačovány při utahování vzorku, byla stanovena velikost axiální síly taková, aby po superpozici uvedených dvou výpočtů bylo dosaženo nulové vůle mezi součástmi.

Zjednodušení v obou případech spočívalo v tom, že nebyl modelován závit mezi jednotlivými součástmi. Za pomoci numerického výpočtu byla v prvním případě stanovena vůle v prostoru čepu čelistí, která by vznikla při maximálním tahovém zatížení zkušební tělesa. Druhý numerický výpočet byl následně zaměřen na stanovení axiální síly v matici, jež je nezbytná při jejím utahování ke stlačení vložky v prostoru čepu o velikost vůle, která vznikne při tahovém namáhání. Takto stanovená velikost osové síly představuje v podstatě nezbytnou velikost „předepnutí“ vložky při utahování matice, aby při maximálním zatížení nevznikla vůle mezi čepem a zkušebním tělesem, jež by měla za následek znehodnocení měřených dat.

Na uvedených modelech byla provedena statická analýza napětí a deformací za pokojové i za nízké teploty a stanoveny hledané utahovací momenty matice.



Na základě výše popsaných výpočtů bylo zjištěno, že při zkouškách za nízkých teplot ( $-180^{\circ}\text{C}$ ) není nutné příliš upínat zkušební vzorek a tedy čelisti dotahovat značným utahovacím momentem, ale stačí pouze hodnota momentu, která zabezpečí, aby při nízkocyklové únavové zkoušce nedošlo k samovolnému uvolnění součástí. Po konzultacích byla zvolena velikost utahovacího momentu 10 Nm. Navržená hodnota utahovacího momentu byla následně při jedné ze zkoušek vyzkoušena a správná volba utahovacího momentu tak také experimentálně potvrzena.

V případě určení utahovacího momentu při zkouškách probíhajících za pokojových teplot byla vypočítána velikost utahovacího momentu 591 Nm u stávající konstrukce čelistí, což je velmi vysoká hodnota. Po konzultaci s techniky obsluhujícími stroj, se však ukázalo, že se může jednat o hodnotu reálnou, neboť při utahování čelistí je využita veškerá síla, kterou je technik schopen vyvinout. Navíc, v poslední fázi využívá technik i dynamického trhnutí utahovacím klíčem, do kterého vloží veškerou svoji váhu i fyzickou sílu. Podle zkušeností pracovníků obsluhujících zkušební stroj, je tento namáhavý postup při upnutí nutný k dostatečnému dotažení zkušebního tělesa. Dá se odhadnout, že pokud by k dotažení docházelo pouze statickou silou vyvolanou technikem, výsledný utahovací moment by dosahoval hodnoty cca 250 Nm. Po zhodnocení dosažených výsledků bylo nutné konstatovat, že za stávajícího konstrukčního řešení čelistí je velké riziko toho, že při zkoušce může dojít ke vzniku vůlí mezi součástmi, neboť správné utažení zkušebního tělesa není z výše popsaných důvodů zaručeno. To v ojedinělých případech vede ke znehodnocení zkušebních vzorků a výsledků celé zkoušky.

Proto byla navržena konstrukční úprava čelistí. Byly zvětšeny rozměry vložky čelistí, čímž bylo dosaženo zvýšení tuhosti vložky a tím pádem také snížení její deformace v oblasti čepu. Po provedení navržené úpravy nebude tedy docházet v takové míře k její deformaci jako za stávajícího stavu, a také nebude muset být použit tak značný utahovací moment. Navrženou úpravou dojde ke snížení utahovacího momentu na hodnotu cca 249 Nm, což představuje snížení hodnoty utahovacího momentu o 58% oproti původnímu konstrukčnímu řešení čelistí. Uvedená velikost utahovacího momentu je v reálných podmínkách dosažitelná bez nutnosti „násilného“ utahování čelistí. Popsané úpravy součástí čelistí budou provedeny po konzultaci s vedoucím dílen ÚFM při nejbližší výměně součástí čelistí. Ty mají omezenou životnost díky vysokému zatížení při svém provozu, a aby byly výsledky zkoušek platné, musí docházet k jejich občasné výměně.

Navrhované konstrukční změny byly voleny tak, aby jimi bylo ovlivněno co nejméně součástí čelistí. Předpokládá se, že navržené úpravy přispějí ke spolehlivějšímu průběhu únavových zkoušek za pokojové teploty a nebude třeba dalších razantnějších změn v konstrukci čelistí.

Po dosažení hlavního cíle diplomové práce byla následně provedena v programu Ansys Multiphysics doplňková analýza napětí dosahovaného na izolující keramické destičce. Výpočet byl proveden na 3D modelu osminy destičky, přičemž byly použity okrajové podmínky, které zajišťovaly symetrii keramické destičky. Z výsledků vyplývá, že při stávajícím řešení konstrukce čelistí je napjatost v oblasti zaoblení keramické destičky blízká její pevnosti v tlaku. Při dynamickém utahování čelistí, případně při existenci materiálových vad v keramických destičkách tedy může docházet k jejich praskání, jak ostatně potvrzují také zkušenosti technických pracovníků obsluhujících experimentální zařízení.

V případě realizace navrhované konstrukční úpravy dojde ke snížení utahovacího momentu a tím také ke snížení napětí na keramické destičce. Nemělo by tedy tak často docházet k porušování izolačních keramických destiček. Pokud by však utažení vzorku a tím celých čelistí mělo být dosaženo dynamickým působením síly, není možné zaručit, že nebude docházet k porušení izolačních keramických destiček. Z tohoto pohledu je překonstruování čelistí pro testy za pokojové teploty velmi žádoucí.

Jako poslední krok byla provedena podrobnější analýza rovinného osově symetrického modelu vložky, která je nejvíce namáhanou kovovou součástí čelistí. Numerickým výpočtem byly získány výsledky, na jejichž základě byla navržena změna zaoblení na vložce z poloměru R2 na R3,5, což je technologicky maximálně přípustná velikost zaoblení. Touto změnou došlo ke snížení maximálního redukovaného napětí v oblasti zaoblení vložky, a byla tak snížena možnost iniciace únavových trhlin ve sledovaném místě.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle vytčené cíle byly splněny. Byla stanovena velikost utahovacího momentu pro testy za nízkých teplot a zároveň vyvráceny obavy pracovníků z chování čelistí za těchto teplot. Pro testy za pokojové teploty byla navržena konstrukční změna vedoucí ke snížení utahovací momentu a tím také ke spolehlivější funkci upínacích čelistí.

Poznamenejme, že se v současné době pracuje na realizaci v diplomové práci navržených konstrukčních změn upínacích čelistí zkušebního stroje MTS 810.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

---

- [1] RŮŽIČKA, M. – HANKE, M. – ROST, M.: *Dynamická pevnost a životnost*. Skriptum FS ČVUT v Praze, 1987.
- [2] POLÁK, J. : *Cyklická plasticita a nízkocyklová únavová odolnost kovových materiálů*. Československá akademie věd, 1986.
- [3] *Ústav materiálových věd a inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně*. Internetový odkaz, URL:  
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/BUM/07-Unava%20materialu-Podklady.pdf>, 5/2008.
- [4] JULIŠ, M. - OBRTLÍK, K. - PETRENEC, M. - PODRÁBSKÝ T. L. : Únavové chování niklové superslitiny Inconel 738LC za pokojové teploty. Sborník konference Metal 2007, 2007.
- [5] PETRENEC, M. – OBRTLÍK, K. – POLÁK J. – MAN J.: Effect of Temperature on the Low Cycle Fatigue of Cast Inconel 792-5A. Key Engineering Materials Vols. 345-346, pp. 383-386, 2007 (dostupné na Scientific.net).
- [6] PETRENEC, M. – OBRTLÍK, K. – POLÁK J.: High Temperature Low Cycle Fatigue of Superalloys Inconel 713LC and Inconel 792-5A. Key Engineering Materials Vols. 348-349, pp. 101-104, 2007 (dostupné na Scientific.net).
- [7] *Zwick/Roell výrobce Testovacích zařízení*. Internetový odkaz, URL:  
[http://www.zwick.com/upload/\\_machines\\_and\\_devices\\_EN/419\\_19319/Servohydraulic\\_HA250.jpg](http://www.zwick.com/upload/_machines_and_devices_EN/419_19319/Servohydraulic_HA250.jpg), 4/2008.
- [8] *Instron výrobce Testovacích zařízení*. Internetový odkaz, URL:  
[http://www.instron.com/wa/products/fatigue\\_testing/tabletopframes.aspx](http://www.instron.com/wa/products/fatigue_testing/tabletopframes.aspx), 4/2008.
- [9] *Inova výrobce zkušebních strojů*. Internetový odkaz, URL:  
<http://www.inova.cz/products/details/vysokocykl1.htm>, 4/2008.
- [10] *MTS Systems Corporation*. Internetový odkaz, URL:<http://www.mts.com/>, 3/2008.
- [11] PETRENEC, M. podklady Výkresová dokumentace a geometrie součástí UFM Akademie Věd ČR.
- [12] HOSNEDL, S. – KRÁTKÝ, J. : *Příručka strojního inženýra Obecné strojní části*. Computer Press Brno, 1999.
- [13] *MatWeb*. Internetový odkaz, URL:  
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c8c56ad547ae4cfabad15977bfb537f1&ckck=1>, 11/2008.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>symbol</b>	<b>jednotka</b>	<b>popis</b>
$F_{\dot{s}}$	[N]	- maximální zatížení v ose šroubu
$M_{MH}$	[Nmm]	- třecí moment v dosedací ploše matice šroubového spoje
$M_U$	[Nmm]	- utahovací moment
$M_Z$	[Nmm]	- třecí moment v závitech při utahování šroubového spoje
$P_h$	[mm]	- stoupání závitu
$d_S$	[mm]	- přibližný střední průměr styk. plochy (matice a keramické destičky)
$d_2$	[mm]	- střední $\varnothing$ závitu čelisti
$f_{MH}$	[-]	- součinitel tření ve stykové ploše (matice keramická destička)
$f_Z$	[-]	- součinitel tření v závitech
$\beta$	[°]	- vrcholový úhel

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<b>Číslo</b>	<b>Popis obrázku</b>	
<b>Obr. 1-1</b>	Válcový zkušební vzorek pro únavové zkoušky [3]	15
<b>Obr. 1-2</b>	Různé typy sinusových zátěžných cyklů a jejich charakteristiky [3]	16
<b>Obr. 1-3</b>	Křivky cyklického zpevnění- změkčení Cr-Mo oceli 15 313.5 [2]	17
<b>Obr. 1-4</b>	Základní cyklická deformační křivka nízkoúhlíkové oceli společně s tahovou křivkou [2]	17
<b>Obr. 1-5</b>	Zkušební stroj určený pro nízkocyklové zkoušky od firmy Zwick Amsler HB126/80 [7]	18
<b>Obr. 1-6</b>	Zkušební stroj pro zkoušení nízkocyklové únavy od firmy Instron 8801-A1/A2 Std Height [8]	18
<b>Obr. 1-7</b>	Zkušební stroj určený pro nízkocyklové zkoušky od firmy Inova Praha s.r.o., zkušební stroj 63 kN s hydraulickými upínači[9]	19
<b>Obr. 1-8</b>	Zkušební stroj určený pro nízkocyklové zkoušky od firmy Inova Praha s.r.o. zkušební stroj 160 kN [9]	19
<b>Obr. 1-9</b>	Zkušební stroj na nízkocyklovou únavu MTS 810 - pohled zepředu [10]	20
<b>Obr. 1-10</b>	Zkušební stroj na nízkocyklovou únavu MTS 810 - pohled zezadu [10]	20
<b>Obr. 1-11</b>	Jednotlivé součásti stávajících čelistí	21
<b>Obr. 1-12</b>	Schéma upínacích čelistí	23
<b>Obr. 1-13</b>	3D model upínacích čelistí	23
<b>Obr. 1-14</b>	Detail upínacích čelistí	24
<b>Obr. 4-1</b>	Schéma zobrazení vůle mezi součástmi	27
<b>Obr. 4-2</b>	Zobrazení veličin nezbytných pro výpočet třetího momentu [12]	29
<b>Obr. 4-3</b>	Zobrazení geometrie závitu [12]	30
<b>Obr. 5-1</b>	Okrajové podmínky	32
<b>Obr. 5-2</b>	Zatížení čelistí tahem	33
<b>Obr. 5-3</b>	Výsledek výpočtu - zobrazení velikosti vůle vzniklé při zatížení tahem	33
<b>Obr. 5-4</b>	Obrázek zatížení simulující utažení matice	34
<b>Obr. 5-5</b>	Deformace čelistí při utažení matice	35
<b>Obr. 5-6</b>	Zatížení čelistí tahem	37
<b>Obr. 5-7</b>	Zobrazení velikosti vůle vzniklé při zatížení tahem	37
<b>Obr. 5-8</b>	Obrázek zatížení při utažení matice	38
<b>Obr. 5-9</b>	Deformace čelistí, při utažení matice	39
<b>Obr. 5-10</b>	Okrajové podmínky čelistí při zatížení tahem za nízkých teplot	40

<b>Obr. 5-11</b> Výsledky deformace ve svislé ose z.....	41
<b>Obr. 5-11</b> Zatížení čelistí za nízkých teplot .....	42
<b>Obr. 5-12</b> Deformace při nízké teplotě .....	42
<b>Obr. 5-13</b> Osmina destičky s okrajovými podmínkami .....	44
<b>Obr. 5-14</b> Síť konečných prvků numerického modelu keramické destičky .....	45
<b>Obr. 5-15</b> Napětí v čelistech za pokojové teploty ve směru svislé osy z.....	46
<b>Obr. 5-16</b> Celkový pohled na rozložení napětí na destičce ve směru svislé osy .....	46
<b>Obr. 5-17</b> Detailní pohled na rozložení maximálního napětí ve směru svislé osy ...	47
<b>Obr. 5-18</b> Napětí v čelistech za pokojové teploty ve směru svislé osy z.....	48
<b>Obr. 5-19</b> Celkový pohled na rozložení napětí v destičce ve směru svislé osy při zatížení při teplotě -180°C .....	49
<b>Obr. 5-20</b> Detailní pohled na rozložení maximálního napětí ve směru svislé osy při zatížení při teplotě -180°C .....	49
<b>Obr. 5-21</b> Napětí na čelistech za pokojové teploty ve směru svislé osy z.....	50
<b>Obr. 5-22</b> Celkový pohled na rozložení napětí v destičce ve směru svislé osy .....	51
<b>Obr. 5-23</b> Detailní pohled na rozložení maximálního napětí ve směru svislé osy ...	52
<b>Obr. 5-24</b> Okrajové podmínky rovinného osově symetrického modelu vložky s jemnou sítí .....	53
<b>Obr. 5-25</b> Zobrazení průběhu redukovaného napětí na rovinném osově symetrickém modelu vložky.....	54
<b>Obr. 5-26</b> Okrajové podmínky rovinného modelu se zaoblením 2 mm .....	55
<b>Obr. 5-27</b> Průběh redukovaného napětí na rovinném modelu se zaoblením 2 mm ..	55
<b>Obr. 5-28</b> Detail průběhu redukovaného napětí v místě max. koncentrace napětí ...	56
<b>Obr. 5-29</b> Průběh redukovaného napětí na rovinném modelu se zaoblením 3,5 mm	57
<b>Obr. 5-30</b> Detail průběhu redukovaného napětí na rovinném modelu se zaoblením 3,5 mm .....	57

## SEZNAM TABULEK

### Číslo      Popis tabulky

<b>Tab. 1</b> Hodnoty součinitele tření v závitech $f_z$ [3] .....	30
--	----

## SEZNAM PŘÍLOH

---

<b>číslo</b>	<b>název přílohy</b>
Příloha 1	Geometrie Čelisti
Příloha 2	Geometrie Vložky
Příloha 3	Výrobní výkres Matice
Příloha 4	Výrobní výkres Čepu
Příloha 5	Výrobní výkres Vymezovacího kroužku
Příloha 6	Výrobní výkres Vzorku





# Stanovení provozních podmínek upínacích čelistí zkušebního stroje MTS 810

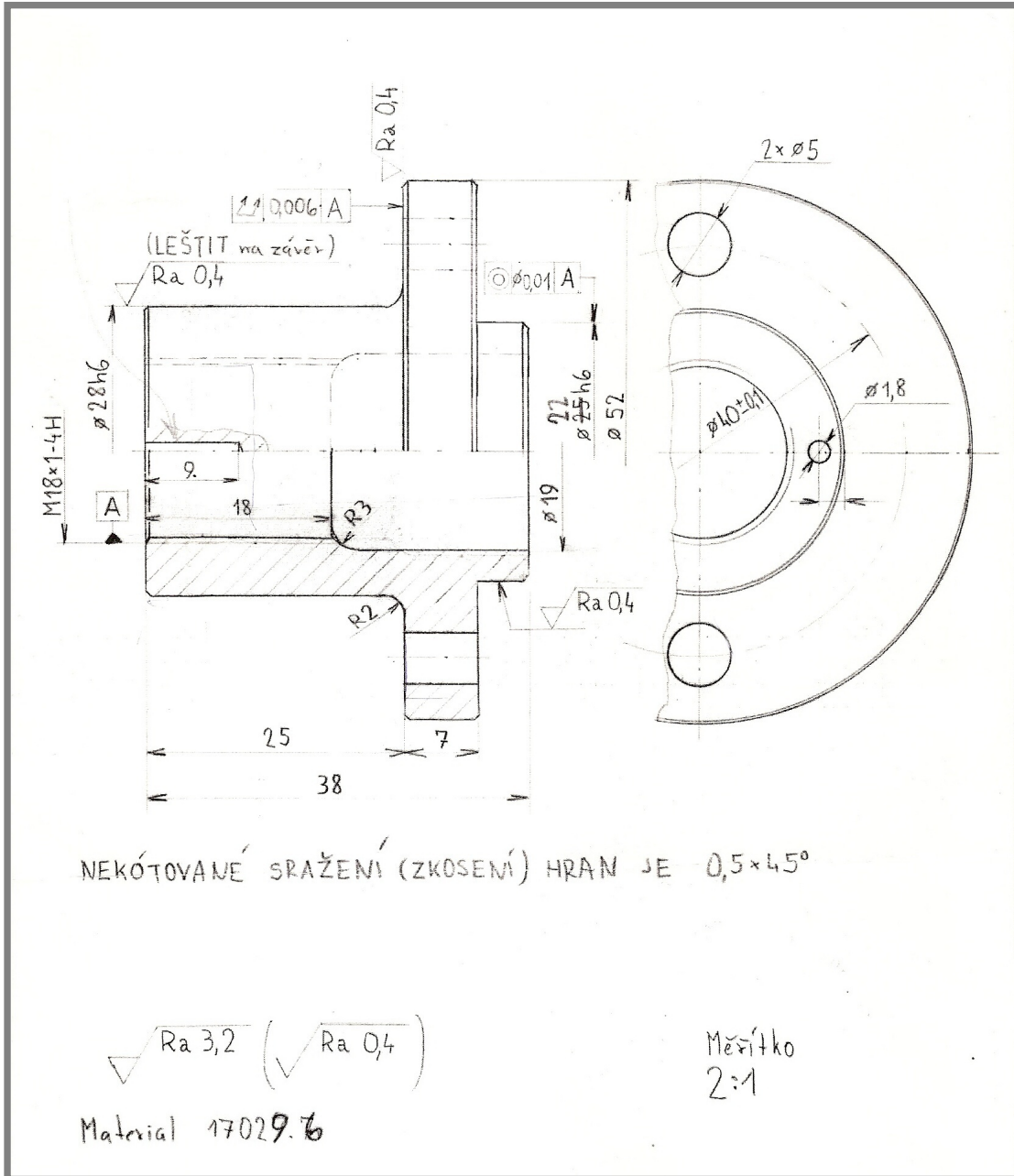
vypracoval: Tomáš Votroubek  
vedoucí práce: Ing. Luboš Náhlík, Ph.D  
Konstrukční inženýrství  
2009

---

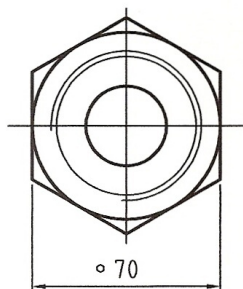
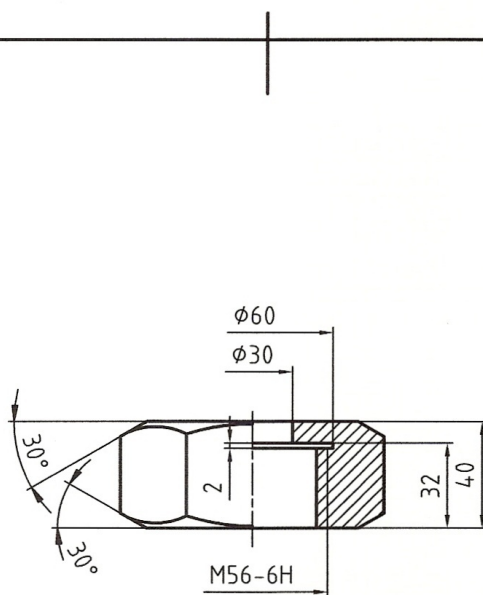





**Příloha 2 Geometrie vložky**

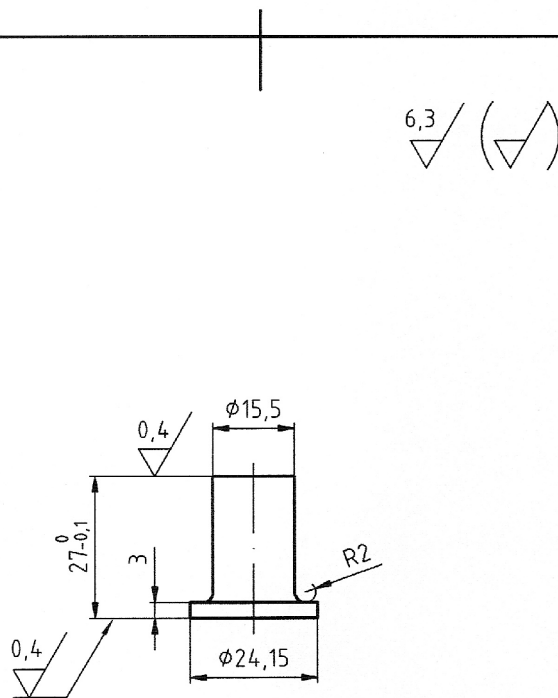


**Příloha 3 Výrobní výkres matice**



				Přesnost	Materiál 17027.6	T.O.
				Tolerování	Polotovar	
				Promítání		Hrubá hmotnost kg
				<b>ÚSTAV FYZIKY MATERIÁLŮ</b>		
Změna	Datum	Index	Podpis	Název	<b>MATICE</b>	
Navrhl PETRENEC	Poznámka	Měřítko		Číslo výkresu		
Přezkoušel		1:2				
Technolog						
Normalizace	Starý výkres					
Schválil	Č.seznamu					
Datum	Č.sestavy			Listů	List	

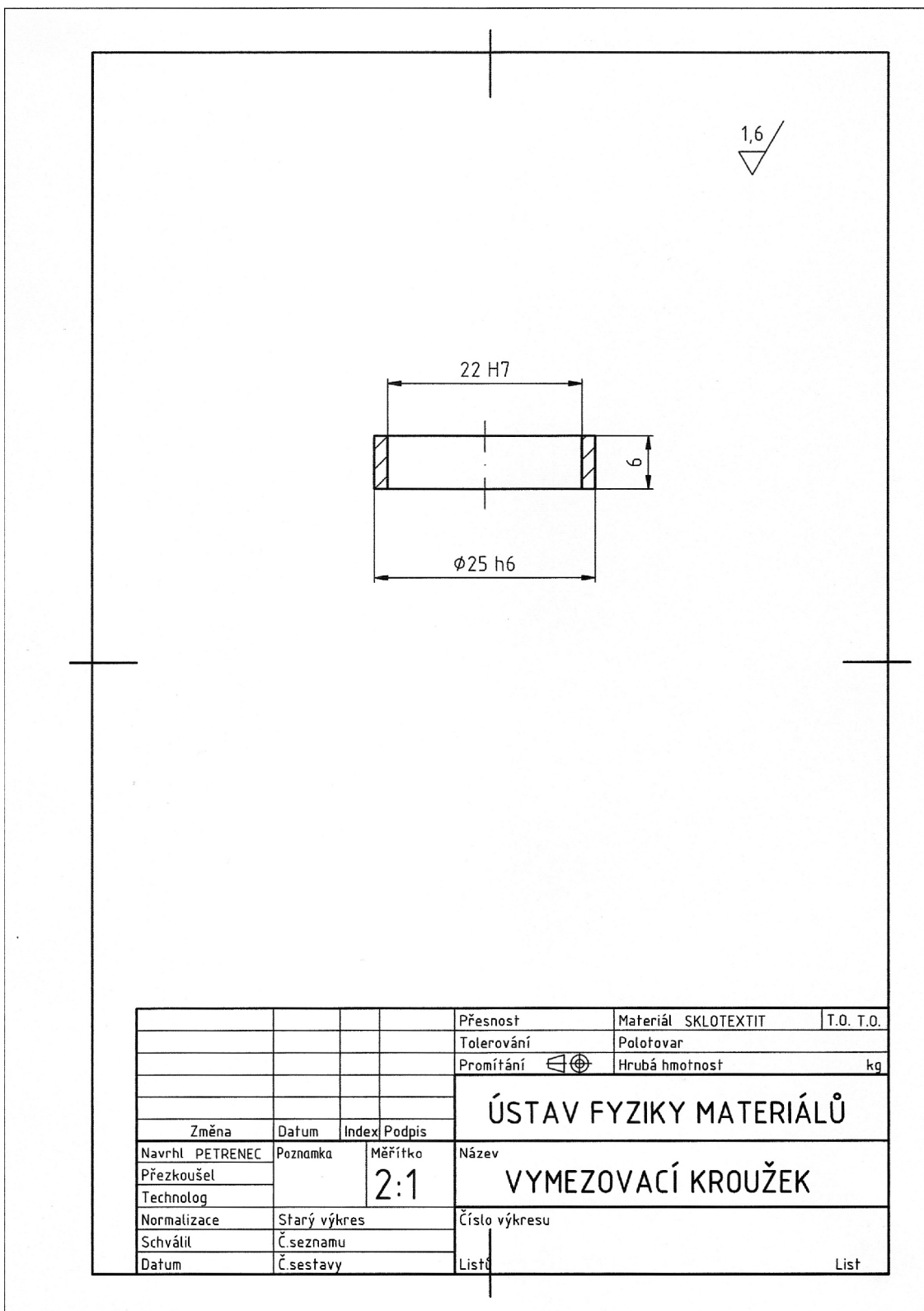
**Příloha 4 Výrobní výkres čepu**



KALENO A POPUŠTĚNO 50HRC

				Přesnost	Materiál 17029.7	T.O.
				Tolerování	Polotovár	
				Promítání		Hrubá hmotnost kg
				<b>ÚSTAV FYZIKY MATERIÁLŮ</b>		
Změna	Datum	Index	Podpis	Název	ČEP	
Navrhl PETRENEC	Poznámka	Měřítko		Číslo výkresu		
Přezkoušel		1:1		List	List	
Technolog						
Normalizace	Starý výkres					
Schválil	Č.seznamu					
Datum	Č.sestavy					

**Příloha 5 Výrobní výkres vymezovacího kroužku**



				Přesnost	Materiál SKLOTEXTIT	T.O. T.O.
				Tolerování	Polotovár	
				Promítání	Hrubá hmotnost	kg
				<b>ÚSTAV FYZIKY MATERIÁLŮ</b>		
Změna	Datum	Index	Podpis	<b>VYMEZOVACÍ KROUŽEK</b>		
Navrhl PETRENEC	Poznámka	Měřítko	Název			
Přezkoušel		2:1		Číslo výkresu		
Technolog						
Normalizace	Starý výkres			List		
Schválil	Č.seznamu					
Datum	Č.sestavy		List			

**Příloha 6 Výrobní výkres vzorku**

