



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NAPJATOSTNÍ ANALÝZA KERAMICKÉ HLAVICE TOTÁLNÍ KYČELNÍ ENDOPROTÉZY ZATÍŽENÉ DLE ISO 7206-5

STRESS ANALYSIS OF THE TOTAL HIP JOINT ENDOPROSTHESIS HEAD UNDER ISO
7206-5

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jozef Varga

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Vladimír Fuis, Ph.D.

BRNO 2008

Bibliografická citace:

VARGA, J. *Napjatostní analýza keramické hlavice totální kyčelní endoprotézy zatížené dle ISO 7206-5*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Fuis, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením
Ing. Vladimíra Fuise, Ph.D. s využitím doporučené literatury.

V Brně 2008

podpis:

Poděkování

Zde bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce
Ing. Vladimíru Fuisovi, Ph.D. za jeho cenné rady, odborné vedení a ochotu
při řešení této práce.

Abstrakt

Cílem této práce je provést analýzu rotačně symetrické úlohy dle normy ISO 7206-5, která se používá na určování statické pevnosti keramických hlavic. Při numerické analýze budou uvažovány tvarové odchylky od nominální kuželovitosti a kruhovitosti průřezů dříků tj. možné odchylky vzniklé při výrobě. Dále budou uvažovány tvarové změny zápichu uvnitř hlavice, které byly naměřeny na reálných vzorcích. Všechny tyto odchylky od nominálních hodnot je nutno podrobně analyzovat, protože se mohou podílet na destrukci keramických hlavic. Soustava dřík, keramická hlavice a zatěžovací kužel (DHK) bude modelována jako 2D osově symetrická (axisymetrická) úloha a 3D čtvrtinově symetrická úloha. Proto je nutno provést také srovnávací analýzu pro 2D a 3D úlohu a porovnat výsledky případně zhodnotit chybu.

Tato úloha je řešena s použitím konečno- prvkového systému ANSYS 11.0

Klíčová slova: ISO 7206-5, keramická hlavice, výpočtové modelování, napjatostní analýza, totální kyčelní endoprotéza

Abstract

The aim of this work is to analyse axisymmetric tasks by norm ISO 7206-5, which is used to determination of static strength of ceramic heads. In the numeric analysis there will be considered form variances from nominal conicalness and circularity of stem sections i.e. possible variances caused by production. Furthermore form changes of recess inside of the head measured on real samples will be considered. All these variances from nominal values are necessary to analyse in more details, because they can participate in destruction of ceramic heads. The stem system, ceramic head and load cone (DHK) will be simulated as a 2D axisymmetric task and 3D quarter symmetrical task. That is why is necessary to undertake also comparing analysis of 2D and 3D tasks and compare results or eventually evaluate the error.

This problem is solved using of Finite- element System ANSYS 11.0.

Keywords: ISO 7206-5, ceramic head, computational modeling, stress analysis, total hip joint endoprosthesis

OBSAH

1. ÚVOD.....	- 8 -
2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE	- 10 -
3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ ŘEŠENÍ	- 11 -
4. REŠERŠE	- 12 -
5. ANALÝZA PROBLÉMU	- 13 -
5.1 Typ problému	- 13 -
5.2 Vymezení hranic řešení problému	- 13 -
6. VYTVOŘENÍ SYSTÉMU VELIČIN	- 13 -
6.1 Závislé veličiny	- 14 -
6.2 Nezávislé veličiny.....	- 14 -
7. VÝBĚR METODY ŘEŠENÍ.....	- 14 -
8. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA	- 15 -
8.1 Citlivostní analýza konečnoprvkové sítě.....	- 15 -
8.2 Citlivostní analýza tuhosti kontaktu	- 17 -
8.3 Citlivostní analýza koeficientu tření.....	- 20 -
9. VSTUPNÍ ÚDAJE DO ALGORITMU	- 21 -
9.1 Vstupní údaje o geometrii	- 21 -
9.1.1 Systém kótování keramické hlavice	- 21 -
9.1.2 Měření geometrie vzorků keramických hlavic	- 22 -
9.1.3 Vektorizace bitmap	- 25 -
9.2 Vstupní údaje o vazbách.....	- 26 -
9.3 Vstupní údaje o materiálu.....	- 26 -
9.4 Vstupní údaje o zatížení	- 26 -
10. REALIZACE PROCESU ŘEŠENÍ.....	- 27 -
10.1 Model topologie soustavy.....	- 27 -
10.2 Model geometrie soustavy.....	- 28 -
10.2.1 Modely tvarových odchylek.....	- 30 -
10.2.2 Tvorba konečnoprvkové sítě	- 31 -

10.3 Model vazeb	- 32 -
10.4 Realizace kontaktu.....	- 33 -
10.4.1 Konvergence numerického řešení MKP soustavy HDK	- 33 -
10.4.2 Výběr algoritmu pro kontaktní řešení	- 34 -
10.4.3 Výběr kontaktních párů.....	- 35 -
10.5. Odhad chyby při výpočtu	- 36 -
10.6 Varianty řešení.....	- 38 -
10.7 Srovnávací analýza třech úrovní modelů.....	- 39 -
10.8 Analýza vlivu minimálního průměru kužele hlavice.....	- 40 -
11. ANALÝZA VZORKŮ BEZ TVAROVÉ ODCHYLKY	- 41 -
11.1 Porovnání VZOREK_28_13.5_X.....	- 41 -
11.2 Porovnání VZOREK_28_16.75_X.....	- 42 -
11.3 Porovnání VZOREK_28_20_X.....	- 43 -
11.4 Porovnání VZOREK_32_15_X.....	- 44 -
11.5 Porovnání VZOREK_32_19_X.....	- 45 -
11.6 Porovnání VZOREK_32_23_X.....	- 46 -
11.7 Zhodnocení vzorků bez tvarové odchylky.....	- 47 -
12. ANALÝZA VZORKŮ S TVAROVOU ODCHYLKOU OD NOMINÁLNÍ KUŽELOVITOSTI.....	- 49 -
12.1 Porovnání VZOREK_K_28_13.5_X.....	- 49 -
12.2 Porovnání VZOREK_K_28_16.75_X.....	- 50 -
12.3 Porovnání VZOREK_K_28_20_X.....	- 51 -
12.4 Porovnání VZOREK_K_32_15_X.....	- 52 -
12.5 Porovnání VZOREK_K_32_19_X.....	- 53 -
12.6 Porovnání VZOREK_K_32_23_X.....	- 54 -
12.7 Zhodnocení vzorků s tvarovou odchylkou od nominální kuželovitosti	- 55 -
13. ANALÝZA VZORKŮ S TVAROVOU ODCHYLKOU OD NOMINÁLNÍ KUŽELOVITOSTI A KRUHOVITOSTI (OVALITA)	- 58 -
13.1 Porovnání VZOREK_K_O_28_13.5_X.....	- 58 -
13.2 Porovnání VZOREK_K_O_28_16.75_X.....	- 59 -
13.3 Porovnání VZOREK_K_O_28_20_X.....	- 60 -

13.4 Porovnání VZOREK_K_O_32_15_X.....	- 61 -
13.5 Porovnání VZOREK_K_O_32_19_X.....	- 62 -
13.6 Porovnání VZOREK_K_O_32_23_X.....	- 63 -
13.7 Zhodnocení vzorků s tvarovou odchylkou od nominální kuželovitosti a kruhovitosti	- 64 -
14. ZÁVĚR.....	- 66 -
LITERATURA.....	- 69 -

1. ÚVOD

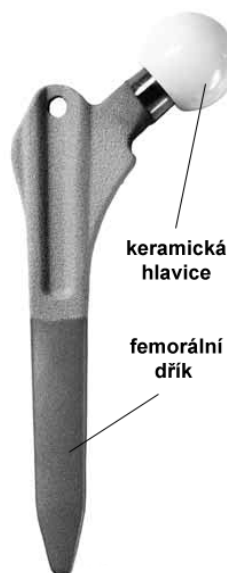
Kyčelní klouby jsou nosnými klouby trupu a z tohoto hlediska jsou značně namáhány. Vzhledem k této skutečnosti často dochází k degeneraci kloubního spojení. Nejčastějším onemocněním kloubu bývá osteoartróza (OA) [2]. I přesto, že je to tak časté onemocnění kloubů lidského těla její příčina a mechanismus vedoucí ke vzniku nemoci není zcela objasněna. Můžeme však vycházet z více faktorů, které se zcela jistě na vzniku tohoto onemocnění podílejí a ovlivňují ho.

Příčiny OA se dají rozdělit do dvou skupin, primární a sekundární. Primární jsou většinou způsobena genetickou dispozicí, nadváhou, nevyváženým přetěžováním kloubů při určitých činnostech. Sekundární vzniká následkem úrazů, vrozené nebo vývojové vady.

Aplikace totální náhrady patří mezi nejčastější způsoby léčby poruch kloubů, zejména kyčelních kloubů. V důsledku nezdravého životního stylu je v posledních letech totální endoprotéza (TEP) používána u stále mladších pacientů. Proto je také snaha dosáhnout co největší životnosti TEP. Při návrhu TEP je velice důležitá volba vhodného materiálu, který má dobré mechanické vlastnosti, malé opotřebení, je korozivzdorný a biokompatibilní. Biokompatibilní jsou materiály, které jsou netoxické a nevyvolávají v těle obrannou imunitní reakci [7].

Na počátku vývoje umělých náhrad se používaly různé druhy nekovových materiálů. Velkou nevýhodou těchto materiálů bylo značné opotřebení kluzných ploch implantovaných komponent. Proto byla potřeba nahradit tyto materiály takovými, aby nedocházelo k tak významnému opotřebení kluzných ploch. Vývoj se postupně začal směřovat ke kovovým materiálům. Vzhledem k tomu, že byla snaha ještě víc snížit opotřebení kluzných ploch, přešlo se znovu k nekovovým materiálům, avšak tentokrát již na mnohem vyšší technologické úrovni. Často používaný byl v oblasti kloubních náhrad polyetylen. Používal se pro výrobu jamek kloubních náhrad. Bylo však zjištěno, že otěr polyetylenu je nejvýznamnějším faktorem, který se podílí na uvolnění kyčelní náhrady. Částice vznikající při otěru polyetylenu nejsou biokompatibilní, proto se imunitní systém snaží tyto toxické částice vyloučit z těla. Klinickým projevem je osteolýza vedoucí k uvolnění kloubní náhrady.

Jako řešení byly do oblasti kloubních náhrad implementované keramické materiály (zejména Al_2O_3). Jejich výhodou byla biokompatibilita a nízký otěr. Nevýhodou byla křehkost a citlivost na tahová napětí. K meznímu stavu dochází při velmi nízkých hodnotách tahového napětí, kolem 300Mpa [5] nebo dokonce 150Mpa [11]. Proto musí být tato nepříjemná vlastnost minimalizována při správném geometrickém návrhu. Vzhledem k tomu, že keramické materiály jsou křehké a těžko se obrábějí, není vhodné použít keramický materiál na celou TEP. Proto bylo nutné vytvořit TEP tak, aby byla složena ze dvou materiálů hlavice a femorálního dřívku [Obr. 1.1.].

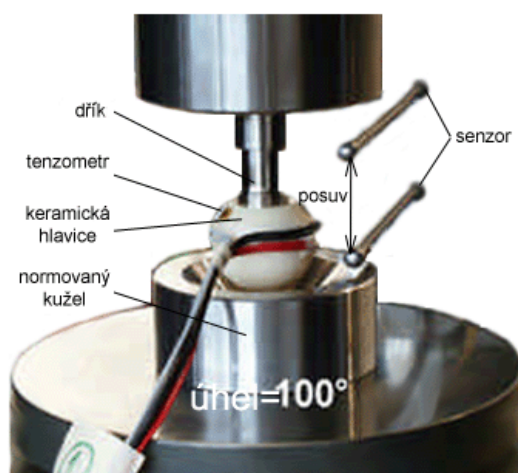


Obr. 1.1. Totální kyčelní endoprotéza

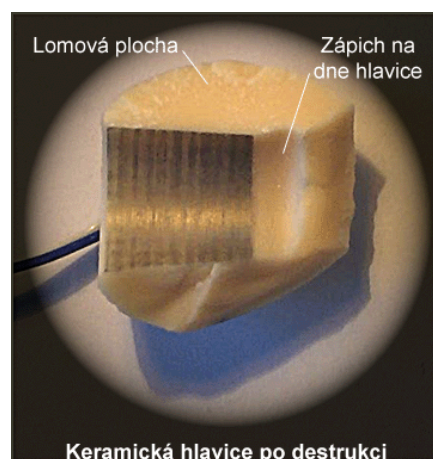
Hlavice z keramického materiálu kvůli dobrým třecím vlastnostem a schopnosti odolávat výraznému otěru ve styku s kyčelní jamkou kloubního spojení a femorální dřív TEP s kovového materiálu, který je houževnatý a může lépe odolávat ohybovým napětím a případným rázem vznikajícím při chůzi. Toto spojení hlavice a dřívku je kvůli dobré soudržnosti těchto dvou komponent realizováno samosvorným kuželovým spojením. Nevýhodou tohoto spojení jsou vysoká tahová (obvodová) napětí, na které je jak již bylo zmíněno, keramika obzvláště citlivá. Úhel sklonu kužele je $5^{\circ}43'30''$ dán normou DIN 254 a DIN ISO 3040 [8]. Spojení (DHK) je zkoušeno dle normy ISO 7206-5. Zkušební zařízení, které je předmětem zájmu této diplomové práce bude popsáno v následujícím textu.

2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE

Bylo zjištěno, že u některých pacientů, kterým byla implantována TEP, došlo po čase k destrukci keramické hlavice vlivem statického a dynamického namáhání [7], [Obr. 2.2.]. Proto bylo nutno provést experiment, který měl zjistit příčinu destrukce této hlavice. Zařízení, kterým je možno takovouto zkoušku provádět je vidět na [Obr. 2.1.]. Princip této zkoušky je popsán normou ISO 7206-5. Podstata spočívá v tom, že keramická hlavice je nasazena na dřík a silou v osové směru tlačena na normovaný (zatěžovací) kužel. Na vnějším obvodu keramické hlavice jsou nalepeny tenzometry, které snímají přetvoření v obvodovém směru. To je následně přepočteno na napětí. Silové zatížení, které působí v ose je 10 000N.



Obr. 2.1. Zkouška ISO 7206-5



Obr. 2.2. Destruovaná hlavice

Topologické uložení tohoto zařízení může být i převráceně tj. nahoru normovaný kužel a dolů dřík, jako budu i já v této práci uvažovat. Při tomto experimentu však není možné sledovat pole napjatosti uvnitř hlavice v oblasti kontaktních ploch a v oblasti přechodu do dna hlavice. Dalším problémem je to, že vyráběné keramické hlavice jsou různých rozměrů, mají různě tvarované přechody do dna hlavice a dochází také k výrobním nepřesnostem (kuželovitost, ovalita). Takovou zkouškou nebylo tehdy možné kvalitativně posoudit, zda mají odchylky od nominálních hodnot výrazný vliv na výsledky průběhů napětí či nikoli. Proto je nutné daný experiment nahradit výpočtovým modelem a řešit ho numericky.

3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ ŘEŠENÍ

Problém lze na základě předem popsané problémové situace formulovat následovně:

Realizace deformačně – napět'ové analýzy s využitím parametrického výpočtového modelu geometrie keramických hlavic totální kyčelní endoprotézy s tvarovými odchylkami dle ISO 7206-5.

Cíle řešení:

- 1) Změření geometrie přechodu kužele do dna otvoru v hlavici u sady destruovaných hlavic s následným vyhodnocením.*
- 2) Vytvoření parametrického modelu soustavy simulující zkoušku dle ISO 7206-5. Parametrem budou: změřené hodnoty přechodů kužele do dna 5 typických variant (původně plánovaných 4 bylo rozšířeno na 5), hloubka kužele hlavice (3 varianty), vnější průměr hlavice (2 varianty), tvarové odchylky kuželové kontaktní plochy.*
- 3) Provedení citlivostní analýzy hustoty diskretizace.*
- 4) Analýza vlivu jednotlivých parametrů na napjatost a deformaci analyzované soustavy.*

4. REŠERŠE

- [4] Fajfr, M., :*Deformačně napěťová analýza keramické hlavice kyčelní endoprotézy s modelovými tvarovými odchylkami kontaktních kuželů*, Diplomová práce, 2006.

Práce je zaměřena na deformačně – napěťovou analýzu keramické hlavice totální kyčelní endoprotézy s tvarovými odchylkami od nominálních hodnot dříku při šikmém zatížení a osovém zatížení pro geometrii danou výkresem.

- [6] Fuis, V.; Hlavoň, P.: *Comparison of the Computational and Experimental Modelling Results of Hip Joint Endoprosthesis Behaviour under Pressing on the Stem*. Proc. Conf. Experimental Stress Analysis CD, 2003.

V této práci je provedena analýza výpočtovým modelováním keramické hlavice totální kyčelní endoprotézy při osovém zatížení. Dále je provedena srovnávací analýza mezi experimentálním a výpočtovým modelováním pro hladký a zoubkovaný dřík.

- [8] Fuis, V.: *Napjatostní a spolehlivostní analýza keramické hlavice kyčelní endoprotézy* Vědecké spisy VUT v Brně, edice PhD Thesis, sv. 34, Brno, 2000.

Tato práce je zaměřena na analýzu keramické hlavice totální kyčelní endoprotézy z pohledu výpočtového a experimentálního modelování. Jsou zde zahrnuty možné tvarové odchylky od nominálních hodnot jako kuželovitost, a nepřesnost typu ovalita kontaktních ploch dříku a keramické hlavice. V práci bylo také uvažováno o vlivu zoubkování kužele dříku. Nakonec bylo provedeno pravděpodobnostní posouzení porušování keramických hlavic.

Všechny tyto práce jsou zaměřeny na analýzu keramické hlavice totální kyčelní endoprotézy, kde geometrie keramických hlavic je dána výkresem. V těchto pracích se neuvažuje o reálné geometrii, která jak bylo zjištěno měřením (kapitola 9.1.2), není v souladu s výrobními výkresy keramických hlavic. Nesoulad je v geometrii zápichu na dně kužele keramické hlavice, kterého vliv je v mé práci podrobně zanalyzován.

5. ANALÝZA PROBLÉMU

5.1 Typ problému

Geometrie, topologie, vazby a zatížení soustavy HDK jsou známé. Neznámé jsou pouze deformace a napjatost. Na základě toho bych problém označil za **přímý**.

5.2 Vymezení hranic řešení problému

Problém týkající se řešení keramických hlavic kyčelních endoprotéz je rozsáhlý. Vlastní řešení problému spočívá ve výpočtovém modelování soustavy HDK. Symetrie zadané úlohy umožňuje zjednodušení, proto bude modelována pouze část řešené soustavy. Vzhledem k tomu, že řešení daného problému je časově ohraničené (odevzdáním diplomové práce) a významným faktorem je též hardwarová náročnost a softwarová dostupnost související s licenčními omezeními je nutno vymezit hranice řešení problému takto:

- na soustavě HDK bude řešeno 5 různých přechodů zápichu do dna hlavice na 2D osově symetrické úloze, tvarová odchylka od nominální kuželovitosti 5' (úhel kužele hlavice je větší jako úhel kužele dřívku) na 2D osově symetrické úloze, tvarová odchylka od nominální kruhovitosti průřezu kuželové části v kombinaci s tvarovou odchylkou od nominální kuželovitosti 5' (úhel kužele hlavice je větší jako úhel kužele dřívku) na 3D čtvrtinově symetrické úloze.

Soustava HDK bude kvůli vysokému počtu modelů modelována parametricky.

6. VYTVOŘENÍ SYSTÉMU VELIČIN

Pro řešení daného problému je nutno sestavit systém veličin [9], které jsou pro kvalitativní vyřešení podstatné. Opomenutí některých podstatných veličin by mohlo mít za následek skreslení výsledků.

Řešená soustava je složena z těchto komponent:

- zatěžovací kužel
- keramická hlavice (hlavice)
- femorální část dřívku (dřívku)

Na základě toho lze sestavit soubor závislých a nezávislých veličin.

6.1 Závislé veličiny

- posuvy řešené soustavy
- vzniklá napjatost
- vzniklá přetvoření

6.2 Nezávislé veličiny

- geometrie zatěžovacího kužele
- geometrie keramické hlavice
- geometrie dříku
- vazba zatěžovacího kužele na keramickou hlavici
- vazba keramické hlavice na dřík
- vazba dříku v prostoru
- materiálové charakteristiky všech komponent
- zatížení

7. VÝBĚR METODY ŘEŠENÍ

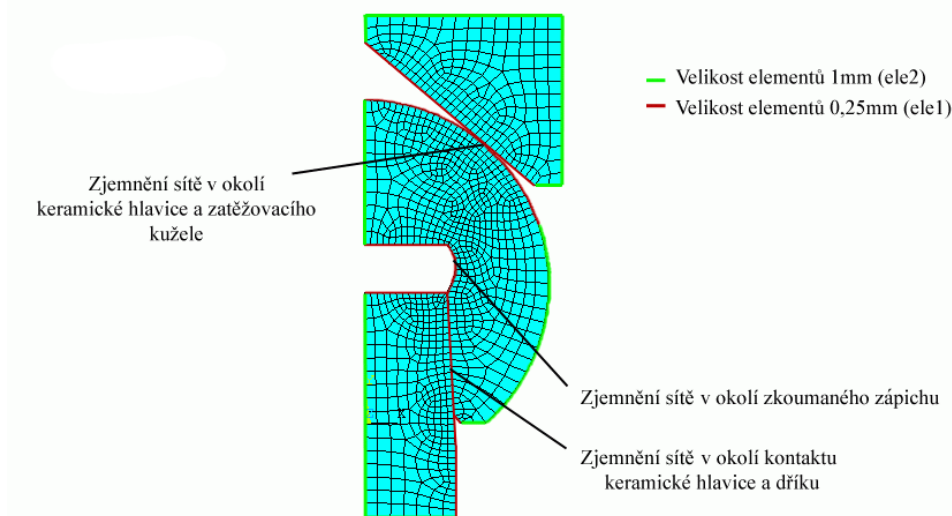
Při řešení soustavy dřík, keramická hlavice a zatěžovací kužel dochází k vzájemnému kontaktu těchto tří komponent. Vzhledem k této skutečnosti, se stává řešení této úlohy nelineárním. Jako vhodnou metodu pro řešení takto nelineární úlohy, jsem zvolil metodu konečných prvků (MKP). Je to numerická metoda, při které jako už z názvu plyne, je základním stavebním kamenem konečný prvek. Výhoda numerických metod je v tom, že je možno s jich pomocí řešit podstatně složitější úlohy jako například analytickými metodami. MKP vznikla už někdy v polovině 50. let minulého století. Tato metoda má v dnešní době dominantní postavení mezi ostatními numerickými metodami.

Programů, které používají k řešení metodu konečných prvků je celá řada. Jako nejznámější, které se používají v technické praxi jsou: NASTRAN, ABAQUS, COSMOS a ANSYS. Vzhledem k dostupnosti daného softwarového vybavení, jsem si pro svoji práci vybral programový systém ANSYS verze 11.0.

8. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

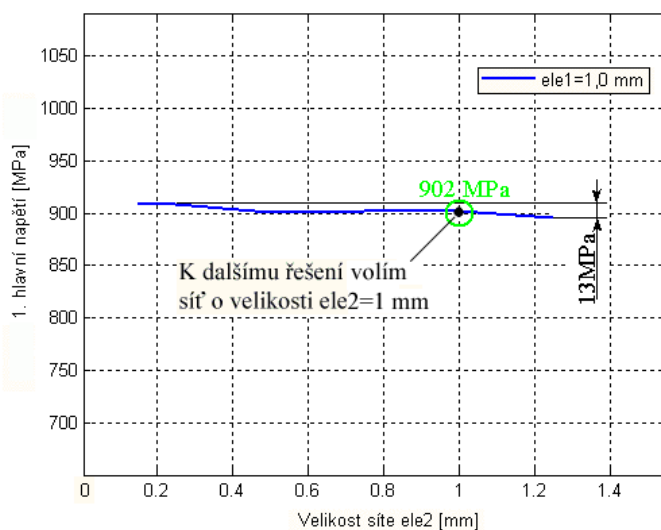
8.1 Citlivostní analýza konečnoprvkové sítě

Pro numerické řešení dané soustavy femorálního dřívku, keramické hlavice a zatěžovacího kužele je nutno provést citlivostní analýzu vlivu volby sítě na hodnoty 1. hlavního napětí. Pro tuto úlohu jsem zvolil obecný model HDK soustavy tzn. bez tvarových odchylek a bez použití různých typů přechodů do dna keramické hlavice [Obr. 8.1.1]. Rozložení sítě je voleno tak, aby na kontaktních plochách a v oblasti přechodu do dna hlavice byla jemnější (ele1) a v místech, které nemají výrazný vliv na výsledky lokálních hodnot polí napjatosti, je řidší (ele2). Je to z toho důvodu, že přes kontaktní plochy je přenášeno zatížení a v těchto místech vznikají lokální maxima tlakových napětí, které je nutno co nejpřesněji prozkoumat.



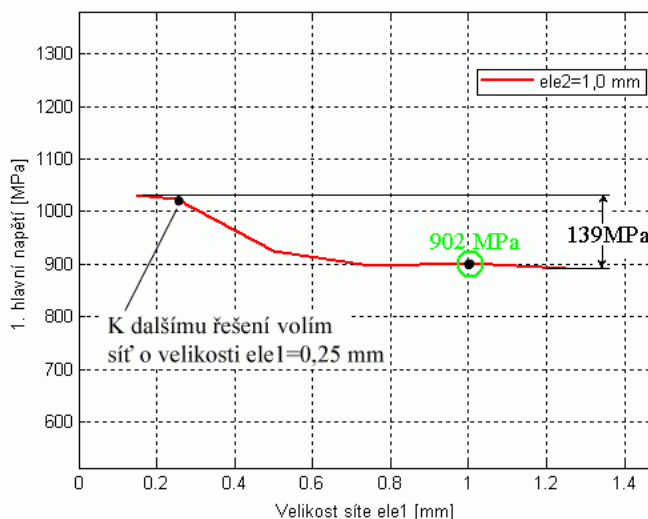
Obr. 8.1.1
Konečnoprvková síť

V grafu [Graf. 8.1.1] je znázorněno, jak jsou citlivé výsledky maximálního 1. hlavního napětí na velikost sítě (ele2), která není v místech kontaktu a v místech přechodu do dna hlavice. Síť ele1 byla pro tuto analýzu volena 1,0 mm. Jak se dalo očekávat změna sítě ele2 nemá výrazný vliv na výsledky maximálního 1. hlavního napětí. Proto může být hrubší, čímž se sníží počet elementů a zrychlí se výpočty.



Graf. 8.1.1 Závislost maximálního 1. hlavního napětí na velikosti sítě ele2

Na následujícím grafu [Graf. 8.1.2] je znázorněn průběh 1. hlavního napětí v závislosti na velikosti elementů sítě ele1 v intervalu $<0,15 \text{ mm} \div 1,25 \text{ mm}>$ při hodnotě $\text{ele2} = 1 \text{ mm}$. Zde je z průběhu jasně vidět, že změna velikosti sítě ele1 má již podstatný vliv na průběhy maximálních 1. hlavních napětí.

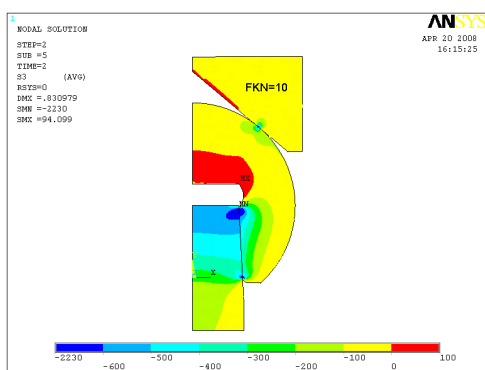


Graf. 8.1.2 Závislost maximálního 1. hlavního napětí na velikosti sítě ele1

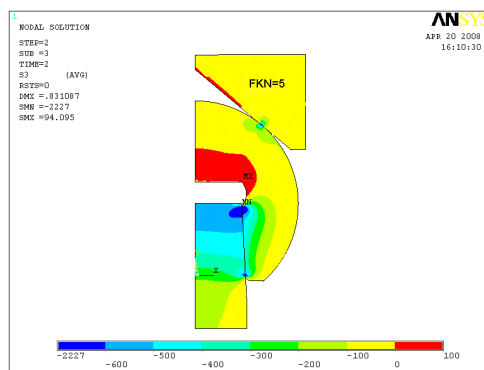
Čím je síť jemnější tím jsou výsledky přesnější co má za následek zvyšování 1. hlavního napětí. Vzhledem k přesnosti řešení jsem volil kombinaci $\text{ele2} = 1,0 \text{ mm}$ a $\text{ele1} = 0,25 \text{ mm}$, čímž jsem dosáhl numerické chyby hlavice i dříku kolem 6%, což je považováno za numericky přesné řešení (viz. Kapitola 10.5).

8.2 Citlivostní analýza tuhosti kontaktu

Vzhledem k tomu, že úloha je ve velké míře závislá na nastavení kontaktu, je nutno prozkoumat jak závisí nastavení normálové kontaktní tuhosti (Normal penalty stiffness) [FKN] na přesnosti a konvergenci numerické metody. Testoval jsem tuto sestavu pro rovinnou axisymetrickou úlohu a vyhodnocoval jsem přesnost řešení v závislosti na změně [FKN], což je vlastně tuhost mezi prvky k_N (viz. Kapitola 10.4). Penetration tolerance [FTOLN] jsem při výpočtech nechával konstantní FTOLN=0.1 pro oba kontaktní páry. Zatížení bylo 10 000N.

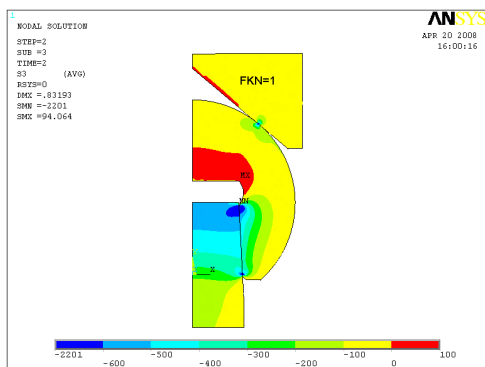


Obr. 8.2.1 Kontaktní tuhost 10

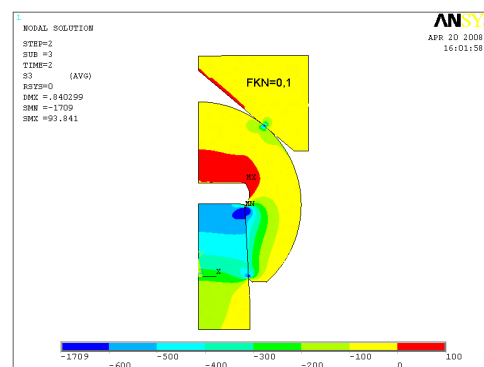


Obr. 8.2.2 Kontaktní tuhost 5

Při nastavení FKN=10 [Obr. 8.2.1] a FKN=5 [Obr. 8.2.2], jsou kontakty tuhé, dochází k minimální penetraci, velikost pole napjatosti maximální hodnoty tlakového napětí je velice malá. Tato nastavení se blíží nejvíce realitě. Avšak vzhledem k horší konvergenci, při vysokém počtu vzorků, není toto nastavení vhodné. Časté změny parametrů v modelu způsobují nemalé komplikace s konvergencí MKP. Při vyšším nastavení tuhosti (FKN > 10) v kontaktu už úloha diverguje. Matice tuhosti se stává singulární.

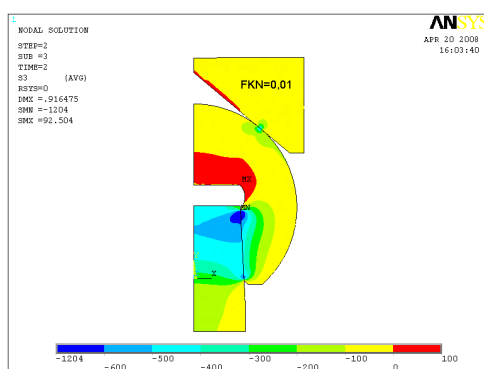


Obr. 8.2.3 Kontaktní tuhost 1

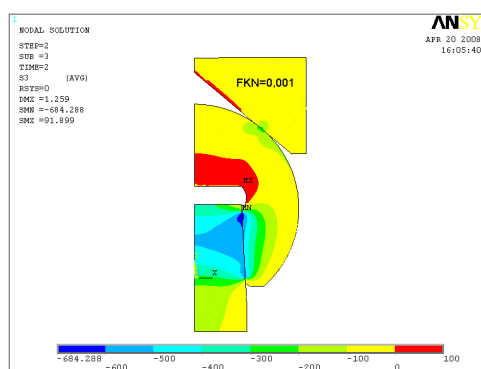


Obr. 8.2.4 Kontaktní tuhost 0,1

Nastavení $FKN=1$ [Obr. 8.2.3] je jako výchozí v programovém systému ANSYS. Penetrace je už větší, ale není tím nijak významně ovlivněno pole napjatosti kolem kontaktu. Řešení je numericky stabilnější. Pole napjatosti u $FKN=0,1$ [Obr. 8.2.4] také na první pohled nevypadá různě od předešlých tří, avšak zde je už jasně vidět, že se podstatně změnila maximální hodnota tlakového napětí v kontaktu [Graf 8.2.1]. U řešení s $FKN=0,01$ [Obr. 8.2.5] dochází k viditelnému změkčení kontaktu, velikost pole napjatosti v okolí kontaktu v oblasti maximální hodnoty tlakového napětí se zmenšuje.

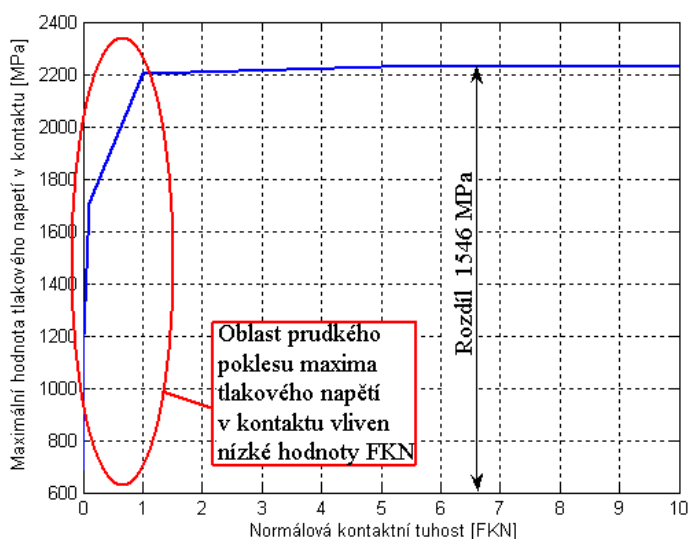


Obr. 8.2.5 Kontaktní tuhost 0,01



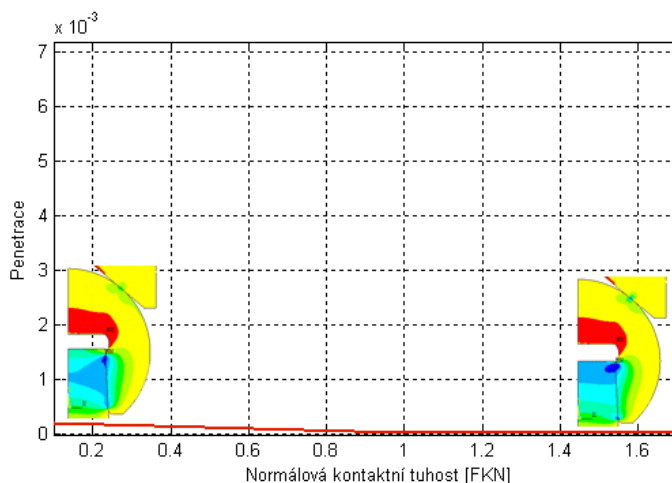
Obr. 8.2.6 Kontaktní tuhost 0,001

U řešení s $FKN=0,001$ [Obr. 8.2.6] je už zřetelně vidět, že dochází k posuvu tlakového maxima kontaktního místa směrem dolů vlivem velké penetrace. Maximální napětí kolem kontaktu se snižuje. Lze tehdy konstatovat, že při snižující se tuhosti kontaktu se zmenšuje maximální napětí v kontaktu [Graf 8.2.1].



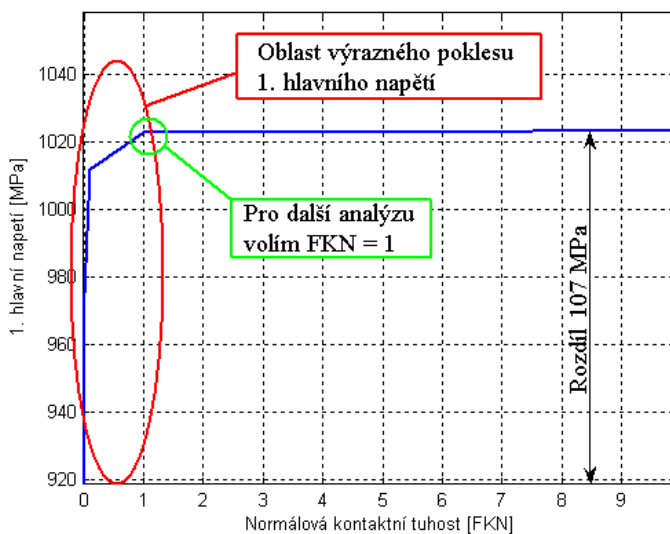
Graf. 8.2.1 Závislost maximální hodnoty tlakového napětí v kontaktu na kontaktní tuhosti FKN

Z grafu penetrace [Graf 8.2.2] v závislosti na FKN pro danou soustavu plyne, že hodnota penetrace má nejprudší průběh v intervalu (0 - 1), od (1 - 10) se už průběh jeví jako nulový. To znamená, že přesné řešení je nad hodnotou FKN 1, kde penetrace je nulová a kontakt odpovídá reálnému. Nejhorší stav nastane, když se hodnota FKN bude limitně blížit k nule.



Graf. 8.2.2 Závislost penetrace na kontaktní tuhosti FKN

Z grafu [Graf. 8.2.3] je vidět, že 1. hlavní napětí se začíná výrazně měnit až při hodnotách menších než FKN 1. Takže pro tuto soustavu lze nastavení FKN nad hodnotu 1 v závislosti na 1. hlavním napětí pokládat za přesné.



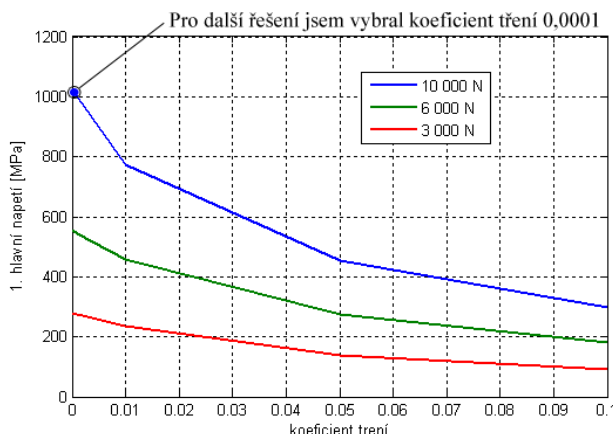
Graf. 8.2.3 Závislost 1. hlavního napětí na FKN

Vzhledem k předešlým úvahám jsem zvolil $FKN = 1$ protože se ukázalo, že pro tuto úlohu je nejvhodnější s ohledem na přesnost a podmíněnost konvergence řešení. Z této analýzy je patrné, že nastavení kontaktu musí být pečlivě zvoleno s ohledem na danou úlohu a přesnost výpočtu, nebo jinak se dostáváme k chybným a zavádějícím výsledkům.

8.3 Citlivostní analýza koeficientu tření

Hodnota koeficientu tření je vstupní hodnota, která není přesně známá. Závisí od typu materiálu, drsnosti povrchu a také od prostředí, ve kterém se kontaktní tělesa nacházejí. Vzhledem k tomu, že nevím přesnou hodnotu koeficientu tření v místech kontaktu na soustavě HDK (kontakt keramické hlavice a ocelového dřívku, keramické hlavice a zatěžovacího kužele), jsem provedl citlivostní analýzu koeficientu tření. Sledoval jsem závislost 1. hlavního napětí na koeficientu tření v intervalu $(0,0001 \div 0,1)$ pro tři různá silová zatížení [Graf. 8.3.1]. Lze předpokládat, že neznámá hodnota koeficientu tření se nachází v tomto intervalu.

Na následujícím grafu [Graf. 8.3.1] je vidět, že se zvyšující hodnotou koeficientu tření 1. hlavní napětí klesá. Je to způsobeno tím, že zvyšující se tření klade odpor vůči zatlačení keramické hlavice na dřív. Následně pak nevzniká tak velké napětí v obvodovém směru hlavice vlivem menšího rozevírání kužele hlavice. Vzhledem k tomu, že největší hodnota 1. hlavního napětí, což odpovídá hodnotě tahového napětí v obvodovém směru je při nejmenší hodnotě koeficientu tření, budu dále uvažovat koeficient tření 0,0001. Je to z toho důvodu, že keramika, jak již bylo zmíněno v úvodu, je citlivá na velké hodnoty tahového namáhání a proto uvažuji nejnebezpečnější možnou variantu.



Graf. 8.3.1 Závislost 1. hlavního napětí na koeficientu tření

9. VSTUPNÍ ÚDAJE DO ALGORITMU

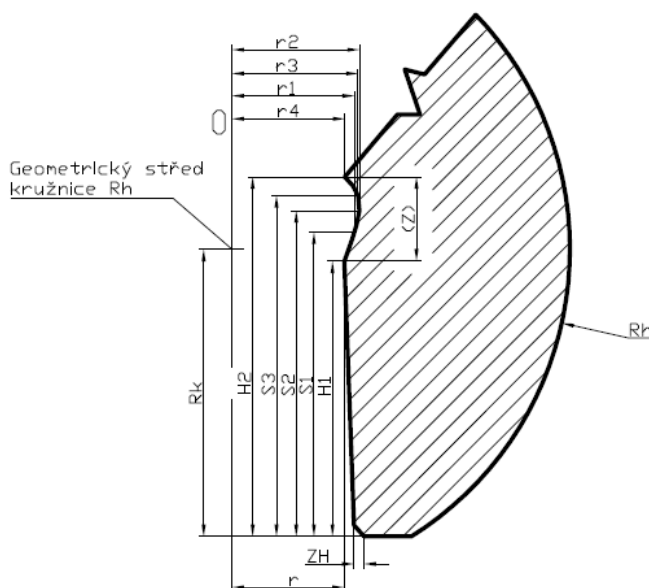
9.1 Vstupní údaje o geometrii

9.1.1 Systém kótování keramické hlavice

Při vytváření parametrického modelu bylo nutno dbát na to, jakým způsobem bude popsán charakteristický zápich na dně keramické hlavice. Nabízeli se dvě varianty:

- 1) Popsání tvaru zápichu pomocí řídicího bodu
- 2) Popsání tvaru zápichu proložením křivky několika body

První varianta spočívá ve vytvoření řídicího bodu v místě minima funkce popisující křivku a dvěma hraničními body. Pak volbou zaoblení v těchto bodech je možno měnit parametr zápichu. Tato varianta je vhodná v případě, že znám zaoblení přechodů. Ty se však špatně zjišťují, proto jsem zvolil variantu druhou. Bylo nutno vybrat několik bodů na křivce (v mém případě 5 bodů), které by křivku mohli dobře popsat. Hustota rozložení bodů určuje přesnost popisu, ale následně zvyšuje náročnost vytváření parametrických modelů. Body musí být voleny tak, aby bylo splněno: čím větší nepravidelnost (lokální geometrické skoky), tím větší počet bodů.



Kótování bylo tak voleno proto, aby při vytváření parametrického modelu bylo možno lehce popsat křivku zápichu, která je u každého měřeného vzorku odlišná. Z [Obr.9.1.1.1] je zřejmé, že křivku (spline) dostaneme z 5-ti bodů určených souřadnicemi x , y . Parametry popisující tento model budou změřeny v následující kapitole (kapitola 9.1.2).

9.1.2 Měření geometrie vzorků keramických hlavic

Měření bylo prováděno na 5-ti vzorcích. Vzhledem k náročnosti měření bylo nutno použít dvou metod. První metoda (měření posuvným měřítkem) byla vhodná pro měření hlavních rozměrů, jako je například hloubka kužele hlavice nebo délka zápichu. Nebyla však vhodná na měření tvaru zápichu, který se nachází na dně kužele. Proto musela být použita jiná metoda, kterou by bylo možno přesněji přeměřit parametry zápichu. Existuje celá řada měřících přístrojů založené převážně na principu optického snímání, které dokáží dokonale změřit geometrii tvarově složitých součástí. Já jsem však neměl k takovým zařízením přístup, proto jsem zvolil vlastní, mně dostupnou metodu pro měření vzorků.

Tato metoda spočívá ve vyfotografování zkušebních vzorků spolu s měřícím etalonem (např. stupnice pravítka) a následným zpracováním za pomoci PC. Pro detailní analýzu zkušebních vzorků jsem vybíral z několika bitmapových a vektorových programů. Program GIMP splňoval mé požadavky pro sjednocení měřítka fotky a etalonu. Dále bylo nutno převést bitmapovou grafiku na vektorovou. Na to jsem použil program Vextractor, pozn.(tato úprava by byla možná také v programu CorelDraw =>CorelTrace). Vzhledem k tomu, že vzorků k měření jsem měl jen 5 a vyráběných hlavic je 6 typů, dá se předpokládat, že tyto různé zápichy od nominálního zápichu dle výkresu se mohou vyskytovat u všech typů keramických hlavic. Proto byly tyto zápichy nesuperponovány na všechny typy keramické hlavice.

V následujících tabulkách jsou naměřeny hodnoty 5-ti keramických hlavic

[Tabulka 9.1.2.1, Tabulka 9.1.2.2, Tabulka 9.1.2.3, Tabulka 9.1.2.4, Tabulka 9.1.2.5].

Naměřené hodnoty u vzorku 1			
Měření posuvným měřítkem			
H1 = 11 mm	ZH = 0,5x45°	Z = 3,5 mm	
Foto měření			
H1 = 11,5 mm	H2 = 15 mm	Rh = 16 mm	Rk = 12 mm
r = 6,35 mm	r1 = 6,75 mm	r2 = 6,95 mm	r3 = 6,95 mm
r4 = 6,7 mm	S1 = 12,7 mm	S2 = 13,6 mm	S3 = 14,3 mm

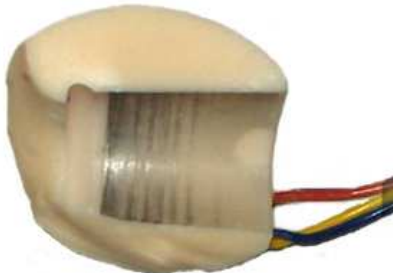
Tabulka. 9.1.2.1 Vzorek 1

Naměřené hodnoty u vzorku 2			
Měření posuvným měřítkem			
H1 = 11,5 mm	ZH = 0,5x45°	Z = 3,8 mm	
Foto měření			
H1=11,5 mm	H2 = 15 mm	Rh = 14 mm	Rk = 10,5 mm
r = 6,35 mm	r1 = 6,55 mm	r2 = 6,65 mm	r3 = 6,55 mm
r4 = 6,55 mm	S1 = 12,9 mm	S2 = 13,9 mm	S3 = 14,5 mm

Tabulka. 9.1.2.2 Vzorek 2

Naměřené hodnoty u vzorku 3			
Měření posuvným měřítkem			
H1 = 15 mm	ZH = 0,5x45°	Z = 4,5 mm	
Foto měření			
H1 = 15 mm	H2 = 20 mm	Rh = 16 mm	Rk = 12 mm
r = 6,35 mm	r1 = 6,95 mm	r2 = 7,25 mm	r3 = 6,85 mm
r4 = 7 mm	S1 = 16,6 mm	S2 = 18,2 mm	S3 = 19,1 mm

Tabulka. 9.1.2.3 Vzorek 3

Naměřené hodnoty u vzorku 4			
Měření posuvným měřítkem			
H1 = 17 mm	ZH = 0,5x45°	Z = 2,3 mm	
Foto měření			
H1 = 17 mm	H2 = 19 mm	Rh = 16 mm	Rk = 12 mm
r = 6,35 mm	r1 = 6,85 mm	r2 = 7,05 mm	r3 = 6,75 mm
r4 = 6,5 mm	S1 = 17,7 mm	S2 = 18,5 mm	S3 = 19 mm

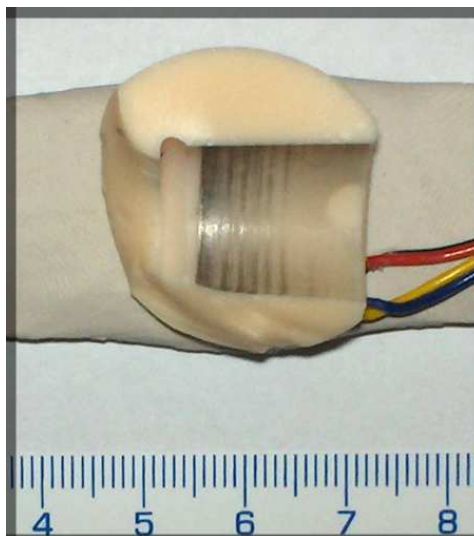
Tabulka. 9.1.2.4 Vzorek 4

Naměřené hodnoty u vzorku 5			
Měření posuvným měřítkem			
H1 = 17,5 mm	ZH = 0,5x45°	Z = 1,5 mm	
Foto měření			
H1 = 17,5 mm	H2 = 19 mm	Rh = 16 mm	Rk = 12 mm
r = 6,35 mm	r1 = 6,75 mm	r2 = 6,85 mm	r3 = 6,75 mm
r4 = 7 mm	S1 = 18,1 mm	S2 = 18,5 mm	S3 = 19 mm

Tabulka. 9.1.2.5 Vzorek 5

9.1.3 Vektorizace bitmap

První fáze: Spočívá ve vyfotografování zkoumaných vzorků keramických hlavic [Obr. 9.1.3.1], tak aby bylo vidět kontrastní okraje a aby oblast lomu nebo řezu byla kolmá na podložku.



Obr. 9.1.3.1 Keramická hlavice
foto měření

Jako etalon v mém případě bylo použito papírové pravítko vybrané kvůli nízkému odlesku. To poslouží k nastavení měřítka.

Druhá fáze: Vektorizace bitmapových okrajů za pomoci programu Vextractor (edge detector). V programu při vygenerování okraje je třeba pixely proložit vektorovou křivkou. Příkazem pro vektorizaci dostaneme křivky, které popisují obrys. Je jich však nutno ještě před samotným uložením mírně upravit (přesnost by bylo možno zvýšit použitím kvalitnějšího fotoaparátu, čím by se docílilo toho, že velikost pixelů na dané rozlišovací úrovni by byla menší).

Třetí fáze: Po uložení do formátu „dxf“ je možno tento soubor otevřít v programu AutoCAD a tam po odfiltrování přebytečných čar zakótovat [Obr. 9.1.1.1].

9.2 Vstupní údaje o vazbách

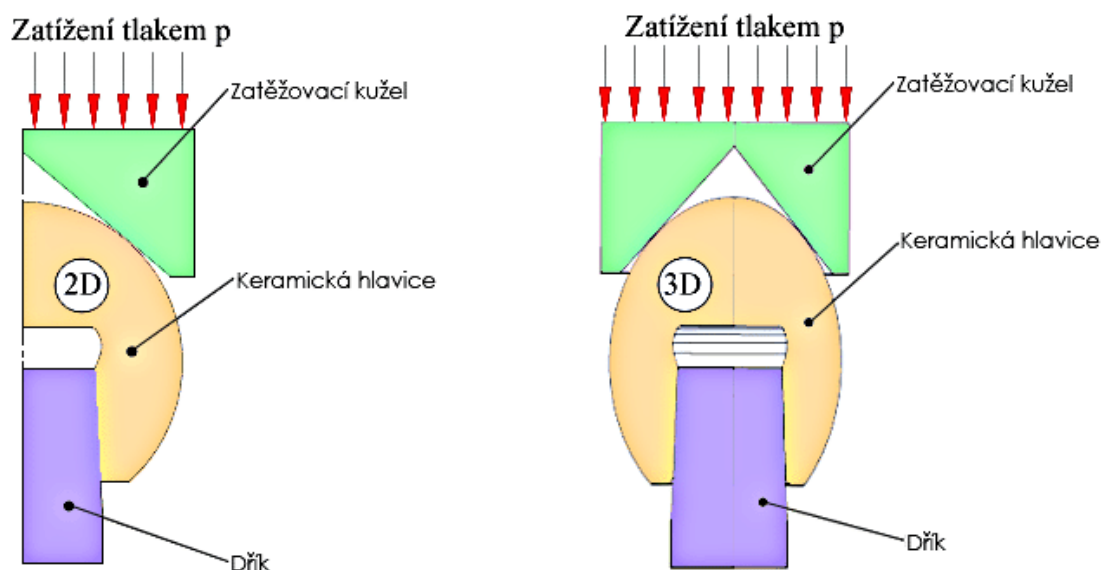
Vzhledem k symetrii řešené úlohy není nutno modelovat celou 3D soustavu. Proto budu modelovat pouze 3D čtvrtinově symetrickou úlohu (pro řešení tvarové odchylky „kuželovitost a ovalita“) a 2D osově symetrickou úlohu (pro řešení variant „přesná“ a „kuželovitost“). Při čtvrtinovém 3D modelu bude zadávána symetrie na plochy, které jsou osovými řezy soustavy HDK natočené vůči sobě o 90°. Při 2D modelu bude symetrie zadána v ose symetrie soustavy. U všech variant bude dřík vetknutý v dolní části.

9.3 Vstupní údaje o materiálu

U soustavy HDK budou voleny 2 materiály. Materiál dříku bude ocel s elastickými, izotropními vlastnostmi. Modul pružnosti v tahu $E=2,1 \cdot 10^5$ MPa a poissonův poměr $\mu=0,3$. Materiál keramické hlavice bude Al_2O_3 s elastickými, izotropními vlastnostmi. Modul pružnosti v tahu $E=3,9 \cdot 10^5$ MPa a poissonův poměr $\mu=0,23$.

9.4 Vstupní údaje o zatížení

Soustava HDK bude zatěžována silou 10 000N v osovém směru. Směr síly je volen v souladu se zkouškou ISO 7206-5. Její velikost je určena na základě maximálního možného vzniklého fyziologického zatížení. Síla bude kvůli rovnoměrnému rozložení přepočtena na tlak jak u 2D úlohy tak u 3D úlohy [Obr.9.5.1].



Obr. 9.5.1 Zatížení

10. REALIZACE PROCESU ŘEŠENÍ

10.1 Model topologie soustavy

Topologie soustavy HDK (keramické hlavice, dříku, zatěžovacího kužele) může být chápána dvěma způsoby:

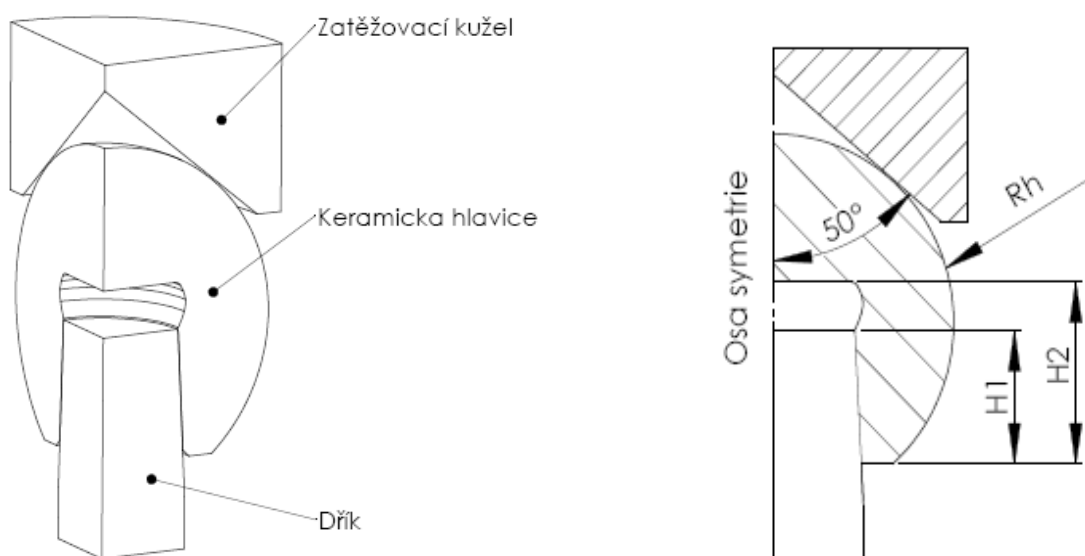
1) Uvažuji, že soustava HDK je součástí zkušebního zařízení dle normy ISO 7206-5 s tím, že dřík budu chápat jako kuželovou stopku, která je součástí tohoto zařízení viz. [Obr. 2.1, str. 10]

2) Uvažuji, že soustava HDK je součástí totální kyčelní endoprotézy s tím, že zatěžovací kužel je nahrazen kyčelní jamkou ve vzájemné vazbě s pánevní kostí. Tento případ však konkrétně neřeším, i když analýzy jsou pro osově zatížení při zaměření se na interakci keramické hlavice a femorálního dříku stejné.

V mém případě uvažuji variantu 1). Z celého zkušebního zařízení pro testování keramických hlavice bude řešena část vetknutý dřík, keramická hlavice a zatěžovací kužel [Obr. 10.2.1]

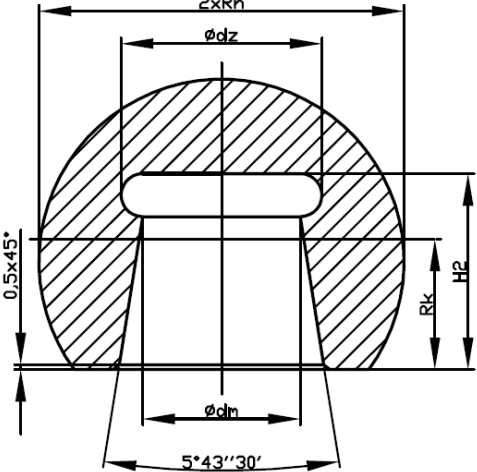
10.2 Model geometrie soustavy

Soustava se skládá z femorální části dříku, keramické hlavice a zatěžovacího kužele [Obr.10.2.1]. Rozměry hlavice a dříku jsou podle dílenských výkresů vyráběných hlavic. Hlavice se vyrábí s dvěma různými vnějšími průměry a ke každému průměru odpovídají tři různé hloubky otvoru v hlavici.



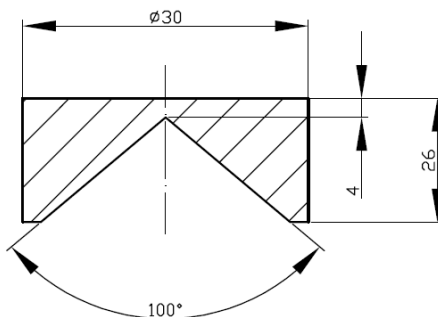
Obr. 10.2.1 Model geometrie

K těmto hloubkám se vyrábějí dříky s různými výškami kuželových částí. Tyto výšky dříků odpovídají hloubkám kužele v hlavici. Vzhledem k tomu, že zápichy na dně kužele hlavice jsou různé od těch změřených, přičemž dílenské výkresy jsou k těm týž měřeným destruovaným hlavicím, bylo nutno nahradit zápichy dle výkresu reálnými (změřenými) zápichy. V následující tabulce jsou uvedeny rozměry hlavic podle dílenských výkresů [Tabulka. 10.2.1].

	Keramické hlavice TEP dle výrobních výkresů				
	Rk [mm]	H2 [mm]	Ødm [mm]	Ødz [mm]	2xRh [mm]
Hlavice 1	10,5	13,5	12,7	12,9	28
Hlavice 2	10,5	16,75	12,7	12,9	28
Hlavice 3	10,5	20	12,7	12,9	28
Hlavice 4	12	15	12,7	12,9	32
Hlavice 5	12	19	12,7	12,9	32
Hlavice 6	12	23	12,7	12,9	32

Tabulka. 10.2.1

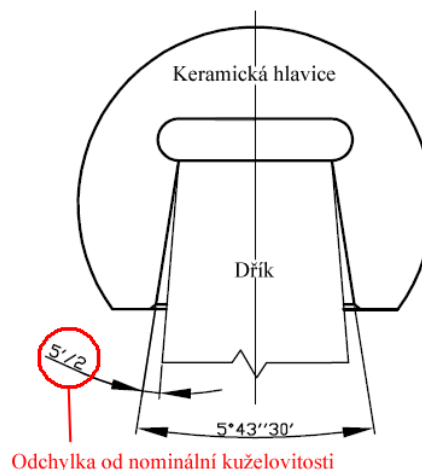
Rozměr zatěžovacího kužele je charakteristický svým 100° vrcholovým úhlem. Ostatní parametry jsou zakótované na následujícím obrázku [Obr. 10.2.1]. Zatěžovací kužel je pro všechny vzorky stejný, jeho rozměry se nemění.



Obr. 10.2.1 Zatěžovací kužel

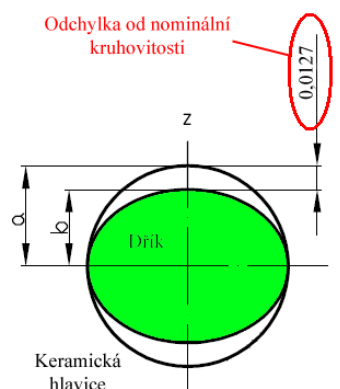
10.2.1 Modely tvarových odchylek

1) **Kuželovitost** je tvarová odchylka od nominální kuželovitosti kontaktních ploch (resp. čar) keramické hlavice a dříku. Odchylka byla namodelována pouze na dříku, hlavice byla namodelována přesně [Obr. 10.2.1.1]. Rozdíl mezi nominální hodnotou a hodnotou s namodelovanou tvarovou odchylkou je $5'$, vrcholový úhel keramické hlavice je větší než vrcholový úhel dříku.



Obr. 10.2.1.1 Kuželovitost

2) **Ovalita** je tvarová odchylka od nominální kruhovitosti příčného průřezu kužele. Odchylka byla namodelována pouze na dříku, kužel keramické hlavice je namodelován přesně [Obr. 10.2.1.2]. Při vymodelování oválního kuželového dříku v programovém systému ANSYS jsem postupoval následovně: Jako první je potřeba vymodelovat oválnou podstavu. Tu jsem vymodeloval tak, že v eliptickém souřadném systému jsem zadal několik bodů kružnice, které jsou v tomto systému transformovány do elipsy. Ty jsem pak proložil křivkou (splinem). K tomu, aby geometrie eliptické křivky byla správná, musí být dostatečný počet bodů nimiž je proložena, jinak se odchylky projeví na kontaktní ploše skokovými průběhy kontaktního tlaku. Pak profil doplníme do uzavřeného tvaru a vysuneme ve směru osy symetrie s daným faktorem zúžení. Hodnotu charakteristického poměru oválního průřezu a/b jsem volil 1,002 z čeho pak vychází odchylka 0,0127 mm u dna keramické hlavice viz. [Obr. 10.2.1.2].



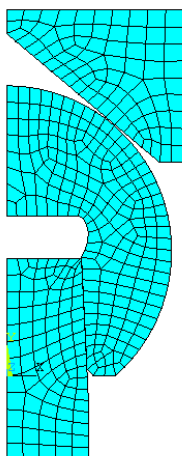
Obr. 10.2.1.2 Ovalita

10.2.2 Tvorba konečnoprvkové sítě

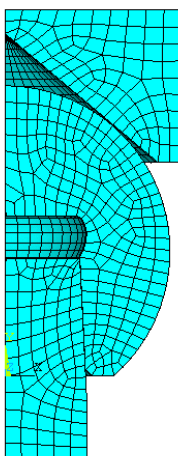
Při tvorbě konečnoprvkové sítě jsem navrhl sít pro dvě skupiny modelů:

První skupina modelů zahrnuje srovnávací modely 2D osově symetrické, 3D čtvrtinové a 3D plný model [Obr. 10.2.2.1]. Tato skupina vzhledem k tomu že slouží pouze k vzájemnému srovnání výsledků těchto tří modelů a jak moc se liší daná úroveň modelování je navržena s hrubší sítí. Také jsem musel brát ohled při návrhu sítě na to, že výpočet 3D plného modelu je časově hodně náročný a také jsem se zde již dostal na licenční omezení školního programu ANSYS, co se týče počtu prvků. Tyto tři modely mají tedy stejnou sít s velikostí elementu $ele1=1$ a $ele2=1,5$ což je pro tuto srovnávací analýzu dostačující. Prvky pro 2D úlohu jsem volil PLANE82. Je to 8- uzlový čtyřúhelníkový prvek s dvěma deformačními parametry u, v . Pro 3D úlohu jsem volil SOLID95. Je to 20- uzlový šestistěn s třemi deformačními parametry u, v, w .

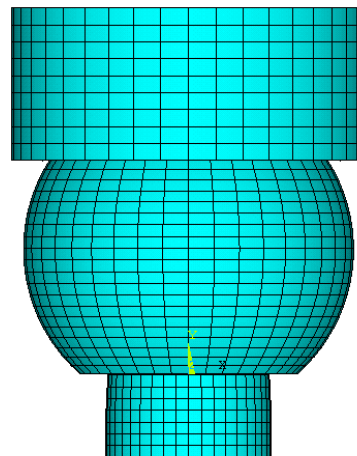
2D osově symetrický model



3D čtvrtinový model



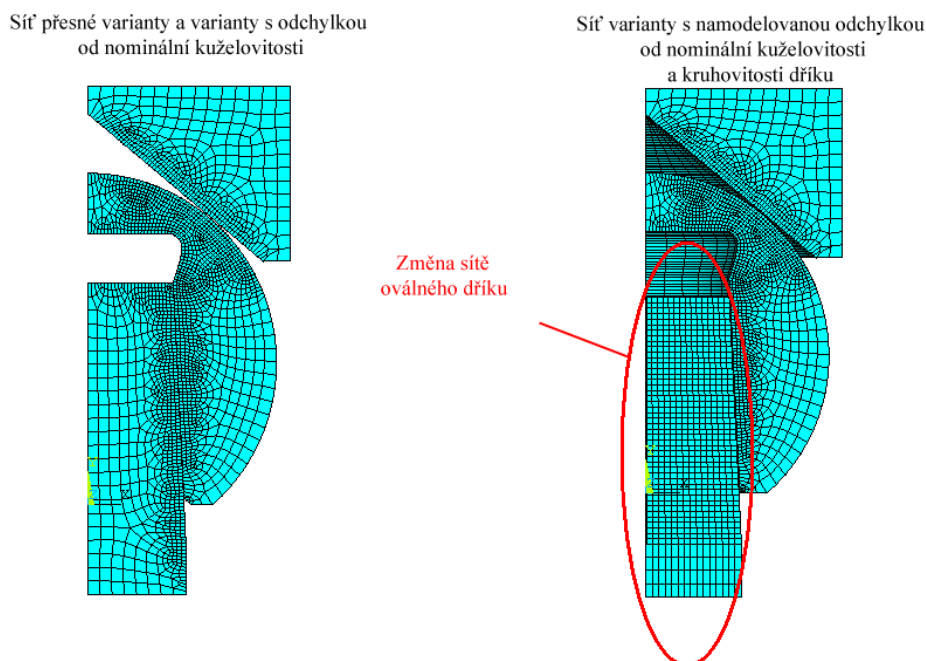
3D plný model



Obr. 10.2.2.1 Srovnávací modely

Druhá skupina modelů zahrnuje už modely, kterých analýza je klíčovým cílem této práce. Je to skupina 90 modelů, které představují modely 5 vzorků zápichu na 6 různých keramických hlavících vymodelovaných přesně nebo s dvěma odchylkami od nominálních hodnot, které jsou ovalita a kuželovitost (kapitola. 10.2.1) Návrh sítě na těchto 90 modelech vychází z citlivostní analýzy, ve které se už návrh sítě řešil (kapitola. 8.1). Základem je tedy plošná sít uvedená na [Obr. 8.1.1, str. 15] o velikosti elementů $ele1=0,25$ a $ele2=1$.

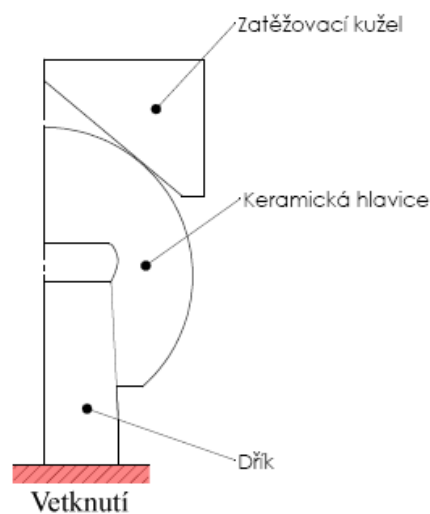
Prvky jsem volil stejné jako v první skupině modelů. K výraznému rozdílu topologie sítě dochází při modelu dříku u tvarové odchylky ovality. Elementy na kontaktní ploše jsou sice zachovány vzhledem k přesnému modelu dříku, ale uvnitř již ne. Je to způsobeno tím, že vymodelování dříku v obou variantách je zcela odlišné. Na následujícím [Obr. 10.2.2.2] jsou znázorněny sítě vybraných hlavních představitelů druhé skupiny modelů.



Obr. 10.2.2.2 Sít' přesné varianty a varianty s tvarovými odchylkami

10.3 Model vazeb

Tělesa v prostoru musí být jednoznačně určena deformačními okrajovými podmínkami, které zabrání pohybu těles jako tuhých celků. Z pohledu MKP pokud by tato podmínka nebyla splněna, tak by došlo k singularitě matice tuhosti, divergenci řešení. Při tomto řešení je použito více vazeb, které budou podrobně probrány v dalším textu (kapitola 10.4 Realizace kontaktu). Jako základní vazby budu brát vetknutí dříku, vazba mezi hlavicí a dříkem a vazba mezi hlavicí a zatěžovacím kuželem [Obr. 10.3.1]

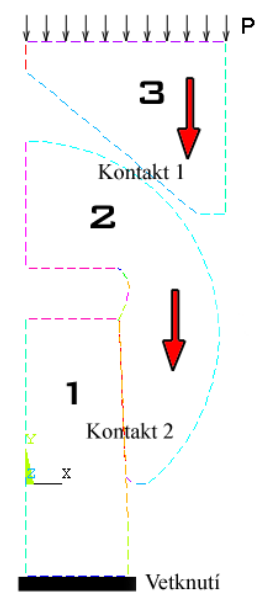


Obr. 10.3.1 Model vazeb

10.4 Realizace kontaktu

10.4.1 Konvergence numerického řešení MKP soustavy HDK

Při výpočtu kontaktní úlohy metodou konečných prvků programem ANSYS, jsem vzhledem k zadané úloze a požadavků na věrohodnost výpočtu byl nucen použít numericky model

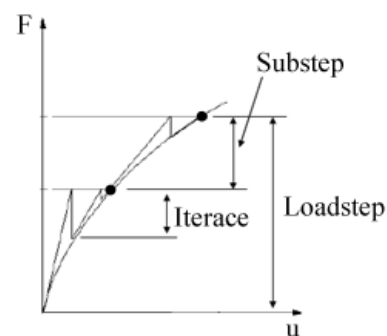


Obr. 10.4.1.1 Realizace kontaktu

složený z třech komponentů [dříku(1) ,keramické hlavice(2) ,zatěžovacího kužele(3)] [Obr. 10.4.1.1]. Kvůli vyššímu počtu různých geometrických modelů, nastavování geometrické polohy vůči sobě a nastavení řešiče konečnoprvkového programu co všechno souvisí s konvergencí této úlohy, jsem napsal obecné macro do textového souboru. První výpočty jsem prováděl na 2D axisymetrické úloze abych viděl, jak se model bude chovat. Zatěžoval jsem v třech krocích a to deformačně posuv 2-1, potom deformačně posuv 3-2 a pak silově (zatížení tlakem P). Je nutno dbát na to, aby v každém kroku byla všechna tělesa určena v prostoru. Dřík byl v průběhu celého procesu zatěžován vetknutý ($U_X=U_Y=U_Z=0$). Tento postup se jevil jako komplikovaný co se týče nastavování polohy pro různé geometrie modelu, proto jsem jeden deformační krok vypustil.

Zatěžoval jsem teď ve dvou krocích. První bylo deformační zatížení tělesa (3) které posunulo těleso (2) a došlo ke kontaktu všech tří těles. Počet substepů v tomto prvním loadstepu jsem volil 10 (NSUBST,10), přičemž automatic time stepping jsem nechal zapnutý (AUTOTS,On) aby si řešič programu ANSYS mohl sám upravovat délku kroku a případně ukončit výpočet po méně substepích. Po té jsem v druhém substepu zatěžoval silově. Kvůli rovnoměrnosti zatížení a požadavků na věrohodnost výpočtu v, porovnání se skutečnou zkouškou, jsem použil zatížení tlakem tělesa (3) viz [Obr. 10.4.1.1]. Aby bylo možné posuzovat vliv síly

Označení etap procesu řešení v programovém systému ANSYS



Obr. 10.4.1.2 Označení etap řešení

objektivně, musel jsem v příkazové části macra dodat přepoččet tlaku na sílu. Aby úloha konvergovala je zapotřebí dodržet následující podmínku: Maximální hodnota napětí v kontaktu při deformačním zatížení (v mém případě první loadstep) nemůže překročit maximální hodnotu napětí v kontaktu, která by vznikla při silovém zatížení. To znamená, že pokud by deformační zatížení (první loadstep) bylo příliš velké, reakce od tohoto zatížení by se projevila v druhém substepu, jako zatížení v opačném směru, čím se stane úloha staticky neurčitá a dojde k divergenci.

10.4.2 Výběr algoritmu pro kontaktní řešení

Existují tři základní přístupy pro řešení kontaktního problému:

- 1) Pokutový přístup (Penalty method)
- 2) Metoda Lagrangeových multiplikátorů
- 3) Augmented Lagrangian

Add1) Při použití **Penalty method** se kontaktní tuhost prvku mění průběžně v závislosti na kinematických podmínkách ve styku. Výhodou tohoto přístupu je že se nemění počet deformačních parametrů ani velikost matice tuhosti řešené soustavy. Nevýhodou je, že vždy existuje přesah tzn. že vždy dojde k penetraci při styku. Velikost penetrace se dá ovlivnit volbou tuhosti (k_N) mezi prvky. Jestliže je k_N malé, tak dochází k velkým přesahům a řešení rychle konverguje. Jestliže je k_N naopak vysoké tak přesahy jsou velké a konvergence je těžká dokonce řešení může divergovat. Optimální je takové nastavení k_N kdy není řádově ovlivněný rozsah kontaktní plochy nebo lokální napjatost v okolí kontaktu.

Add2) **Metoda Lagrangeových multiplikátorů** je založena na tom, že musí být splněna podmínka nulového přesahu (nulové penetrace). To je výhodou této metody. Nevýhodou této metody je, že vyžaduje rozšíření neznámých parametrů o kontaktní tlaky. Další nevýhodou je, že matice soustavy má na diagonále nuly a z toho plynou konvergenční problémy při řešení dané soustavy.

Add3) **Augmented Lagrangian** je kombinací obou předem zmíněných přístupů.

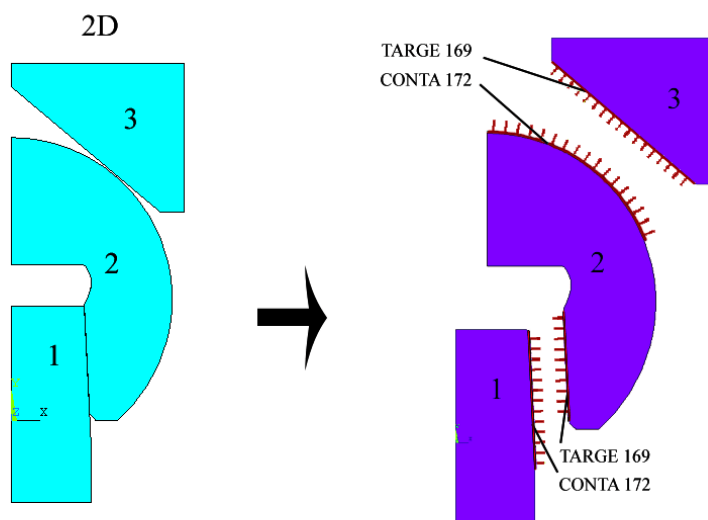
Pro řešení soustavy HDK jsem použil Augmented Lagrangian algoritmus. Citlivostní analýza pro toto nastavení řešiče byla provedena (kapitola 8.2). V této analýze se ukázalo, jaký má vliv nastavení tuhosti mezi prvky na napjatost v soustavě. Proto je nezbytné při řešení kontaktní úlohy vědět, jaký algoritmus použít a jak ho správně nastavit, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků.

10.4.3 Výběr kontaktních párů

Kontaktní pár na stykových površích je tvořen prvky typu „cílový povrch“ (target surface) a „kontaktní povrch“ (contact surface) [3],[10].

Cílový povrch jsem modeloval prvky TARGE169 v případě 2D úlohy [Obr. 10.4.3.1] a TARGE170 v případě 3D úlohy [Obr. 10.4.3.2].

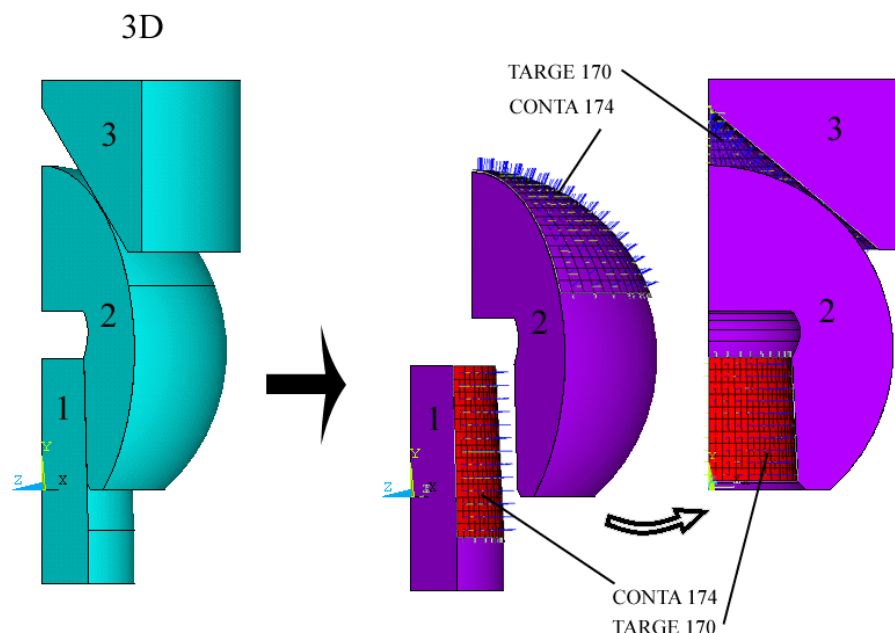
Kontaktní povrch jsem modeloval prvky CONTA172 v případě 2D úlohy [Obr. 10.4.3.1] a CONTA174 v případě 3D úlohy [Obr. 10.4.3.2].



Obr. 10.4.3.1 2D Kontakt

Kontaktní prvky jsem zadával na kuželové části mezi hlavicí a dříkem (1-2). V místě kontaktu hlavice a zatěžovacího kužele (2-3) jsem zadával kontaktní prvky pouze na část kružnice 2D (koule 3D) [Obr. 10.4.3.1], [Obr. 10.4.3.2] kvůli jednoduchosti výpočtu a lepší konvergenci úlohy. Normály stykového povrchu u všech elementů musí být orientované

směrem ven z tělesa, jak je možno vidět i na [Obr. 10.4.3.1], [Obr. 10.4.3.2]. Pro vygenerování kontaktních prvků na kontaktních ploších byl použit příkaz ESURF.



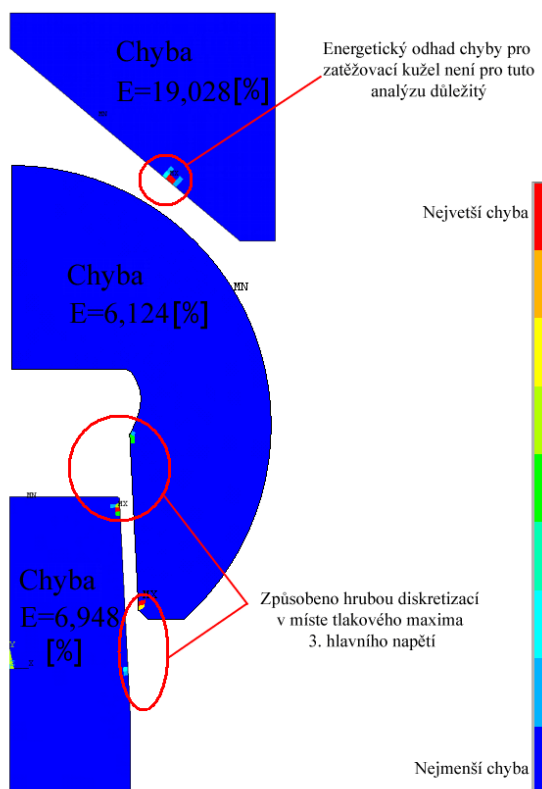
Obr. 10.4.3.2 3D Kontakt

Na [Obr. 10.4.3.1] je tedy zobrazeno rozložení kontaktních prvků na čáře a na [Obr. 10.4.3.2] je zobrazeno rozložení kontaktních prvků na ploše.

Kontaktní úlohy jsou nelineární úlohy a to z toho důvodu, že okrajová podmínka se mění v průběhu zatěžování. Pro řešení soustavy nelineárních rovnic využívá ANSYS několik metod. Já jsem pro výpočet soustavy HDK zvolil Newton-Raphsonovu iterační metodu. Residuum jsem měl při výpočtu nastaveno na hodnotě 0,001.

10.5. Odhad chyby při výpočtu

Aby bylo možno přesnost hodnoty výsledku brát za dostačující je nutno zhodnotit numerickou chybu, která vznikla při výpočtu [1]. Ta je závislá od hustoty sítě a od stupně polynomu prvků této sítě. Vzhledem k tomu, že soustava HDK je složena ze dvou rozličných materiálů, je zapotřebí určovat energetický odhad chyby pro každé těleso jednotlivě. Procentuálně největší chyba vzniká v místech tlakového maxima 3. hlavního napětí, tj. v místech kontaktu těles. Na [Obr. 10.5.1] je znázorněna chyba pouze pro 2D osově symetrickou úlohu. Je použita síť $ele1=0.25$ a $ele2=1$ viz (kapitola 8.1).



Obr. 10.5.1 Energetický odhad chyby

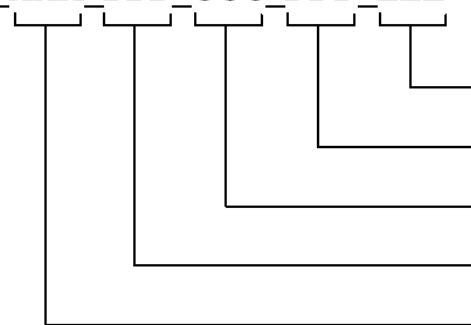
Z tří energetických odhadů chyb ($E = 19,028\%$; $E = 6,124\%$; $E = 6,948\%$) je vidět, že největší hodnoty dosahuje chyba zatěžovacího kužele. Vzhledem k tomu, že tato analýza není soustředěna na posouzení zatěžovacího kužele (slouží pouze jako zátěžný člen), nemá tato chyba podstatný význam. Co se týče energetického odhadu chyby dřívku a keramické hlavice energetický odhad chyby se pohybuje kolem 6 - 7%, což lze pokládat za numerický přesné řešení. Další snížení této chyby by vzhledem k jemnosti sítě mělo za následek prodloužení výpočtu zejména u 3D úlohy.

10.6 Varianty řešení

Číslo varianty	Název	Popis	Vysvětlivky
1.	VZOREK_28_13.5_X	přesná varianta bez namodelované tvarové odchylky od nominální hodnoty	X € (1 ÷ 5) <i>Každá varianta je řešena na 5-ti různých přechodech do dna keramické hlavice</i>
2.	VZOREK_28_16.75_X		
3.	VZOREK_28_20_X		
4.	VZOREK_32_15_X		
5.	VZOREK_32_19_X		
6.	VZOREK_32_23_X		
7.	VZOREK_K_28_13.5_X	varianta s namodelovanou tvarovou odchylkou 5' od nominální kuželovitosti (vrcholový úhel hlavice je větší než úhel dříku)	K- kuželovitost <i>Odchylka od nominální kuželovitosti kontaktních ploch hlavice a dříku. Odchylka byla namodelována pouze na femorálním dříku</i>
8.	VZOREK_K_28_16.75_X		
9.	VZOREK_K_28_20_X		
10.	VZOREK_K_32_15_X		
11.	VZOREK_K_32_19_X		
12.	VZOREK_K_32_23_X		
13.	VZOREK_K_O_28_13.5_X	varianta s namodelovanou tvarovou odchylkou 5' od nominální kuželovitosti (vrcholový úhel hlavice je větší než úhel dříku) a ovality dříku	O- ovalita <i>Odchylka od nominální kružovitosti příčného řezu femorálního dříku</i>
14.	VZOREK_K_O_28_16.75_X		
15.	VZOREK_K_O_28_20_X		
16.	VZOREK_K_O_32_15_X		
17.	VZOREK_K_O_32_19_X		
18.	VZOREK_K_O_32_23_X		

Tabulka. 10.6.1

VZOREK_AAA_BBB_CCC_DDD_EEE



Označení jednoho z 5-ti různých přechodů (1-5)

Výška od vyústění kuželové části po dno hlavice v osové směru (mm)

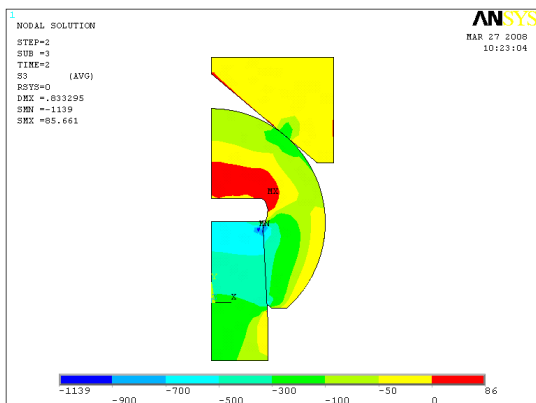
Vnější průměr hlavice (mm)

Pokud je ovalita (O) jinak není zadán

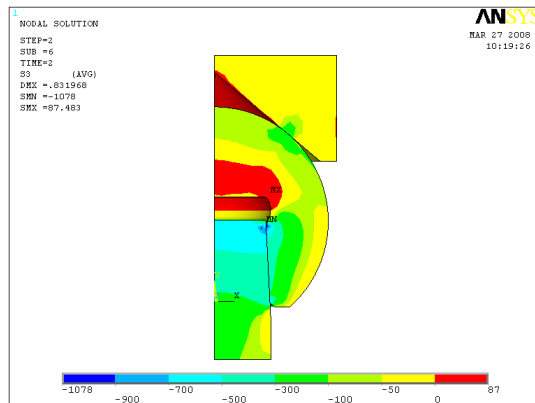
Pokud je kuželovitost (K) jinak není zadán

10.7 Srovnávací analýza třech úrovní modelů

Soustava HDK je symetrická, což umožňuje využít k řešení 3 úrovně modelů. Omezení je pouze u 2D osově symetrické úlohy v tom, že není možno na tomto modelu řešit tvarové odchylky, které jsou prostorové ve třech souřadnicích. Z tohoto úsudku jsem vybral k řešení soustavy HDK pouze model 2D osově symetrický a 3D čtvrtinově symetrický. Aby bylo možno posoudit, či výsledky soustavy HDK řešené na těchto úrovních modelů jsou korektní, bylo nutno porovnat tyto dva stupně modelování ještě s třetím o stupeň vyšším modelem (3D plný model). Pro tuto analýzu jsem vykreslil 3. hlavní napětí, aby bylo dobře vidět kontaktní místa, které vypovídají o tom, či ve všech případech je kontakt v pořádku.

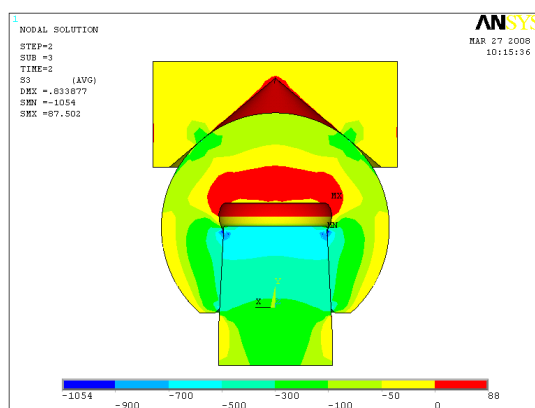


Obr. 10.7.1 2D osově symetrický model



Obr. 17.7.2 3D čtvrtinově symetrický model

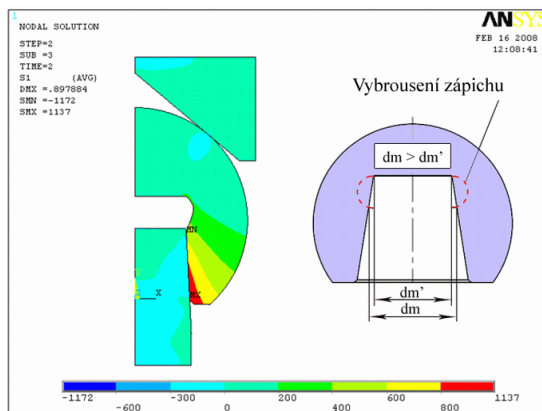
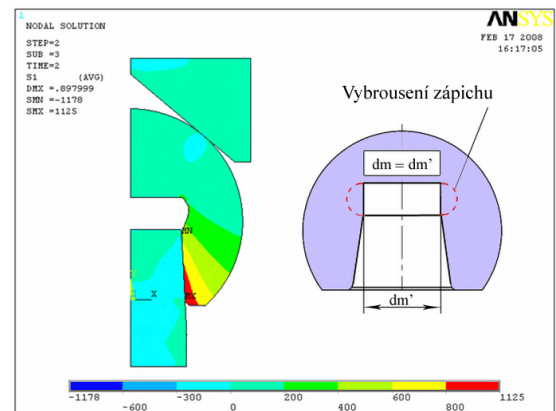
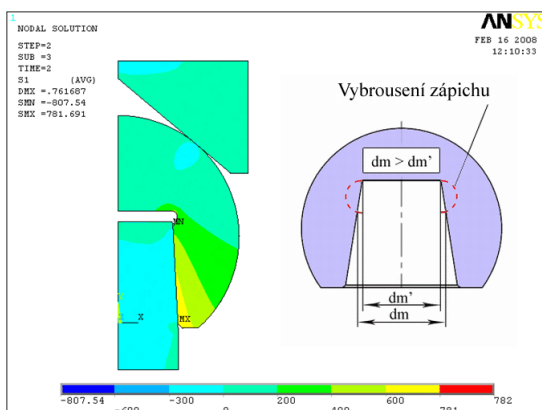
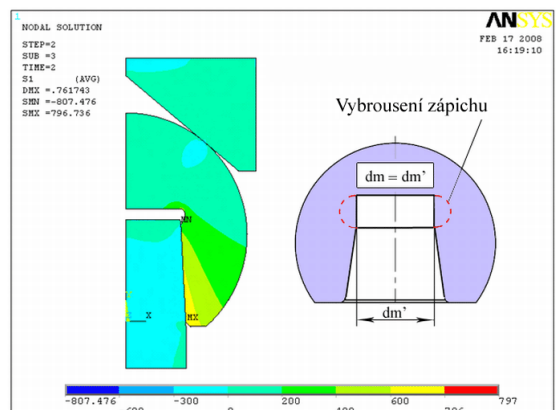
Z analýzy je možné vidět, že výsledky všech tří stupňů modelů [Obr. 10.7.1], [Obr. 10.7.2], [Obr. 10.7.3] se téměř shodují. Rozhodujícím faktorem ve výběru vhodného stupně modelu, který použiji pro samotné řešení, byla rychlost výpočtu a možnost realizace tvarových odchylek. Nejhorší je na tom z pohledu délky výpočtu 3D plný model. Proto tento model už nebudu dále používat.



Obr. 10.7.3 3D plný model

10.8 Analýza vlivu minimálního průměru kužele hlavice

Lze uvažovat nad dvěma různými způsoby výroby zápichu na dně hlavice. Vzhledem k tomu, že technologie výroby keramických hlavic je chráněna výrobcem, a já jsem neměl k dispozici informace o její realizaci, musel jsem zahrnout do této analýzy oba možné způsoby výroby zápichu a zhodnotit rozdíly z pohledu napjatosti. První úvaha [Obr. 10.8.1], [Obr. 10.8.3] je taková, že do předpřipravené keramické hlavice se vybrousí kuželový otvor až po dno a pak se vybrousí zápich. Druhá úvaha [Obr. 10.8.2], [Obr. 10.8.4] je taková, že kuželový otvor se nevybrousí až po dno, ale jen do určité vzdálenosti nad dno (vzdálenost je daná osovou výškou zápichu) a poté se tentokrát už ne do kuželové plochy ale válcové vybrousí zápich. Tuto analýzu jsem provedl na vzorcích VZOREK_28_13.5_3 a VZOREK_28_13.5_5.

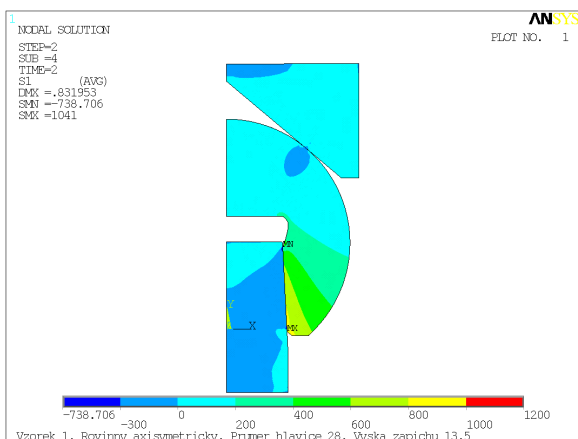

Obr. 10.8.1 VZOREK_28_13.5_3 $dm > dm'$

Obr. 10.8.2 VZOREK_28_13.5_3 $dm = dm'$

Obr. 10.8.3 VZOREK_28_13.5_5 $dm > dm'$

Obr. 10.8.4 VZOREK_28_13.5_5 $dm = dm'$

Z analýzy plyne, že nezáleží z pohledu napjatosti, jestli použiji ve výpočtech model dle první úvahy nebo dle druhé.

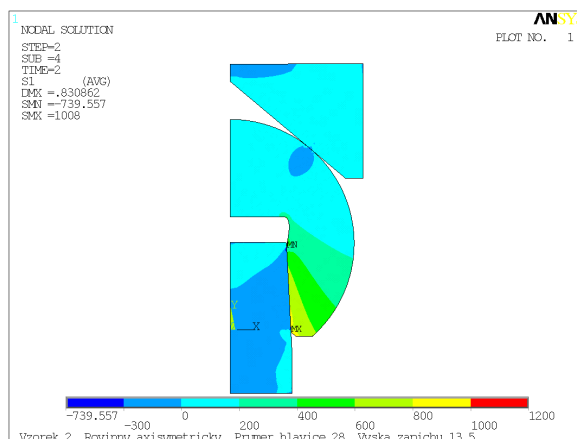
11. ANALÝZA VZORKŮ BEZ TVAROVÉ ODCHYLKY

11.1 Porovnání VZOREK_28_13.5_X

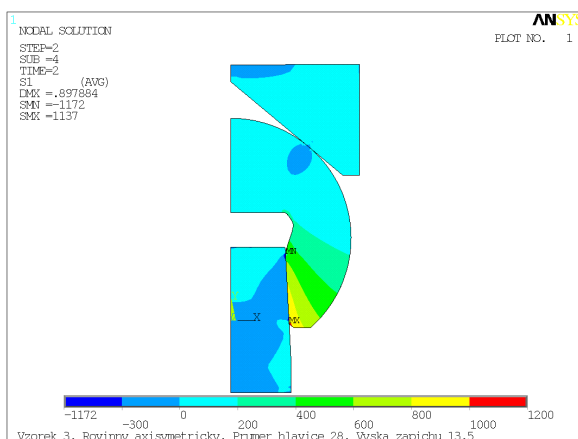
Vzhledem k tomu že 1. hlavní napětí zde zobrazuje tahová napětí v obvodovém směru, která jsou největší a taky pro keramiku nejnebezpečnější, nebudeme při porovnání uvažovat ostatní dvě hlavní napětí.



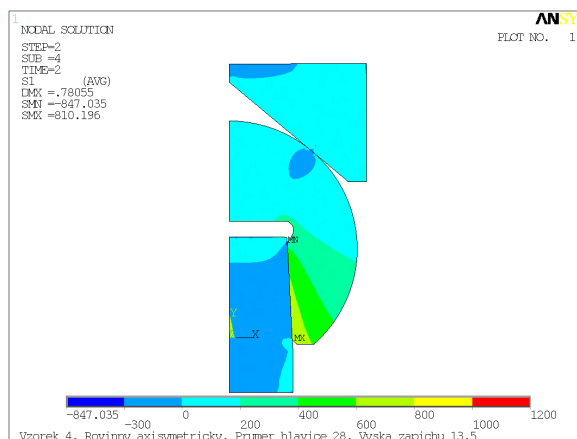
Obr. 11.1.1 VZOREK_28_13.5_1



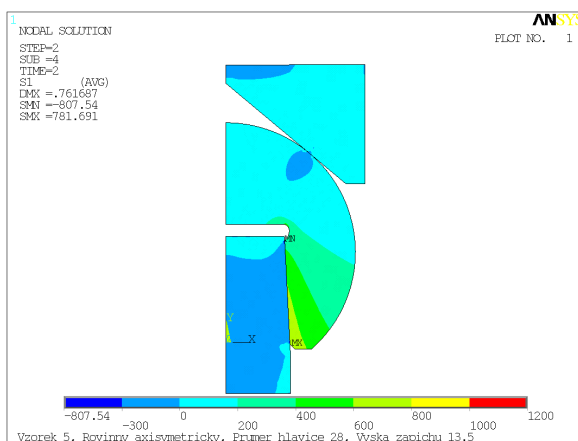
Obr. 11.1.2 VZOREK_28_13.5_2



Obr. 11.1.3 VZOREK_28_13.5_3



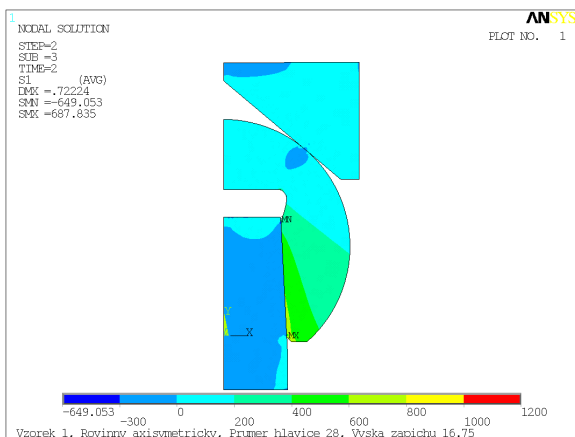
Obr. 11.1.4 VZOREK_28_13.5_4



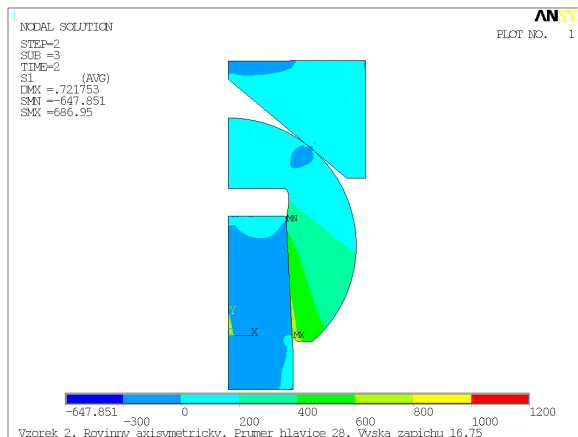
Obr. 11.1.5 VZOREK_28_13.5_5

Z výsledků 1. varianty (průměr hlavice 28 mm, hloubka kužele hlavice 13.5 mm, tabulka 10.6.1, str. 38) s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3. Velikost maximální hodnoty napětí výrazně ovlivňuje délka přechodu do dna hlavice braná v osové směru, tzn. osová hloubka zápichu.

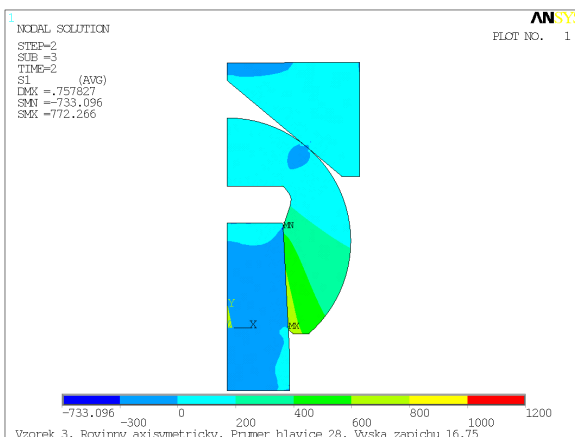
11.2 Porovnání VZOREK_28_16.75_X



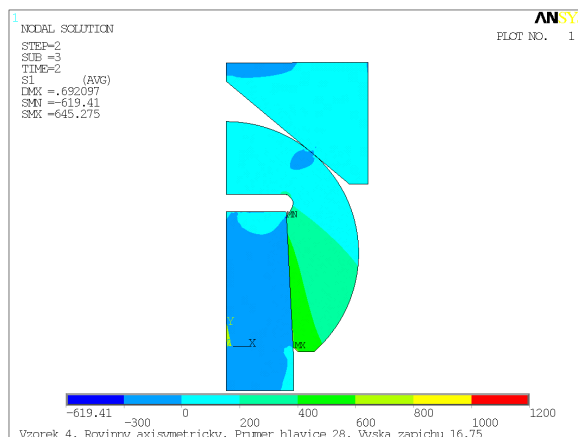
Obr. 11.2.1 VZOREK_28_16.75_1



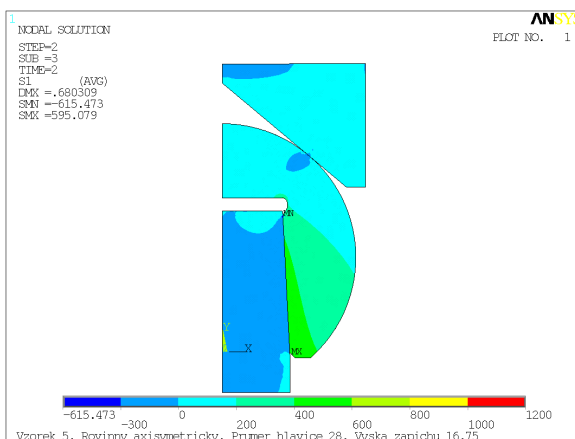
Obr. 11.2.2 VZOREK_28_16.75_2



Obr. 11.2.3 VZOREK_28_16.75_3



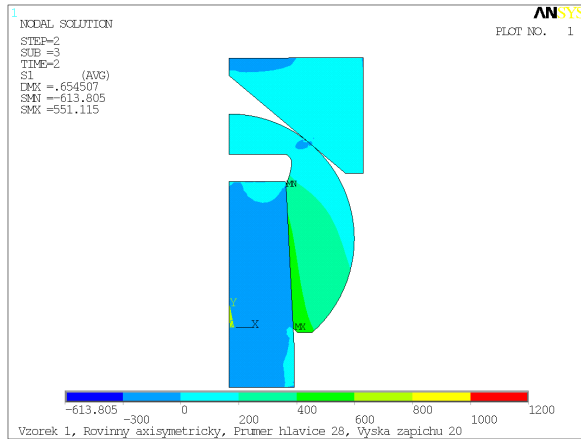
Obr. 11.2.4 VZOREK_28_16.75_4



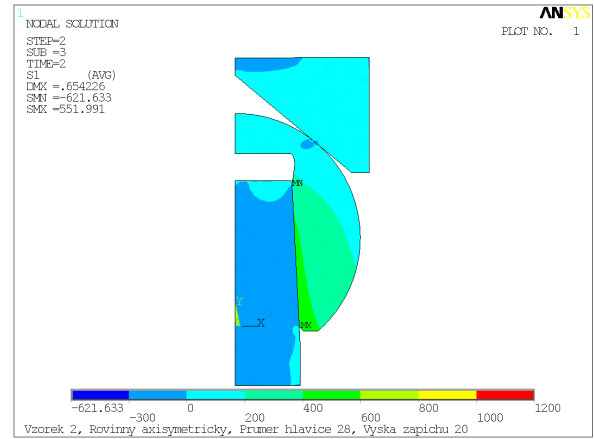
Obr. 11.2.5 VZOREK_28_16.75_5

Z výsledků 2. varianty (průměr hlavice 28 mm , hloubka kužele hlavice 16.75 mm, tabulka 10.6.1, str. 38) s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že maximální napětí poklesla vlivem zvětšení kontaktních ploch, což je způsobeno změnou geometrie. Největší hodnota maximálního napětí je z 2. varianty u 3 tvaru zápichu.

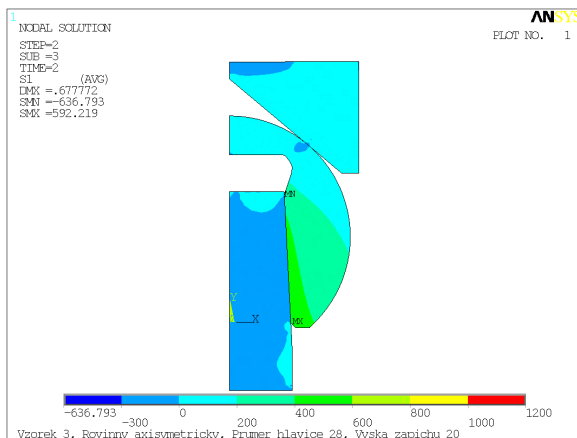
11.3 Porovnání VZOREK_28_20_X



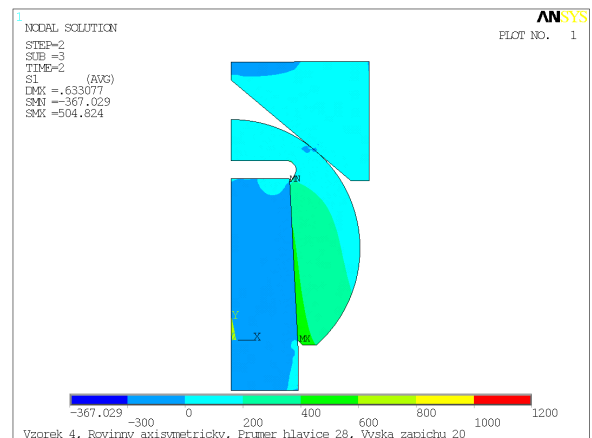
Obr. 11.3.1 VZOREK_28_20_1



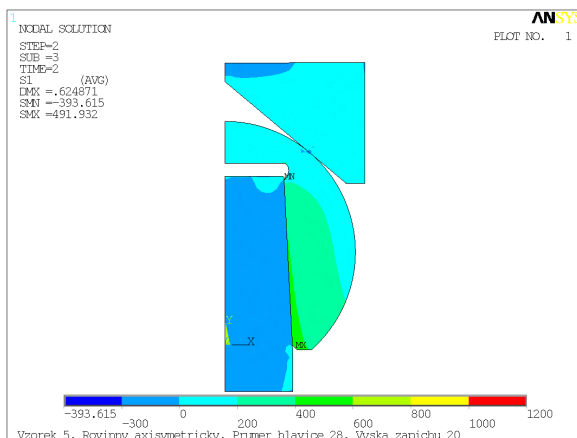
Obr. 11.3.2 VZOREK_28_20_2



Obr. 11.3.3 VZOREK_28_20_3



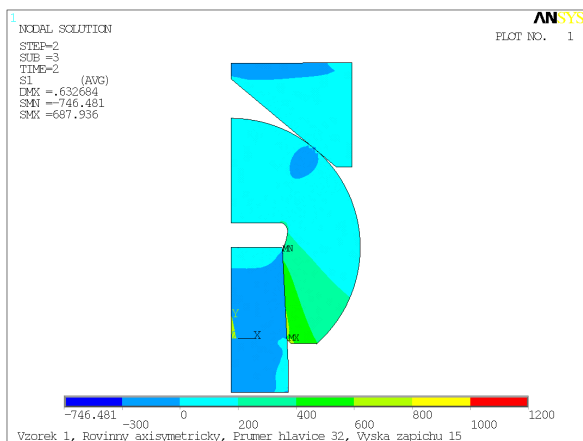
Obr. 11.3.4 VZOREK_28_20_4



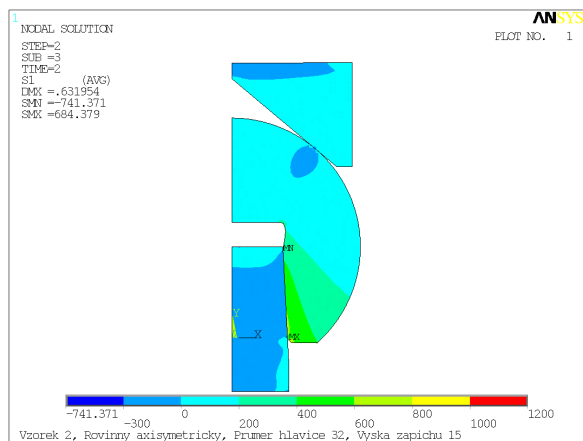
Obr. 11.3.5 VZOREK_28_20_5

Z výsledků 3. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že maximální napětí znovu poklesla vlivem zvětšení kontaktních ploch, což je způsobeno změnou geometrie. Největší hodnota maximálního napětí je z 3. varianty u 3 tvaru zápichu.

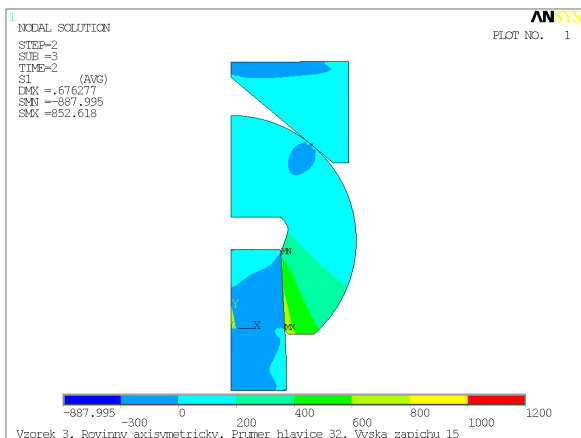
11.4 Porovnání VZOREK_32_15_X



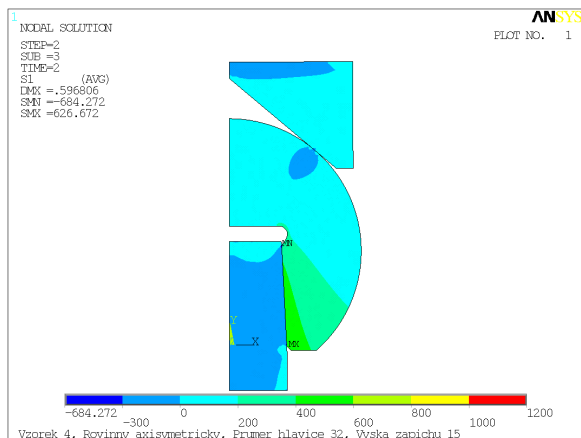
Obr. 11.4.1 VZOREK_32_15_1



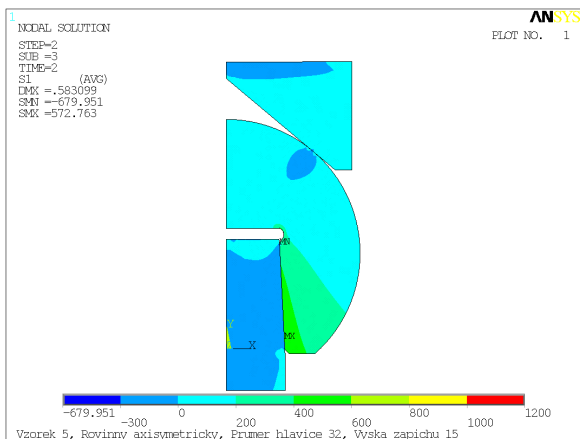
Obr. 11.4.2 VZOREK_32_15_2



Obr. 11.4.3 VZOREK_32_15_3



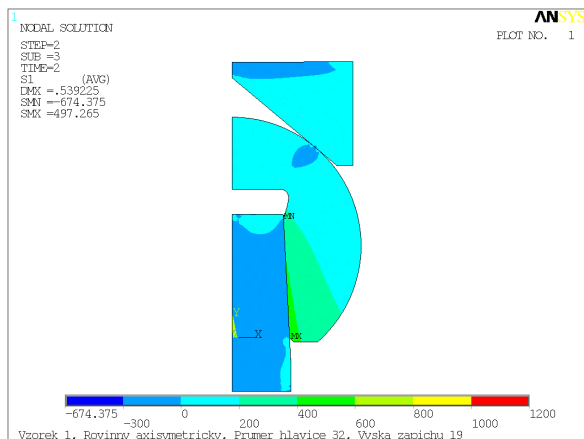
Obr. 11.4.4 VZOREK_32_15_4



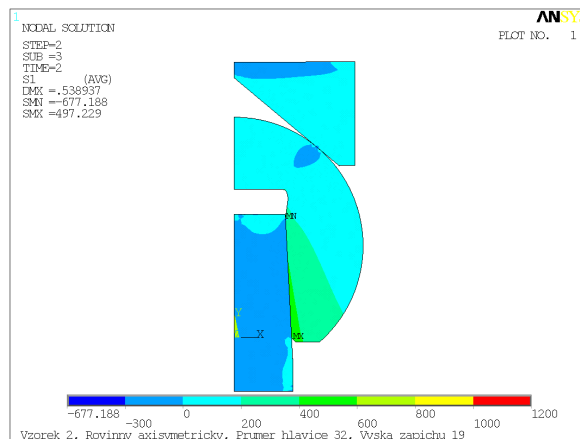
Obr. 11.4.5 VZOREK_32_15_5

Z výsledků 4. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že maximální napětí jsou nižší než u 1. varianty, což je způsobeno změnou geometrie (zvětšení kontaktních ploch a vnějšího průměru hlavice). Největší hodnota maximálního napětí je ze 4. varianty u 3 tvaru zápichu.

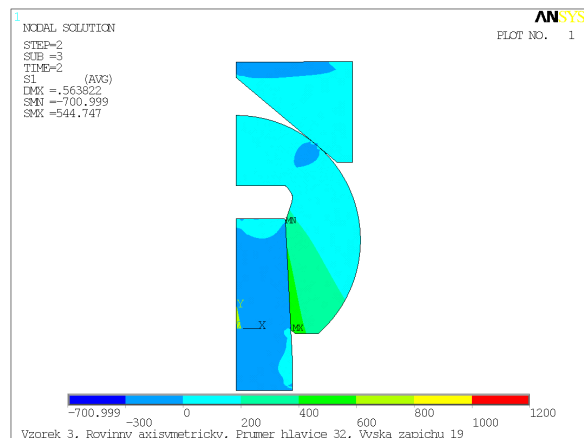
11.5 Porovnání VZOREK_32_19_X



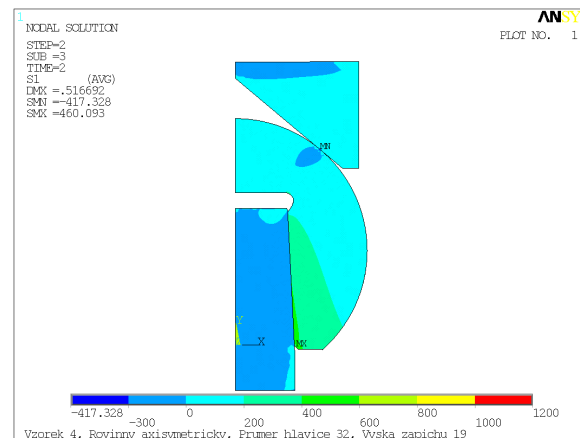
Obr. 11.5.1 VZOREK_32_19_1



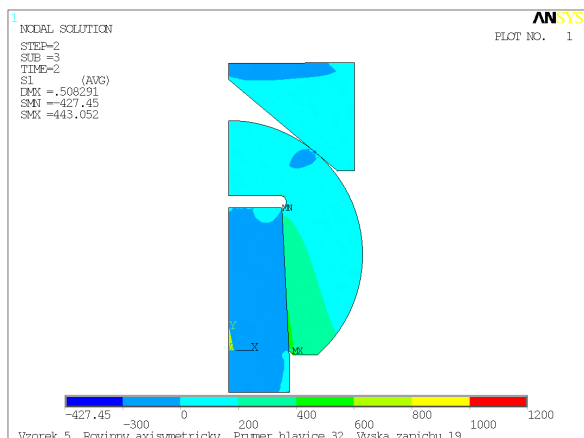
Obr. 11.5.2 VZOREK_32_19_2



Obr. 11.5.3 VZOREK_32_19_3



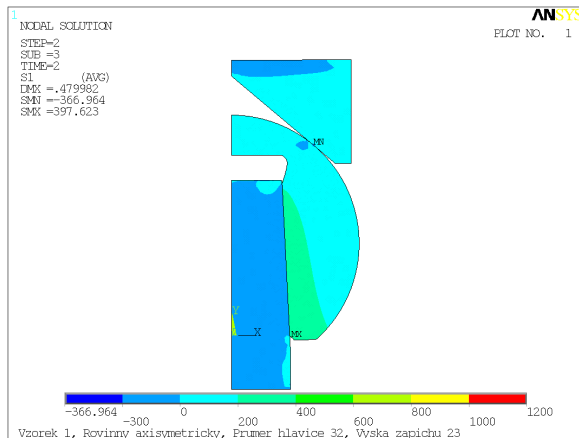
Obr. 11.5.4 VZOREK_32_19_4



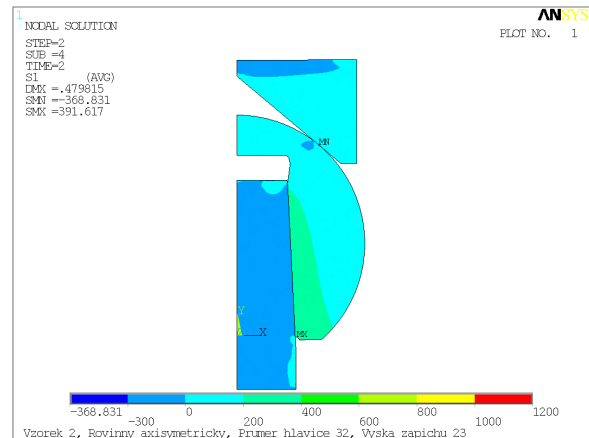
Obr. 11.5.5 VZOREK_32_19_5

Z výsledků 5. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že maximální napětí jsou nižší než u 4. varianty, což je způsobeno změnou geometrie (zvětšení kontaktních ploch). Největší hodnota maximálního napětí je z 5. varianty u 3 tvaru zápichu.

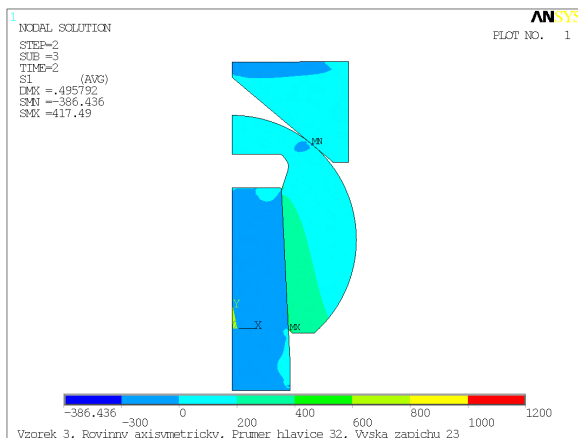
11.6 Porovnání VZOREK_32_23_X



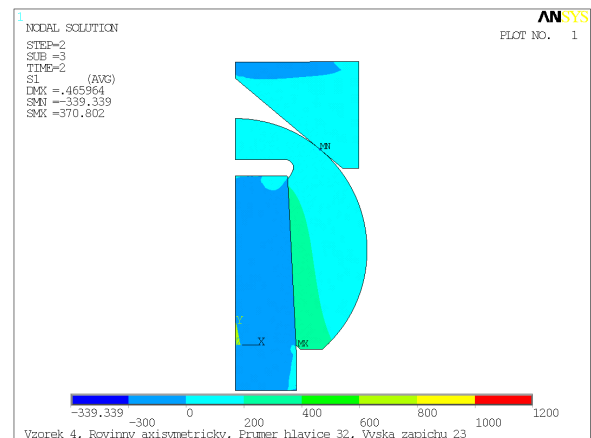
Obr. 11.6.1 VZOREK_32_23_1



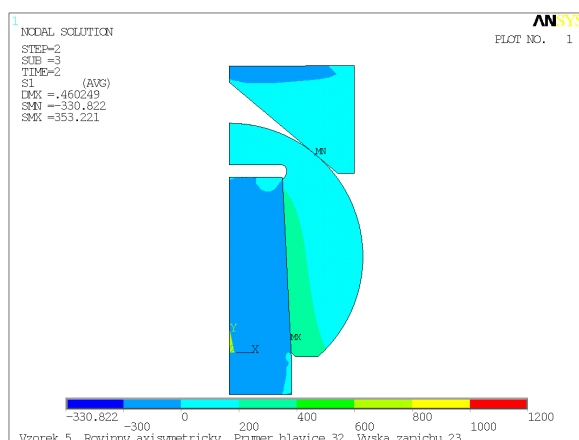
Obr. 11.6.2 VZOREK_32_23_2



Obr. 11.6.3 VZOREK_32_23_3



Obr. 11.6.4 VZOREK_32_23_4



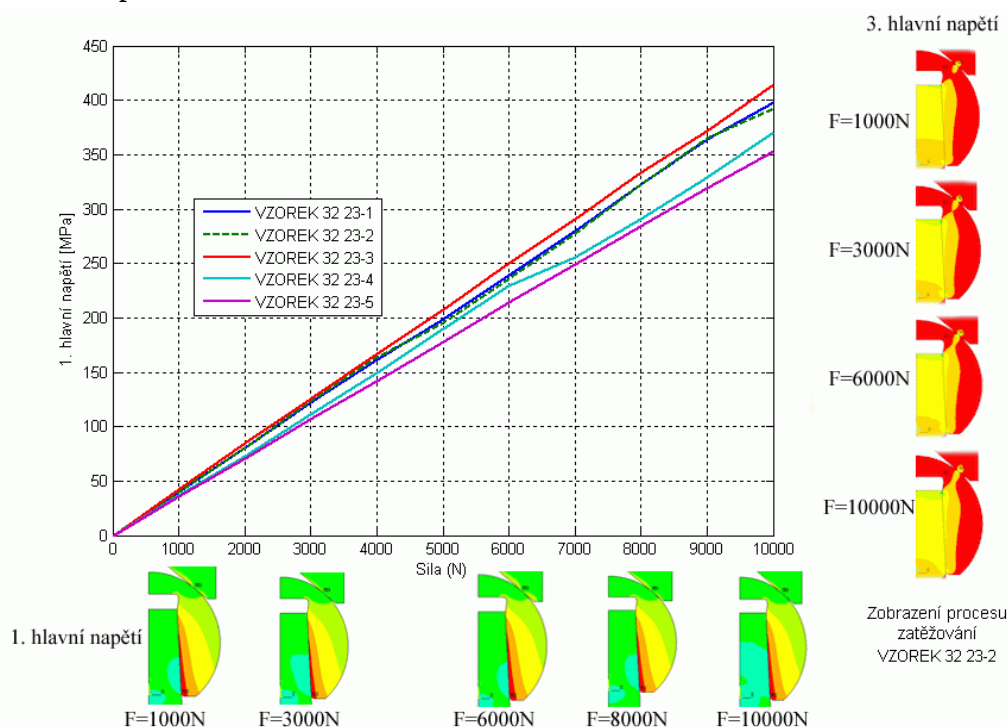
Obr. 11.6.5 VZOREK_32_23_5

Z výsledků 6. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že maximální napětí jsou nejmenší ze všech předešlých variant, což je způsobeno změnou geometrie (největší kontaktní plochy a vnější průměr hlavice). Největší hodnota maximálního napětí je z 6. varianty u 3 tvaru zápichu.

11.7 Zhodnocení vzorků bez tvarové odchylky

V předchozím textu (kapitoly 11.1 – 11.6) bylo analyzováno 30 kombinací 6. variant s 5 různými zápichy. Z této analýzy plynou následující poznatky.

Se zvětšující se vzdáleností mezi dnem hlavice a vyústěním hlavice se hodnota maximálních napětí v obvodovém směru snižuje. Je to způsobeno snížením tlakového zatížení na kontaktní plochu a následným zmenšením rozevírání kužele. To znamená, že při zvětšující se osové vzdálenosti mezi dnem a vyústěním hlavice se zvětšuje kontaktní plocha dvou navzájem dosedajících komponent (hlavice a dříku). Velikost této plochy je také závislá na velikosti zápichu v hlavici. Čím je zápich v osovém směru „Z“ [Obr. 9.1.1.1, str. 21] delší, tím je plocha menší. Dále se zvětšujícím se průměrem hlavice dochází také ke snížení maximálního napětí.

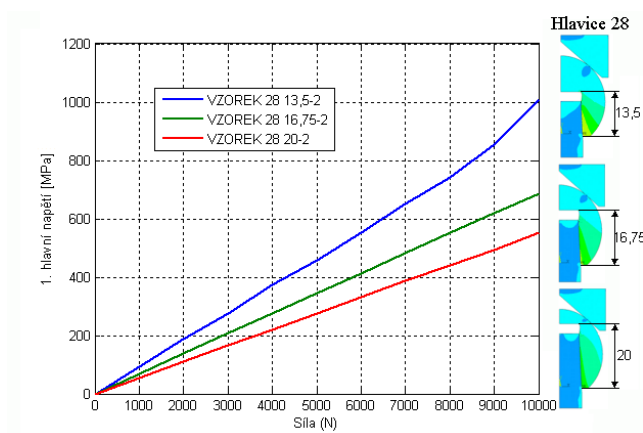


Graf. 11.7.1 Proces zatěžování bez tvarové odchylky

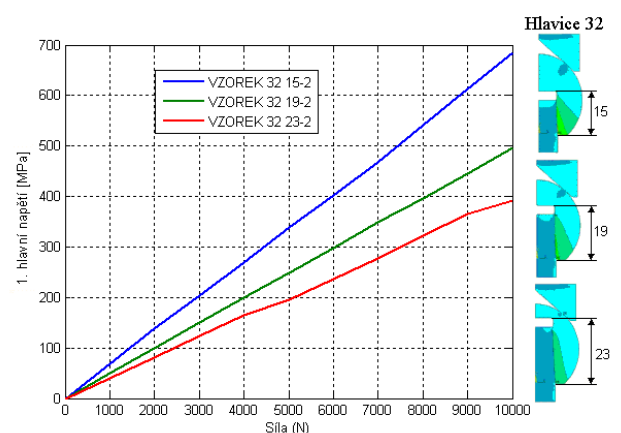
Nejkritičtější je 1. varianta s 3. tvarem zápichu. Je to z toho důvodu, že kontaktní plocha je u ní nejmenší. Tím se při konstantním zatížení vyvodí největší tlak na kontaktní plochu, což způsobí největší rozevření kužele hlavice. Pro ukázkou průběhu zatěžování jsem vybral 6. variantu [Graf. 11.7.1].

Z analýzy je vidět, že průběhy při silovém zatěžování v závislosti na maximálním 1. hlavním napětí jsou téměř lineární. Je to proto, že kontaktní plocha se v průběhu procesu zatěžování nemění, její velikost zůstává konstantní. Některé odklony od linearity procesu zatěžování jako je vidět například u vzorku „VZOREK_32_23-4“ [Graf. 11.7.1], jsou způsobeny přemístěním maxima 1. hlavního napětí na hlavici.

Je zapotřebí ještě ukázat, že zatížení je lineární také pro ostatní varianty bez tvarové odchylky. Pro ukázkou analyzuji všechny hloubky kužele keramické hlavice s dvěma vnějšími průměry pro tvar zápichu 2 na dně kužele hlavice.



Graf. 11.7.2 Proces zatěžování bez tvarové odchylky (vnější průměr hlavice 28)

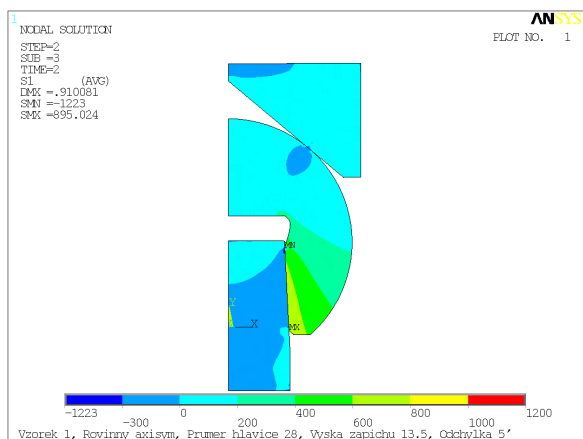


Graf. 11.7.3 Proces zatěžování bez tvarové odchylky (vnější průměr hlavice 32)

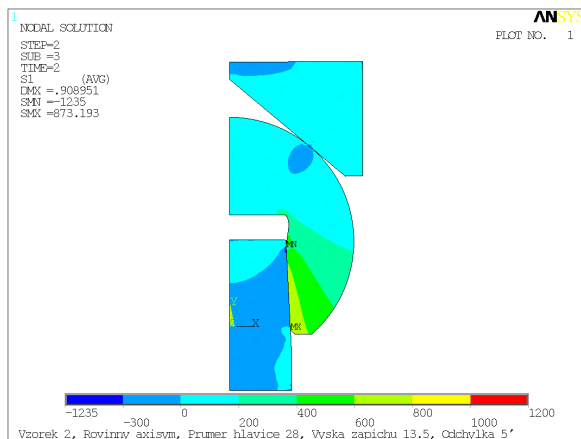
Z grafů [Graf. 11.7.2] a [Graf. 11.7.3] je vidět, že proces zatěžování je ve všech případech téměř lineární. Křivky zatěžování celé soustavy HDK a samotné hlavice jsou stejné. Nedochází k přemístění maxima napětí v obvodovém směru z hlavice na dřík nebo opačně, jako tomu bude v následující analýze.

12. ANALÝZA VZORKŮ S TVAROVOU ODCHYLKOU OD NOMINÁLNÍ KUŽELOVITOSTI

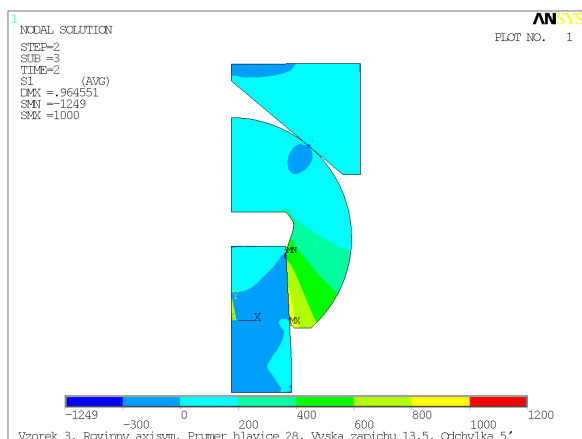
12.1 Porovnání VZOREK_K_28_13.5_X



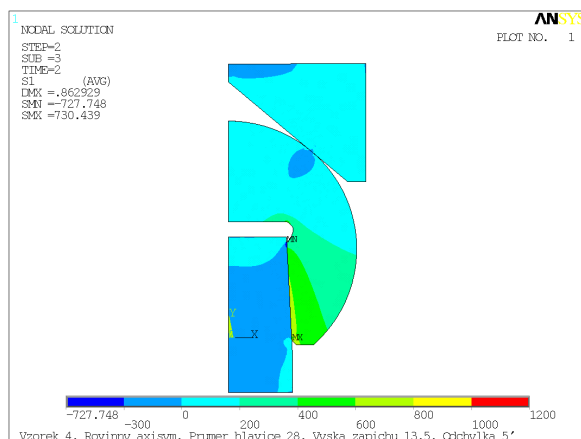
Obr. 12.1.1 VZOREK_K_28_13.5_1



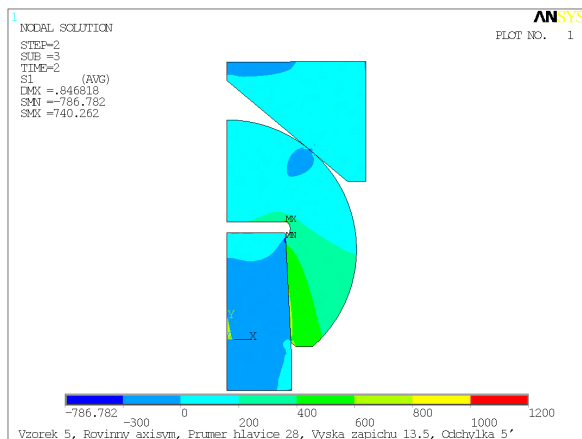
Obr. 12.1.2 VZOREK_K_28_13.5_2



Obr. 12.1.3 VZOREK_K_28_13.5_3



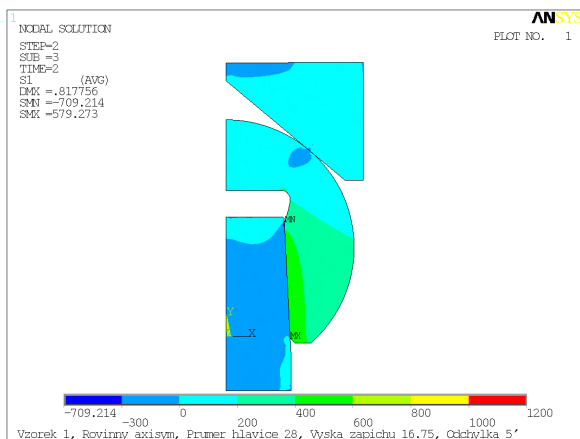
Obr. 12.1.4 VZOREK_K_28_13.5_4



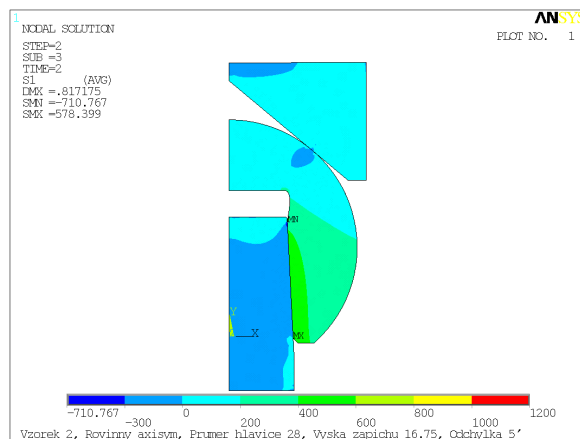
Obr. 12.1.5 VZOREK_K_28_13.5_5

Z výsledků 7. varianty (průměr hlavice 28 mm , hloubka kužele hlavice 13.5 mm, tabulka 10.6.1, str. 38) s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3. Vlivem tvarové odchylky došlo ke změně polohy maxima 1. hlavního napětí u 5 tvaru zápichu.

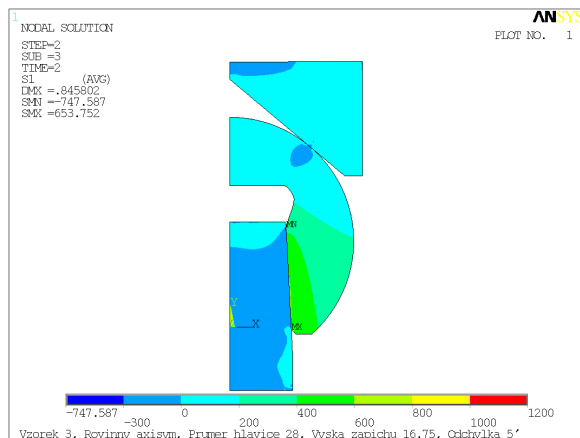
12.2 Porovnání VZOREK_K_28_16.75_X



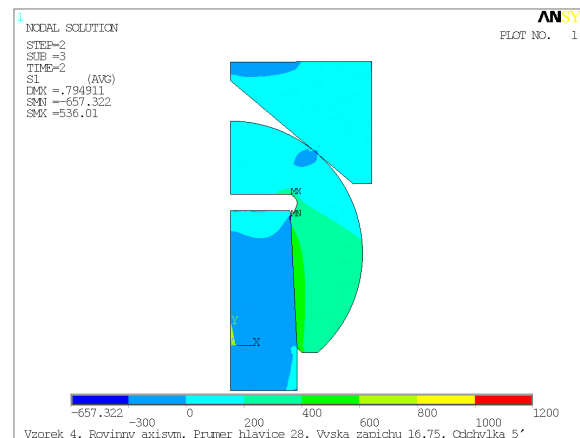
Obr. 12.2.1 VZOREK_K_28_16.75_1



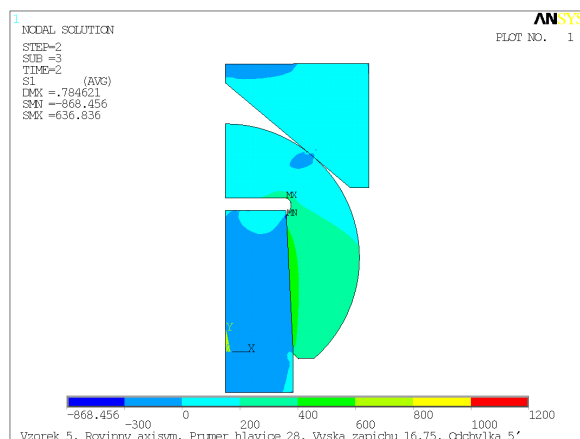
Obr. 12.2.2 VZOREK_K_28_16.75_2



Obr. 12.2.3 VZOREK_K_28_16.75_3



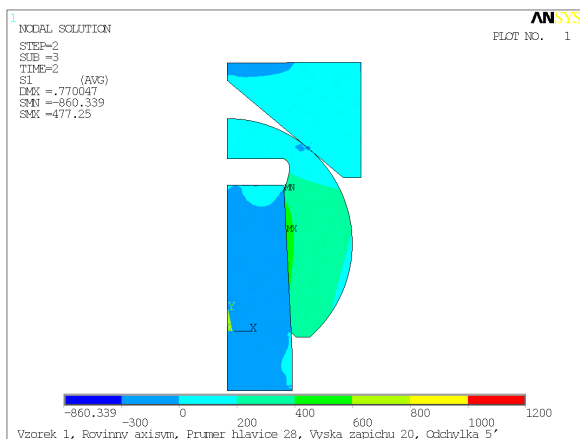
Obr. 12.2.4 VZOREK_K_28_16.75_4



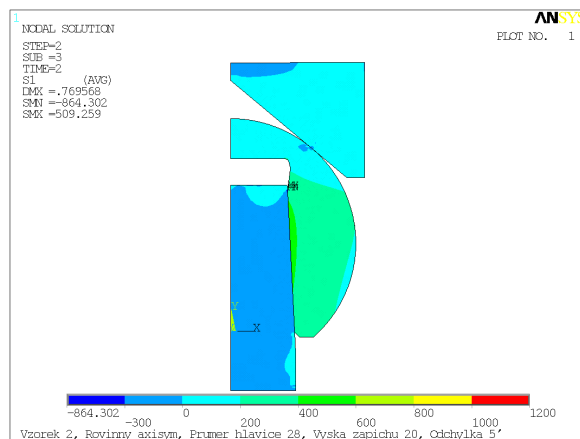
Obr. 12.2.5 VZOREK_K_28_16.75_5

Z výsledků 8. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3. Vlivem tvarové odchylky došlo ke změně polohy maxima obvodového napětí u 4 a 5 tvaru zápichu. Při 5 tvaru zápichu dochází k výraznému nárůstu maximálního obvodového napětí vlivem kuželovitosti.

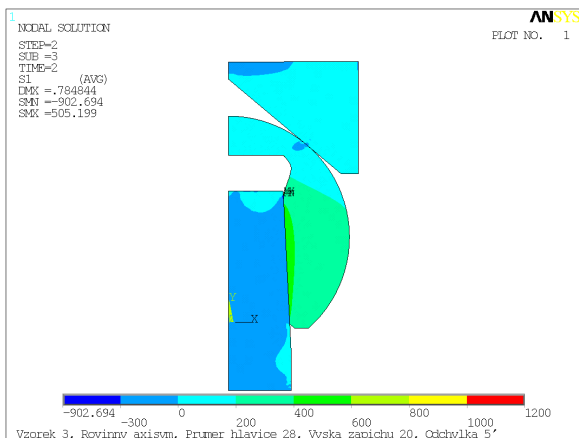
12.3 Porovnání VZOREK_K_28_20_X



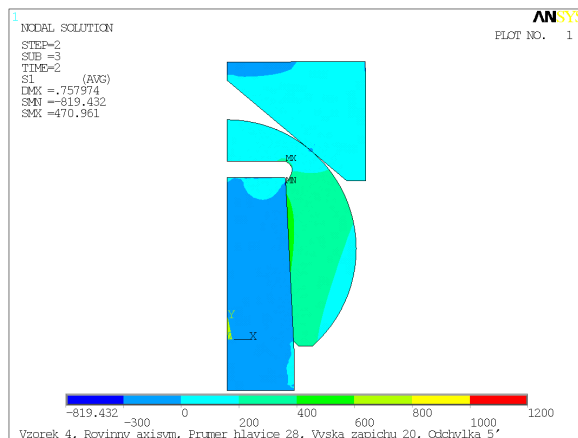
Obr. 12.3.1 VZOREK_K_28_20_1



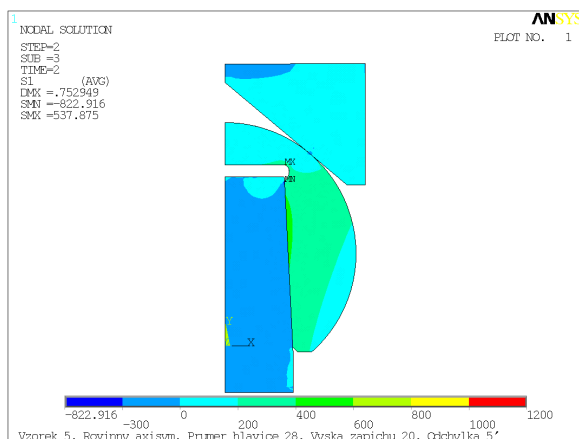
Obr. 12.3.2 VZOREK_K_28_20_2



Obr. 12.3.3 VZOREK_K_28_20_3



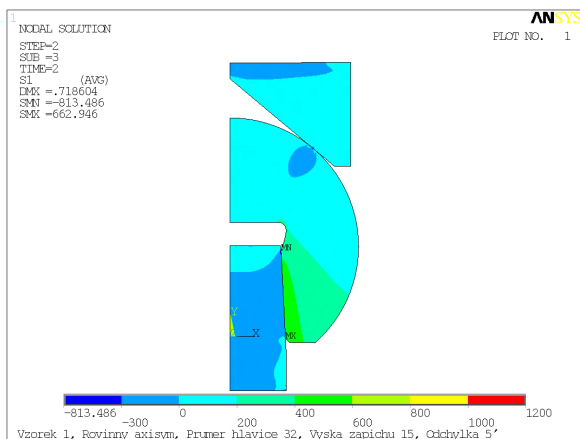
Obr. 12.3.4 VZOREK_K_28_20_4



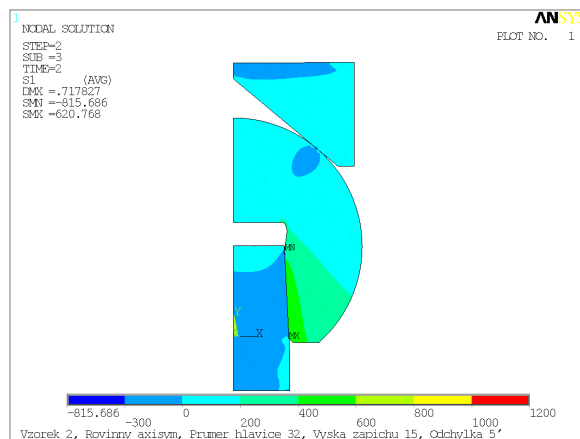
Obr. 12.3.5 VZOREK_K_28_20_5

Z výsledků 9. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je již zápich 5. Vlivem tvarové odchylky došlo ke změně polohy maxima 1. hlavního napětí u všech typů přechodů.

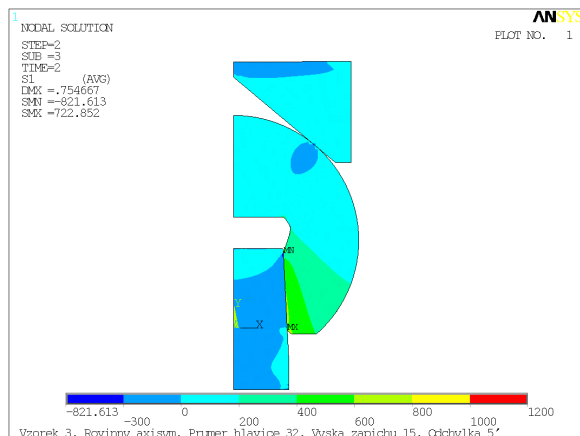
12.4 Porovnání VZOREK_K_32_15_X



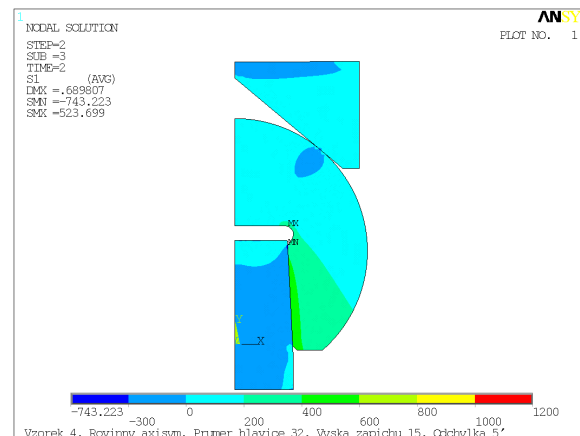
Obr. 12.4.1 VZOREK_K_32_15_1



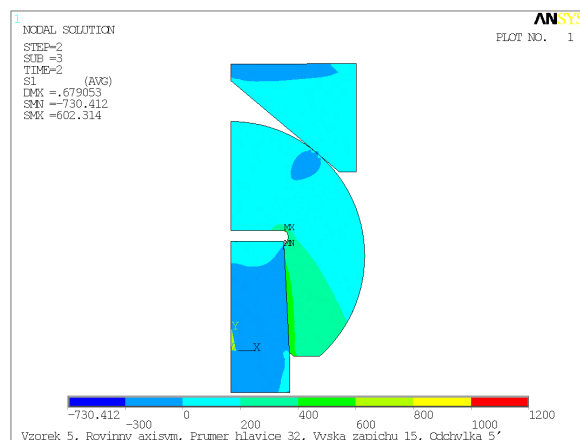
Obr. 12.4.2 VZOREK_K_32_15_2



Obr. 12.4.3 VZOREK_K_32_15_3



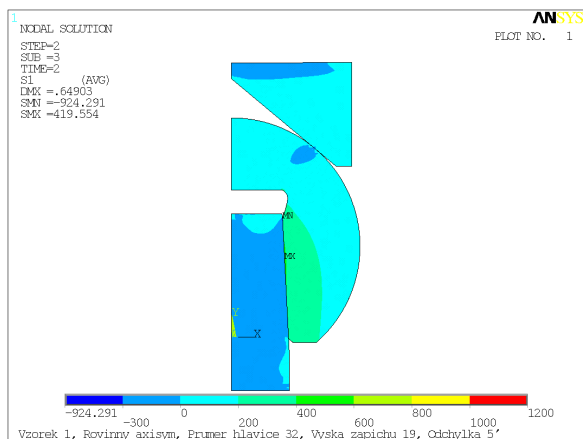
Obr. 12.4.4 VZOREK_K_32_15_4



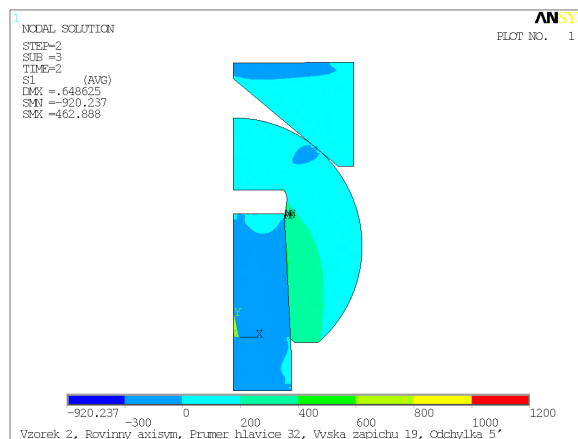
Obr. 12.4.5 VZOREK_K_32_15_5

Z výsledků 10. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3. Vlivem tvarové odchylky došlo ke změně polohy maxima 1. hlavního napětí u 4 a 5 tvaru zápichu.

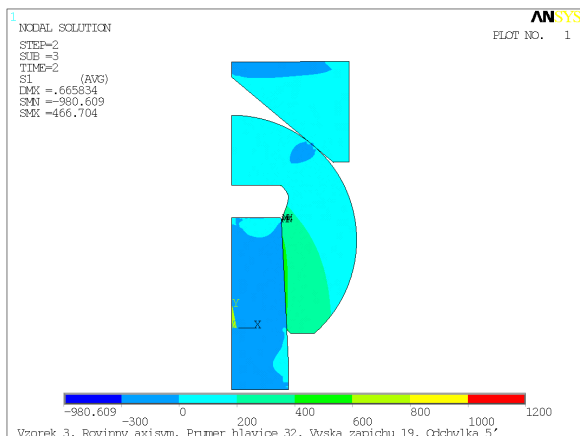
12.5 Porovnání VZOREK_K_32_19_X



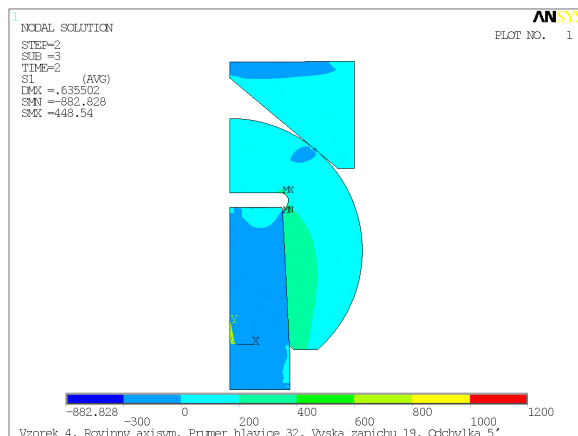
Obr. 12.5.1 VZOREK_K_32_19_1



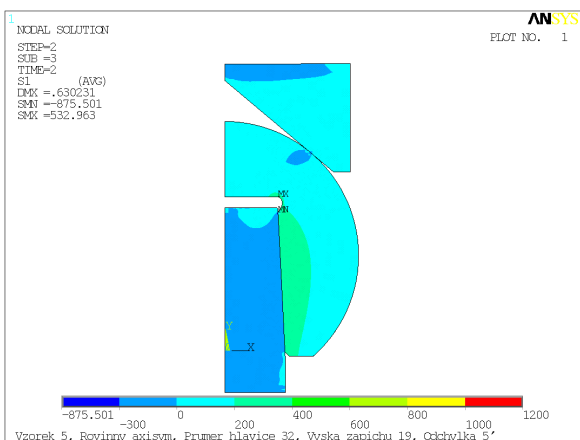
Obr. 12.5.2 VZOREK_K_32_19_2



Obr. 12.5.3 VZOREK_K_32_19_3



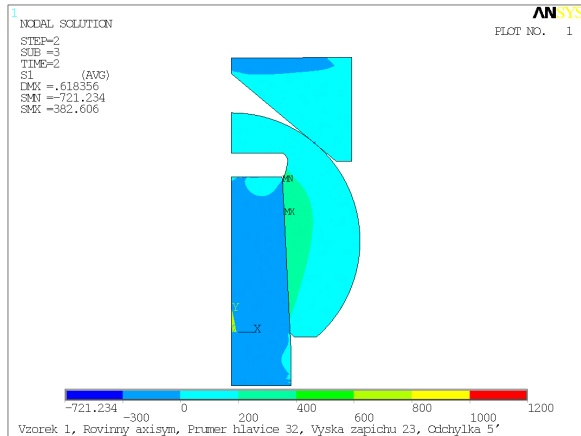
Obr. 12.5.4 VZOREK_K_32_19_4



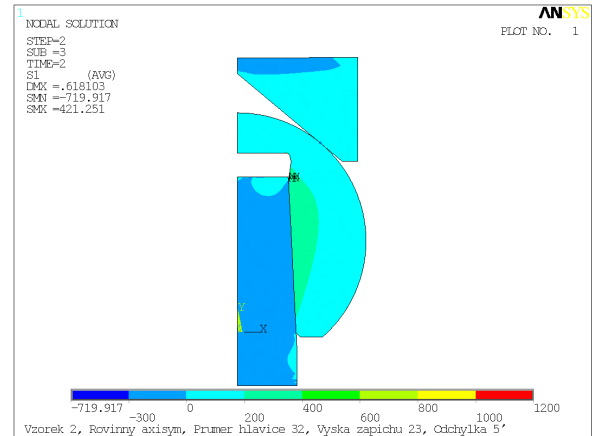
Obr. 12.5.5 VZOREK_K_32_19_5

Z výsledků 11. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je již zápich 5. Vlivem tvarové odchylky došlo ke změně polohy maxima 1. hlavního napětí u všech typů přechodů.

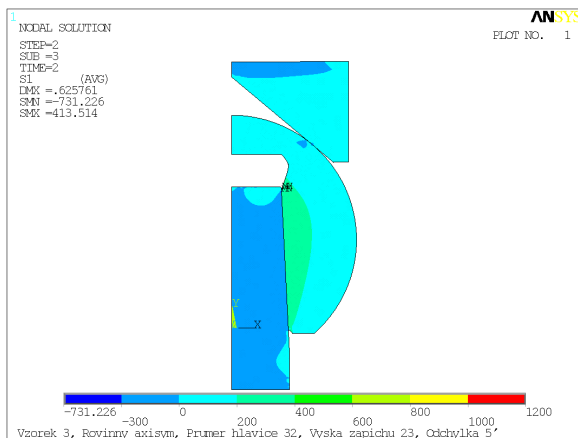
12.6 Porovnání VZOREK_K_32_23_X



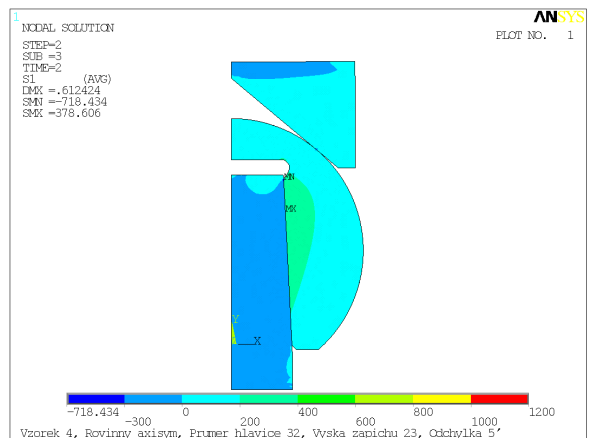
Obr. 12.6.1 VZOREK_K_32_23_1



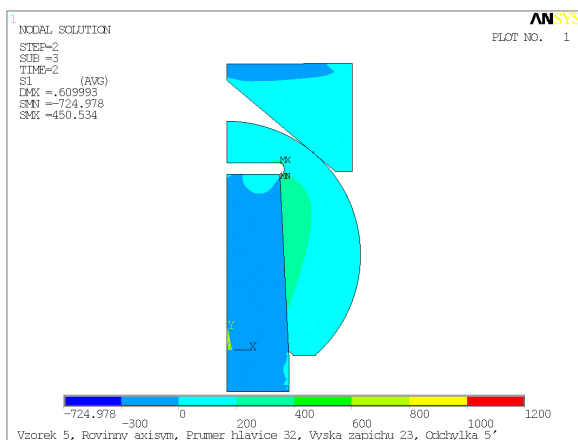
Obr. 12.6.2 VZOREK_K_32_23_2



Obr. 12.6.3 VZOREK_K_32_23_3



Obr. 12.6.4 VZOREK_K_32_23_4



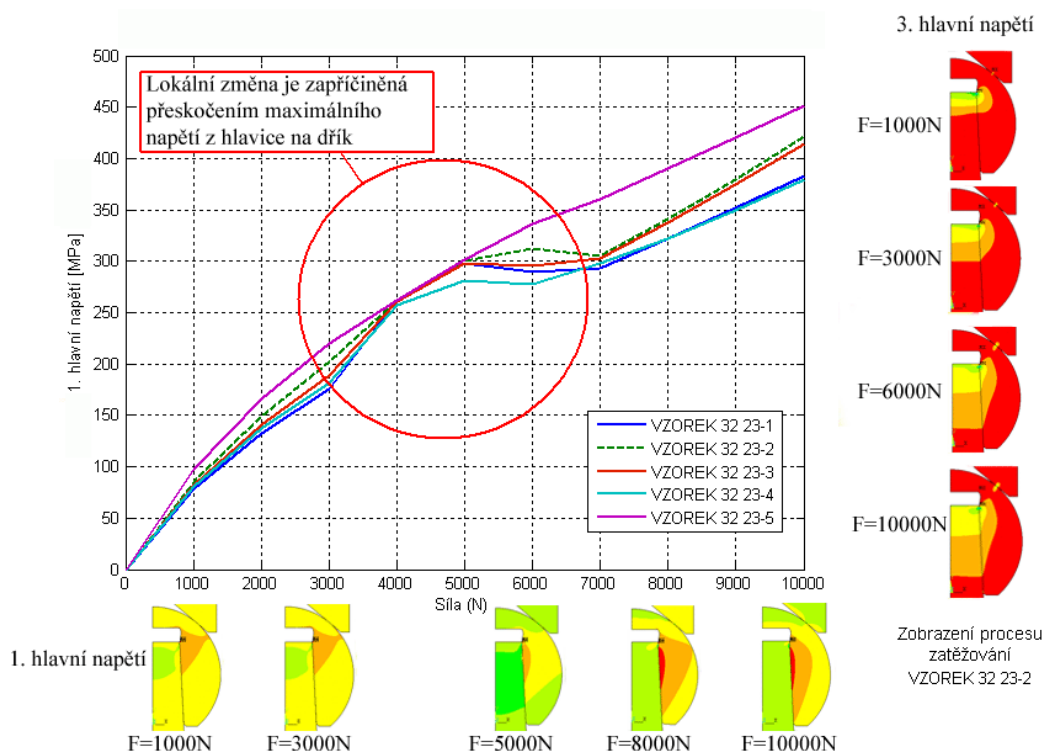
Obr. 12.6.5 VZOREK_K_32_23_5

Z výsledků 12. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je již zápich 5. Vlivem tvarové odchylky došlo ke změně polohy maxima 1. hlavního napětí u všech typů přechodů.

12.7 Zhodnocení vzorků s tvarovou odchylkou od nominální kuželovitosti

V předchozím textu (kapitoly 12.1 – 12.6) bylo analyzováno 30 kombinací 6. variant s 5 různými zápichy. Z této analýzy plynou následující poznatky.

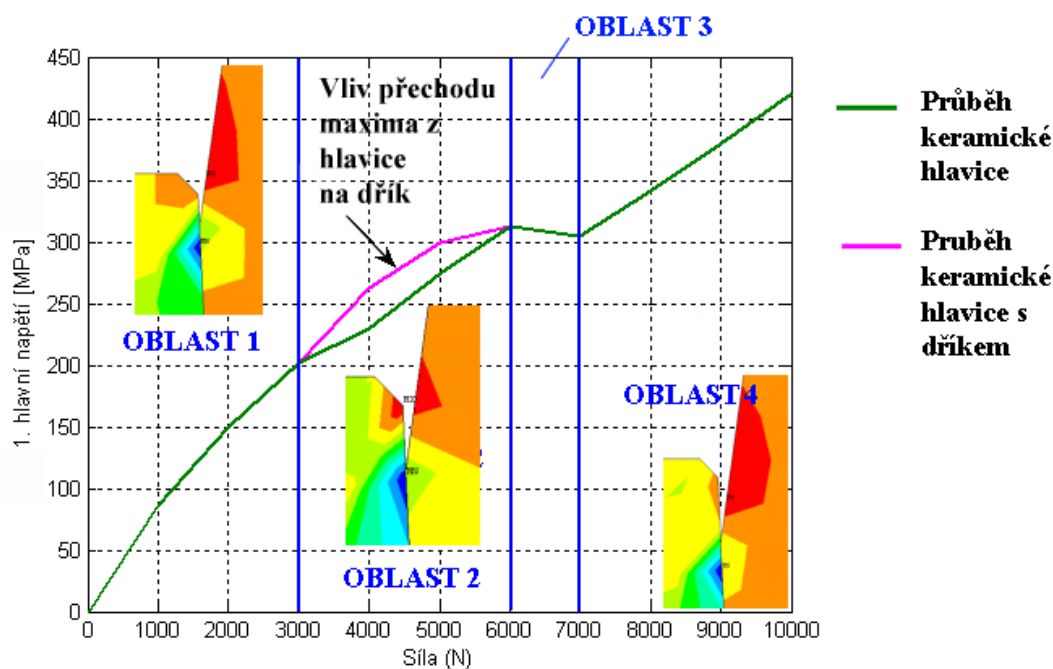
U řešených variant s namodelovanými tvarovými odchylkami kuželovitosti dochází k posuvu maxima 1. hlavního napětí z místa vyústění hlavice do místa dna hlavice. Tento posuv je závislý také na hloubce kužele hlavice. U některých tvarů zápichu se zvýší hodnota maxima vlivem koncentrace napětí v okolí dna hlavice. Zvýší se u těch tvarů, které jsou bez namodelované tvarové odchylky nejbezpečnější. Je to způsobeno tím, že menší osová hloubka zápichu „Z“ [Obr. 9.1.1.1, str. 21] se začíná projevovat větší koncentrací napětí. U variant bez tvarové odchylky se neprojevovala, protože maximum se nacházelo v místě vyústění hlavice.



Graf. 12.7.1 Proces zatěžování při kuželovitosti

Proces zatěžování je analyzován na variantě 12. Průběh však už není u variant s namodelovanou odchylkou lineární, jako tomu bylo v předešlém případě (kapitola 11.7), ale stává se nelineárním. To je způsobeno tím, že kontaktní plocha se při zatěžování mění. Navíc

vlivem změnou polohy maxima, což je zapříčiněno kuželovitostí, dochází k lokálnímu odklonu křivek zatěžování [Graf. 12.7.1]. Dochází k přesunu maxima z hlavice na dřík. Nastává tak u vzorků (1 – 4) pro analyzovanou variantu 12 viz [Graf. 12.7.1]. Proces zatěžování samotné keramické hlavice a celé soustavy HDK se tedy liší. Pro ukázkou na následujícím grafu [Graf. 12.7.2] uvádím porovnání procesu zatěžování celé soustavy HDK a samotné keramické hlavice. Pro srovnání jsem vybral vzorek „VZOREK_32_23-2“.



Graf. 12.7.2 Srovnání průběhů HDK a hlavice

Celý průběh zatěžování lze rozdělit na 4 oblasti:

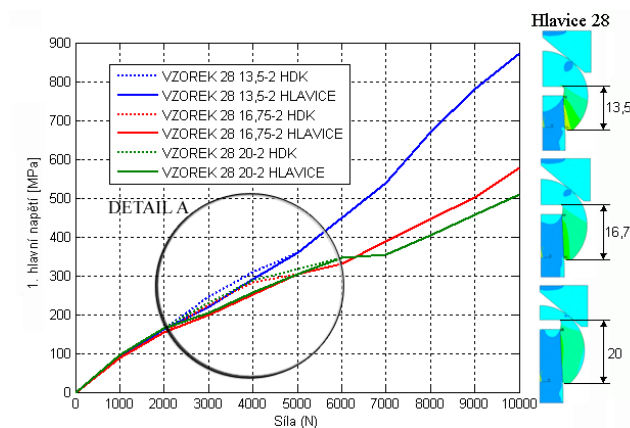
OBLAST 1 – v této oblasti dochází k nelineárnímu zatěžování z důvodu zvětšování se kontaktních ploch mezi hlavicí a dříkem v průběhu zatěžování. Maximální 1. hlavní napětí se nachází pouze na hlavici. Křivky HDK a samostatné hlavice jsou totožné.

OBLAST 2 – v této oblasti dochází k rozdělení maximálního napětí na hlavici i na dřík. Je to způsobeno koncentrací napjatosti v horní oblasti dříku vzniklé zatlačením hlavice na dřík při tvarové odchylce kuželovitosti 5'. Křivky HDK a samostatné hlavice se rozvětvili do dvou větví. Dochází k tomu proto, že oblast maxima se rozdělí na dvě podoblasti, přičemž jedna je na hlavici a druhá na dříku.

OBLAST 3 – dochází znovu ke spojení křivek vlivem zpětného sloučení podoblastí. Maximum je opět na hlavici. Je to navíc provázáno mírným poklesem napětí, což je způsobeno tím, že maximum na hlavici se také mírně posouvá po výšce vlivem tvarové odchylky (kuželovitosti).

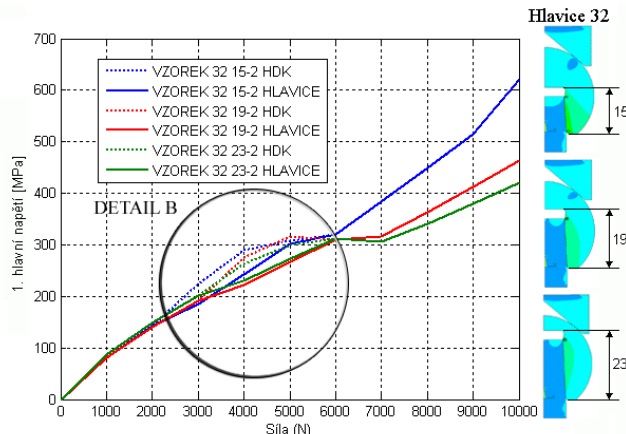
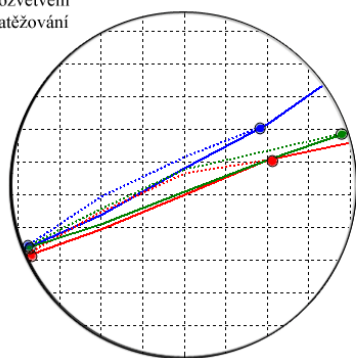
OBLAST 4 – v této oblasti dochází k téměř lineárnímu zatěžování, což je způsobeno tím, že kontaktní plochy jsou už spojeny na dostatečně velké části a „kuželovitost“ nemá již tak výrazný projev.

Na následujících grafech [Graf. 12.7.3], [Graf. 12.7.4] je zobrazeno zatěžování pro všechny hloubky kužele keramické hlavice s dvěma vnějšíma průměry. Pro ukázkou je analýza provedena pro 2. tvar zápichu na dně kužele hlavice.



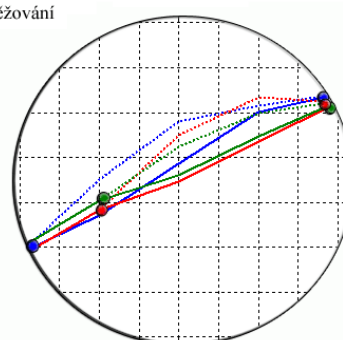
● - Body rozvětvení
● - Body rozvětvení
● - Body rozvětvení

DETAIL A



● - Body rozvětvení
● - Body rozvětvení
● - Body rozvětvení

DETAIL B

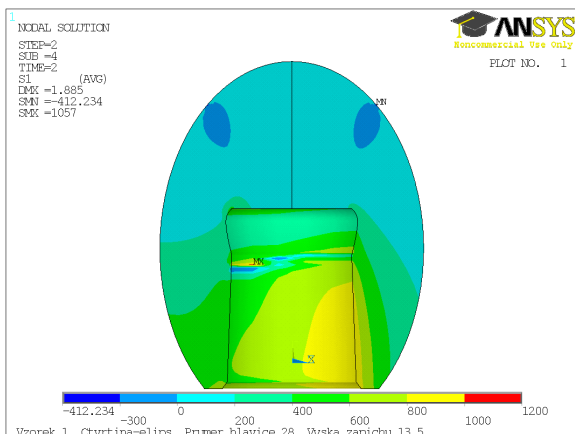


Graf. 12.7.3 Srovnání průběhů HDK a hlavice
Φ 28 mm

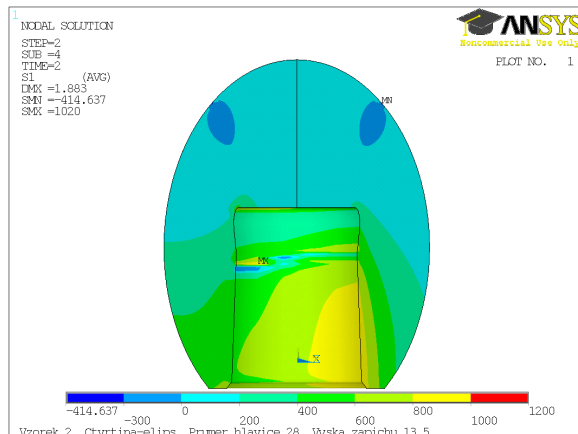
Graf. 12.7.4 Srovnání průběhů HDK a hlavice
Φ 32 mm

13. ANALÝZA VZORKŮ S TVAROVOU ODCHYLKOU OD NOMINÁLNÍ KUŽELOVITOSTI A KRUHOVITOSTI (OVALITA)

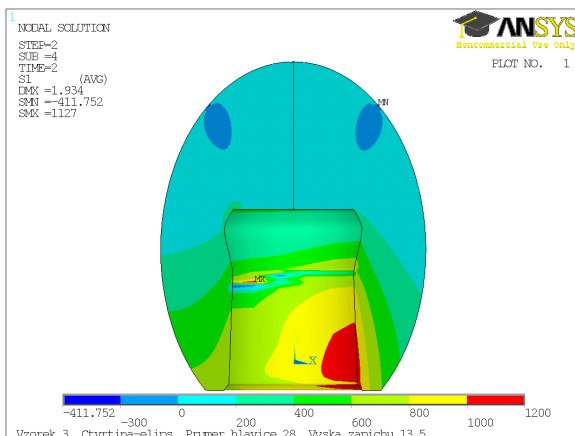
13.1 Porovnání VZOREK_K_O_28_13.5_X



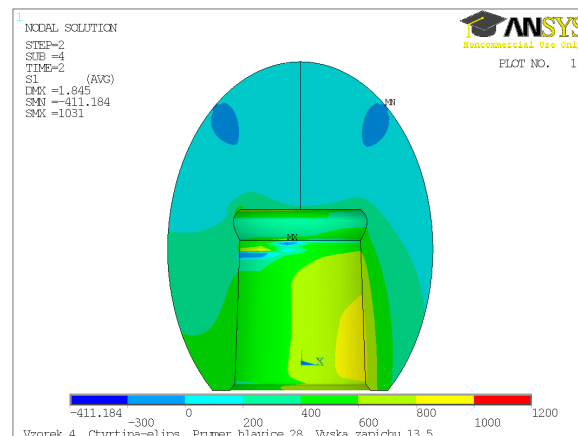
Obr. 13.1.1 VZOREK_K_O_28_13.5_1



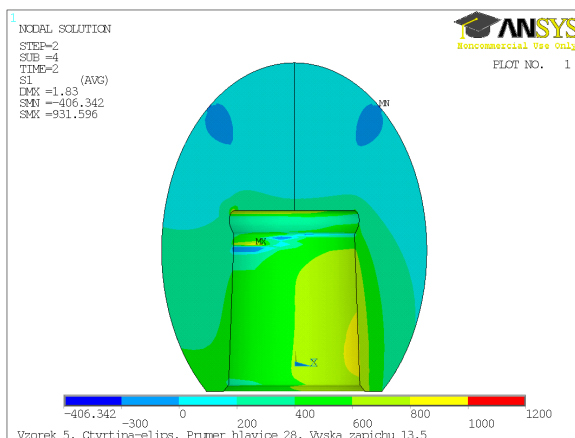
Obr. 13.1.2 VZOREK_K_O_28_13.5_2



Obr. 13.1.3 VZOREK_K_O_28_13.5_3



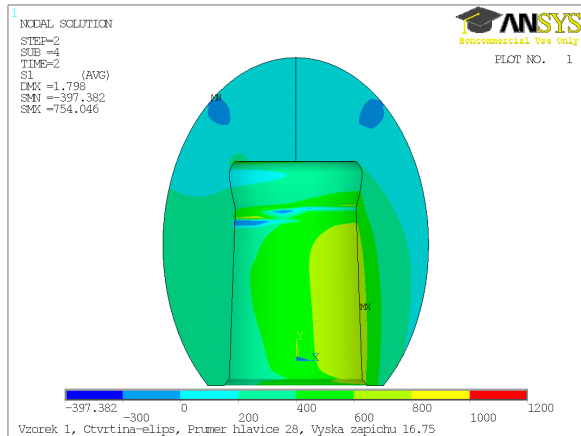
Obr. 13.1.4 VZOREK_K_O_28_13.5_4



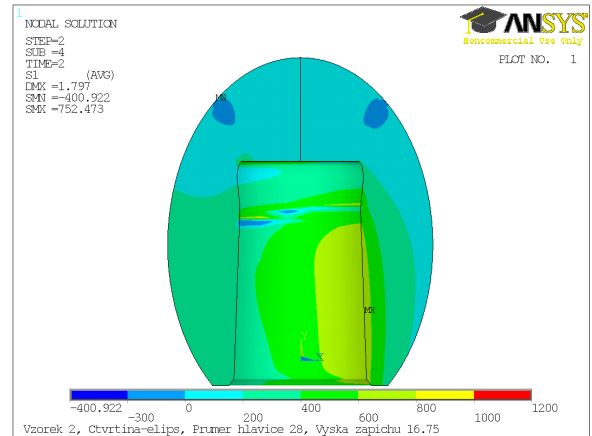
Obr. 13.1.5 VZOREK_K_O_28_13.5_5

Z výsledků 13. varianty (průměr hlavice 28 mm, hloubka kužele hlavice 13.5 mm, tabulka 10.6.1, str. 38) s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3. V průběhů napětí se projevuje vliv ovality tím, že průběhy už nejsou konstantní po obvodu. Také se nepatrně projevuje vliv kuželovitosti.

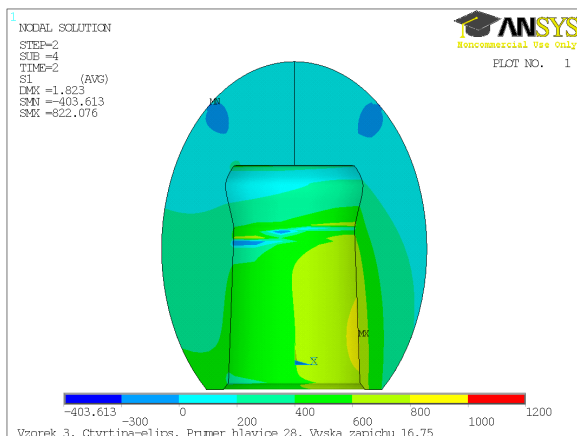
13.2 Porovnání VZOREK_K_O_28_16.75_X



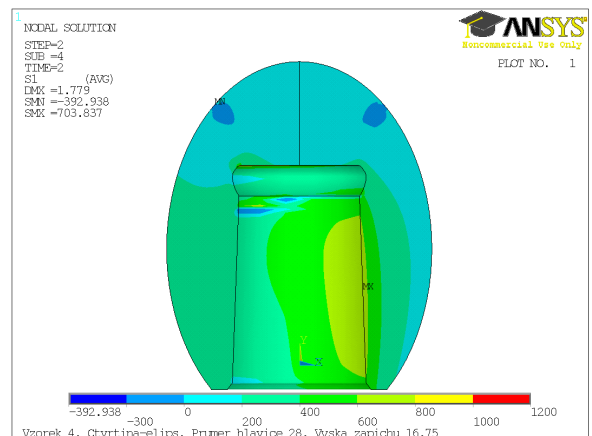
Obr. 13.2.1 VZOREK_K_O_28_16.75_1



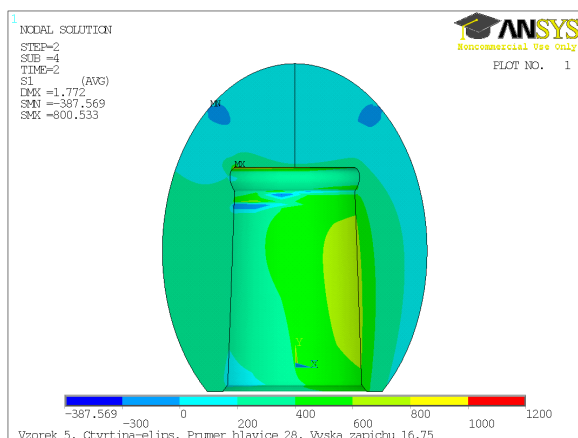
Obr. 13.2.2 VZOREK_K_O_28_16.75_2



Obr. 13.2.3 VZOREK_K_O_28_16.75_3



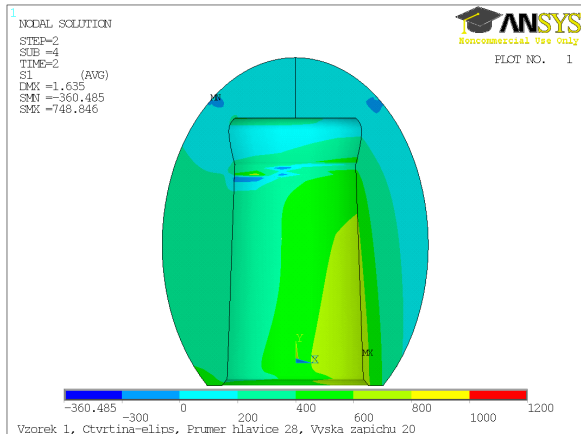
Obr. 13.2.4 VZOREK_K_O_28_16.75_4



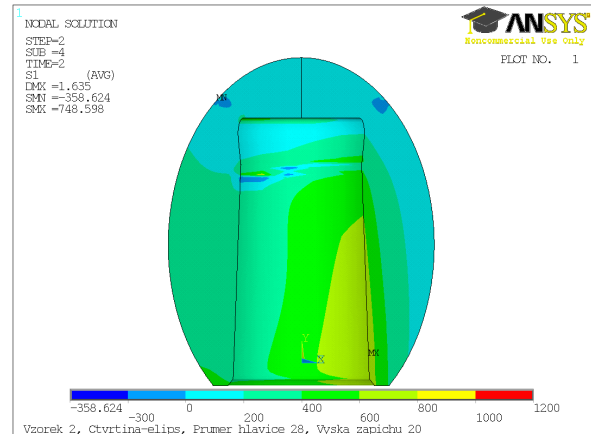
Obr. 13.2.5 VZOREK_K_O_28_16.75_5

Z výsledků 14. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3. Při zvětšení hloubky kužele hlavice dochází k poklesu maximálního napětí.

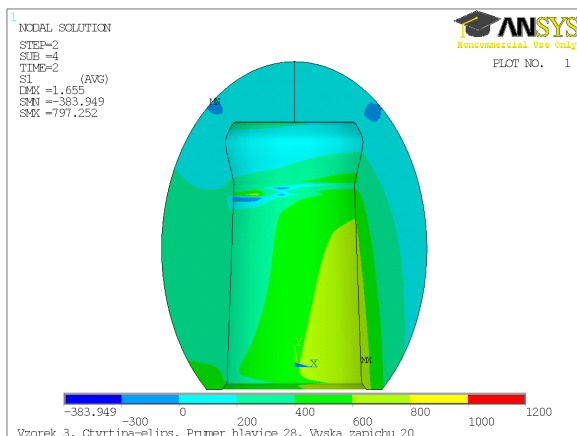
13.3 Porovnání VZOREK_K_O_28_20_X



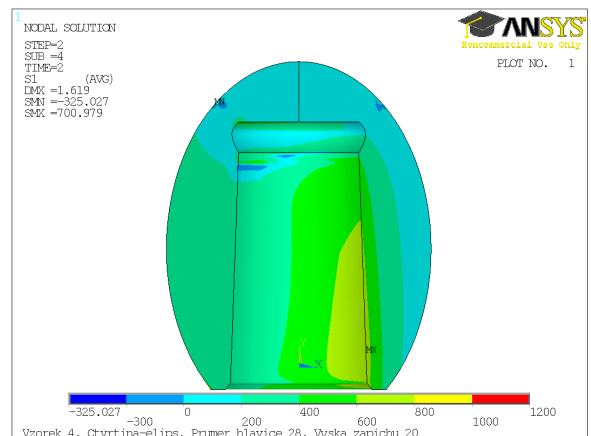
Obr. 13.3.1 VZOREK_K_O_28_20_1



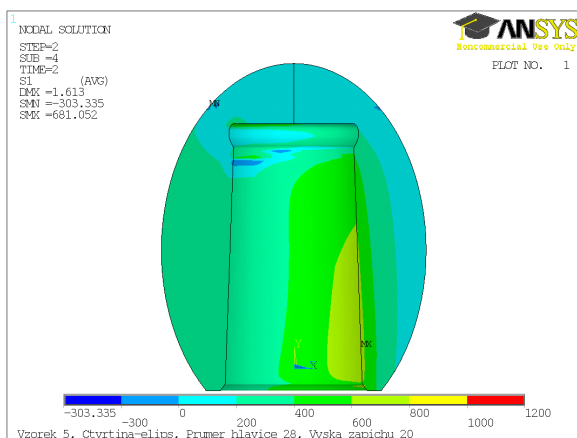
Obr. 13.3.2 VZOREK_K_O_28_20_2



Obr. 13.3.3 VZOREK_K_O_28_20_3



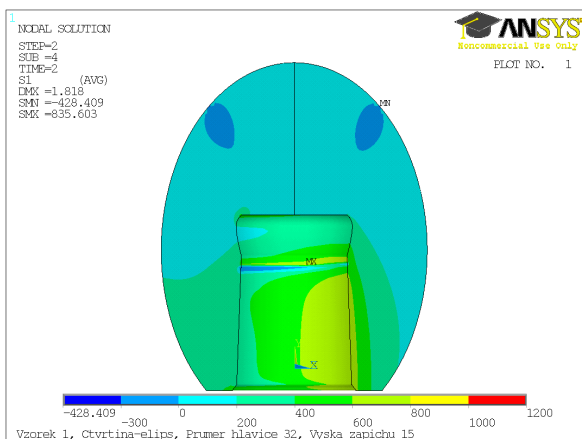
Obr. 13.3.4 VZOREK_K_O_28_20_4



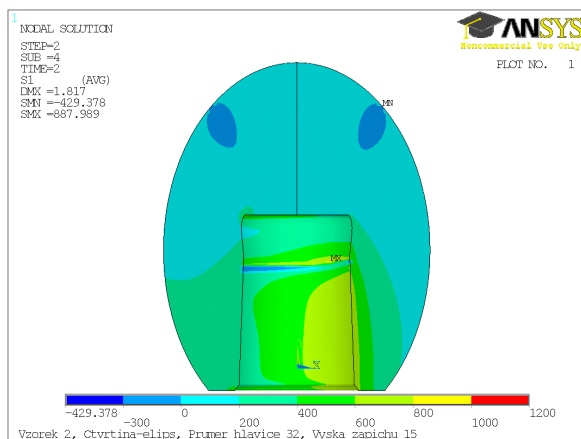
Obr. 13.3.5 VZOREK_K_O_28_20_5

Z výsledků 15. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3. Při zvětšení hloubky kužele hlavice dochází k poklesu maximálního napětí.

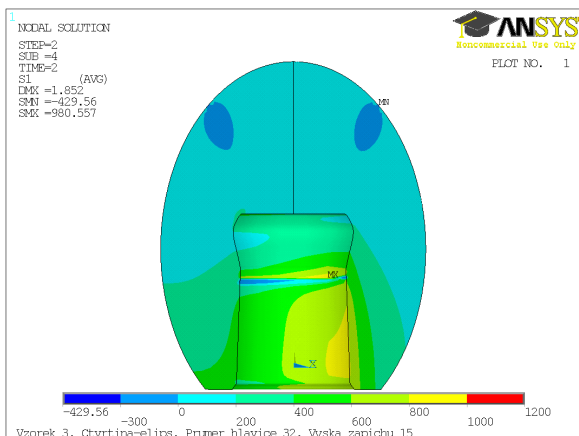
13.4 Porovnání VZOREK_K_O_32_15_X



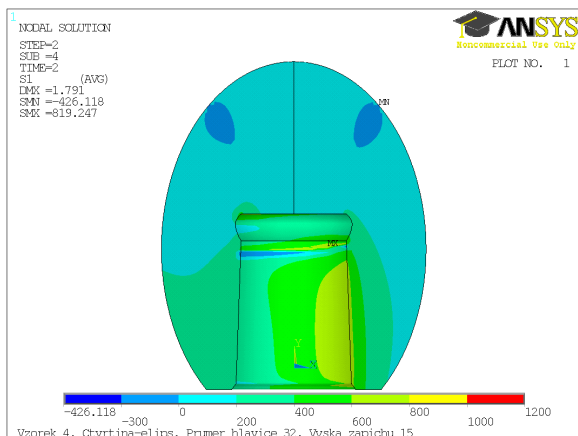
Obr. 13.4.1 VZOREK_K_O_32_15_1



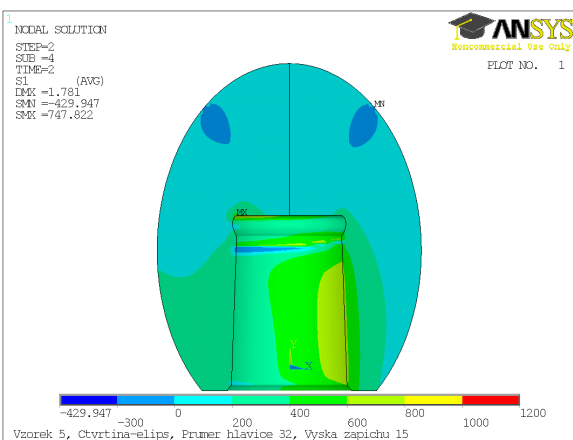
Obr. 13.4.2 VZOREK_K_O_32_15_2



Obr. 13.4.3 VZOREK_K_O_32_15_3



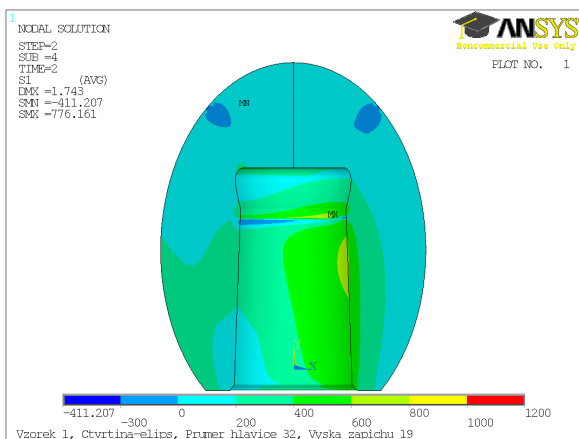
Obr. 13.4.4 VZOREK_K_O_32_15_4



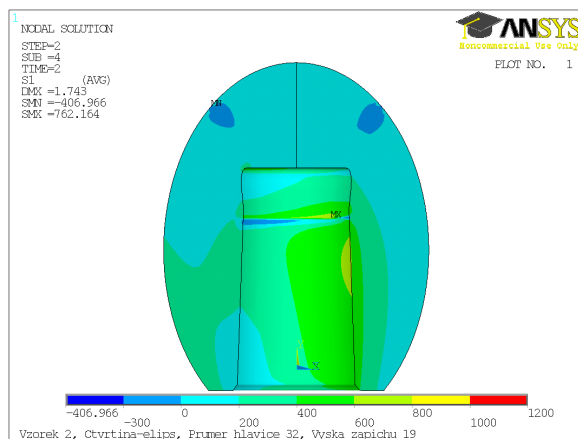
Obr. 13.4.5 VZOREK_K_O_32_15_5

Z výsledků 16. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3.

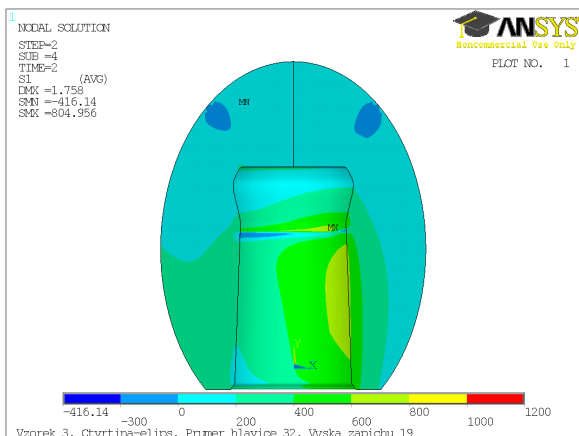
13.5 Porovnání VZOREK_K_O_32_19_X



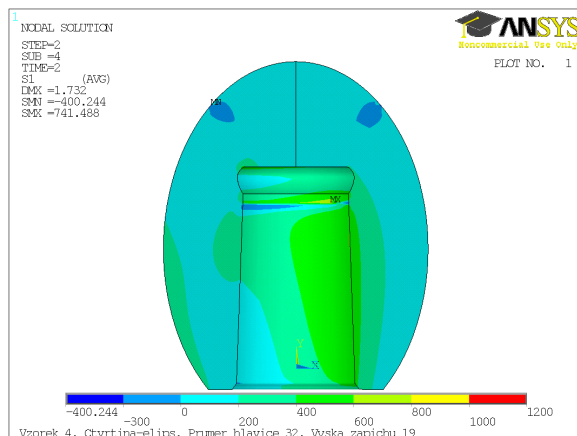
Obr. 13.5.1 VZOREK_K_O_32_19_1



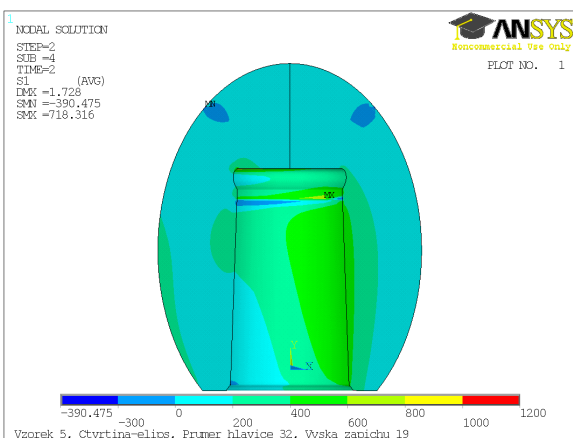
Obr. 13.5.2 VZOREK_K_O_32_19_2



Obr. 13.5.3 VZOREK_K_O_32_19_3



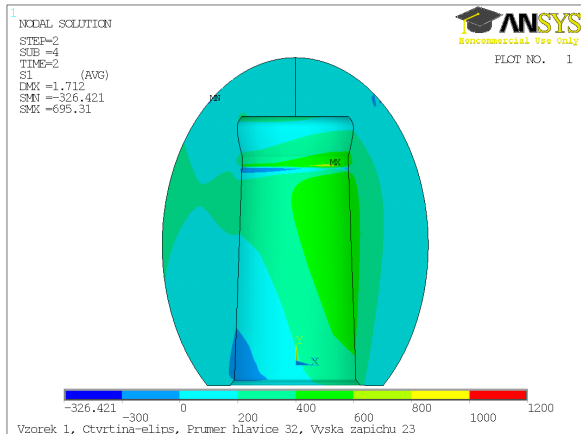
Obr. 13.5.4 VZOREK_K_O_32_19_4



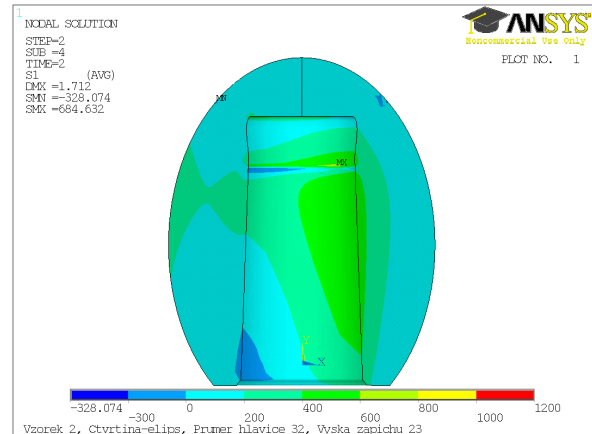
Obr. 13.5.5 VZOREK_K_O_32_19_5

Z výsledků 17. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 3. Při zvětšení hloubky kužele hlavice dochází k poklesu maximálního napětí.

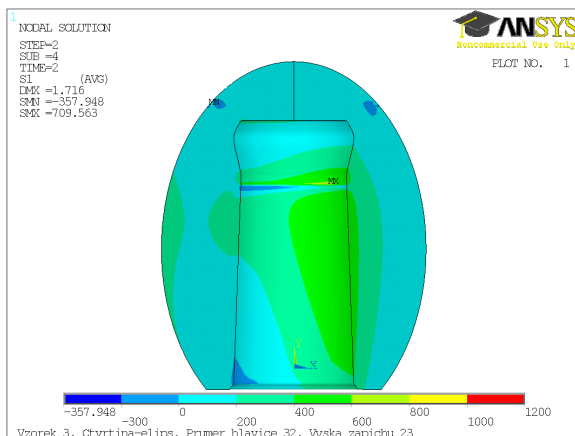
13.6 Porovnání VZOREK_K_O_32_23_X



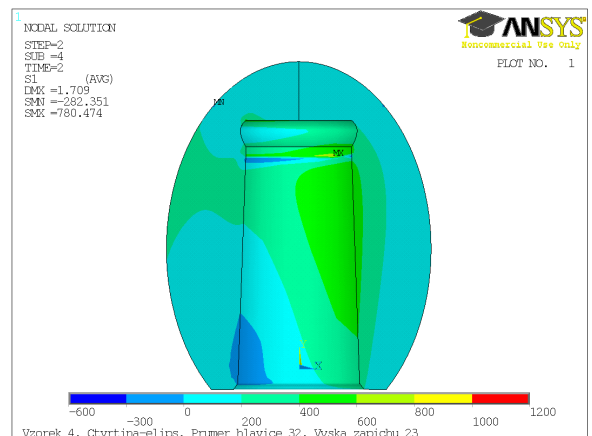
Obr. 13.6.1 VZOREK_K_O_32_23_1



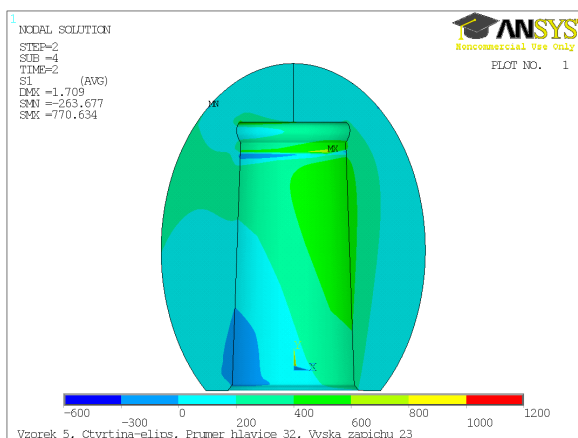
Obr. 13.6.2 VZOREK_K_O_32_23_2



Obr. 13.6.3 VZOREK_K_O_32_23_3



Obr. 13.6.4 VZOREK_K_O_32_23_4



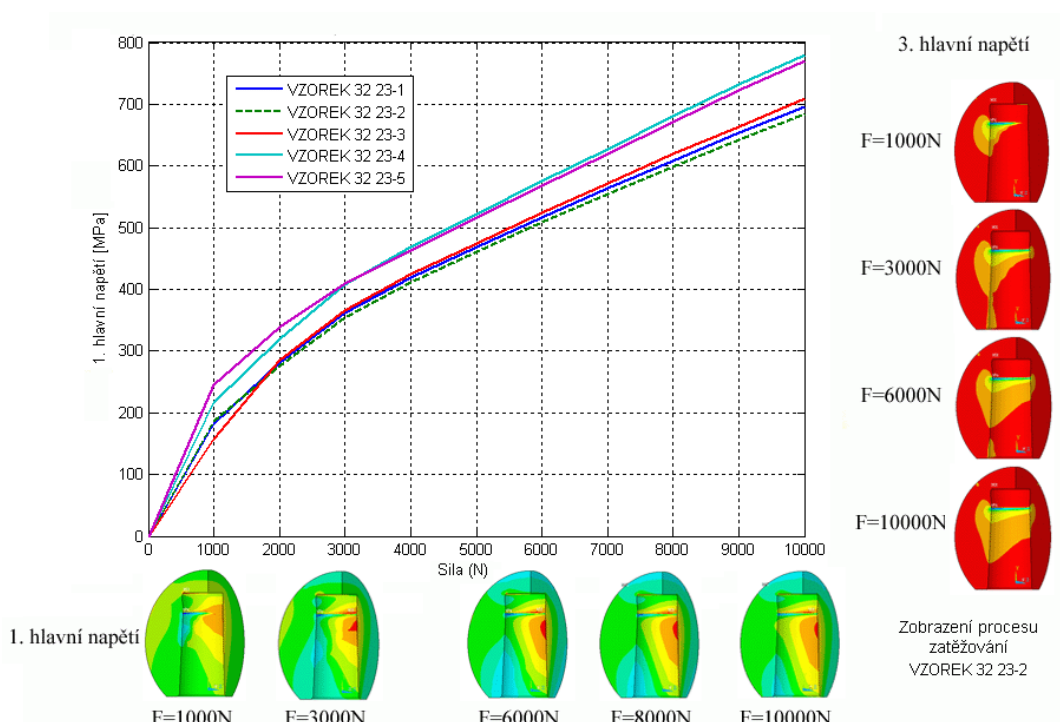
Obr. 13.6.5 VZOREK_K_O_32_23_5

Z výsledků 18. varianty s 5-ti různými přechody (zápichy) do dna hlavice je vidět, že nejnebezpečnější je zápich 4. Při zvětšení hloubky kužele hlavice dochází k poklesu maximálního napětí.

13.7 Zhodnocení vzorků s tvarovou odchylkou od nominální kuželovitosti a kruhovitosti

V předchozím textu (kapitoly 12.1 – 12.6) bylo analyzováno 30 kombinací 6. variant s 5 různými zápichy. Z této analýzy plynou následující poznatky.

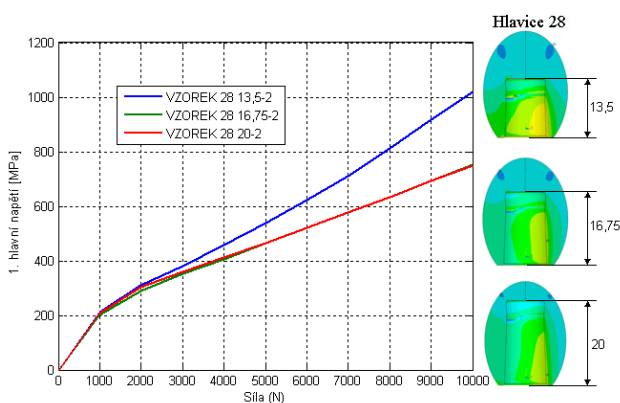
U řešených variant s namodelovanými tvarovými odchylkami od nominální kuželovitosti a kruhovitosti příčného průřezu díku, dochází k posuvu maxima 1. hlavního napětí z místa vyústění hlavice do místa dna hlavice, jako tomu bylo u odchylky od nominální kuželovitosti. Navíc se projevuje efekt ovality tím, že vysoké hodnoty 1. hlavního napětí se koncentrují v místě, kde eliptický průřez díku má větší rozměr (tj. rozměr hlavní poloosy). Efekt ovality je v této analýze dominantní protože rozevívá kužel hlavice lokálně a ne celoplošně po celé výšce, čímž vznikají vysoké hodnoty tahového napětí v hlavici. Proto i maximální hodnoty 1. hlavního napětí jsou v porovnání s předchozími tvarovými odchylkami nejvyšší.



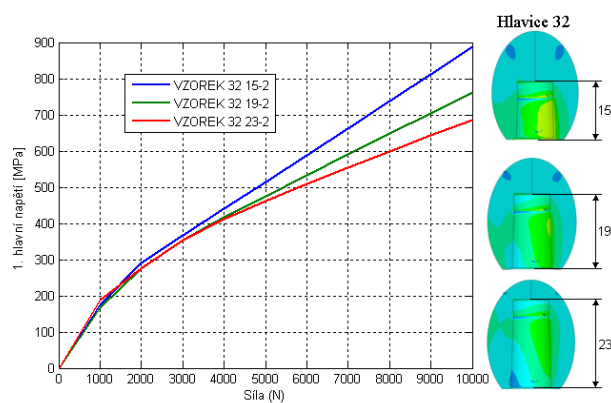
Graf. 13.7.1 Proces zatěžování při odchylce od nominální kuželovitosti a kruhovitosti

Proces zatěžování analyzován na variantě 13 je nelineární do oblasti pokud nedojde k vymezení vůle způsobené kuželovitostí. V nelineární části křivek se kontaktní plocha mění v průběhu zatěžování. Další průběh je lineární, kontakt je již rozložen po celé hloubce kužele keramické hlavice [Graf. 13.7.1].

Na následujících grafech [Graf. 13.7.2], [Graf. 13.7.3] je zobrazeno zatěžování při tvarové odchylce od nominální kuželovitosti a kruhovitosti pro všechny hloubky kužele keramické hlavice s dvěma vnějšími průměry. Pro ukázkou je analýza provedena pro 2. tvar zápichu na dně kužele hlavice.



Graf. 13.7.2 Srovnání průběhů keramické hlavice Φ 28 mm



Graf. 13.7.3 Srovnání průběhů keramické hlavice Φ 32 mm

V tomto případě je zatěžování HDK a keramické hlavice stejné na rozdíl od tvarové odchylky od nominální kuželovitosti kde docházelo k rozvětvení zatěžovacích křivek vlivem přechodu maxima s hlavice na dřík a opačně.

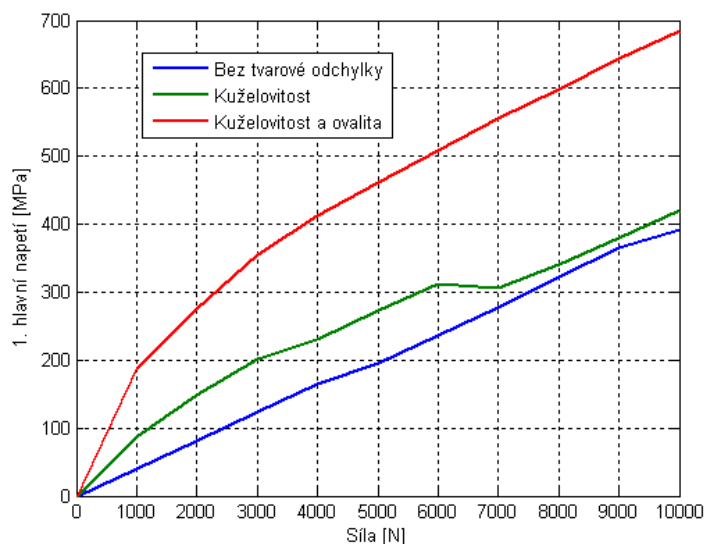
14. ZÁVĚR

Z analýzy 90 vzorků zařazených do 18 variant [tabulka 10.6.1, str. 38] obsahující 2 tvarové odchylky od nominálních hodnot (12 variant) a 1 přesné řešení (6 variant) plyne:

1) Vliv tvarových odchylek

- Zatěžování při **přesných** variantách je téměř lineární. Je to proto, že stýkající se plochy mezi hlavicí a dříkem jsou v kontaktu od počátku zatěžování po celé výšce kuželové plochy. Maximální napětí se nachází v místě vyústění hlavice. Křivky maxima jsou nepatrně ovlivněny koncentrací napětí v okolí sražení v místě vyústění hlavice. V realitě by se však tento koncentrátor neprojevil, protože by zražení nemělo tak ostré hrany. Také v realitě se dá předpokládat, že přesná varianta kužele a dříku nikdy nenastane vlivem výrobních nepřesností.
- Zatěžování při tvarové odchylce od **nominální kuželovitosti** je nelineární. Je to z toho důvodu, že plochy na začátku zatěžování se stýkají pouze v malé oblasti v místě zápichu. Po dalším zatěžování se tělesa deformují a kontaktní plocha se zvětšuje. Jak deformace dosáhne tohoto stavu, že plochy budou v kontaktu po celé výšce kužele, průběh se stává lineárním. V této variantě dochází navíc k přemísťování maxima 1. hlavního napětí, které se už nenachází v místě vyústění hlavice jako tomu bylo u případů přesných variant, ale vlivem kuželovitosti se maximum posouvá směrem ke dnu kužele keramické hlavice. Při analýze celé soustavy HDK dochází k tomu, že maximální napětí při určitých hodnotách zatížení přeskočí z hlavice na dřík a zpět.
- Zatěžování při tvarové odchylce od **nominální kuželovitosti a kruhovitosti** příčného průřezu dříku je nelineární. Je to z toho důvodu, že plochy na začátku zatěžování se stýkají pouze v malé oblasti v místě zápichu. Po dalším zatěžování se tělesa deformují a kontaktní plocha se zvětšuje. Jak deformace dosáhne toho stavu, že plochy budou v kontaktu po celé výšce kužele, průběh se stává téměř lineárním. Při této odchylce dominuje ovalita, která způsobuje koncentraci napětí v místě hlavní poloosy eliptického dříku.

Na následujícím grafu [Graf. 14.1] je srovnání všech tří řešení. Pro ukázkou tohoto srovnání jsem vybral VZOREK_32_23-2. Pro ostatní srovnání jsou průběhy obdobné.



Graf. 14.1 Srovnání všech řešení odchylek

Z analýzy je vidět, že nejnebezpečnější z pohledu mezního stavu keramické hlavičky je tvarová odchylka „kuželovitost a ovalita“. Oproti variantě „bez tvarové odchylky“ dosahuje „kuželovitost a ovalita“ o 43% větší hodnotu maximálního napětí. „Kuželovitost“ se nachází mezi těmito dvěma hraničními křivkami.

2) Vliv tvaru zápichu

V práci jsem uvažoval 5 změřených tvarů zápichu. Významným parametrem z pohledu hodnot 1. hlavního napětí je osová výška zápichu „Z“ [Obr. 9.1.1.1, str. 21].

- U **přesných** variant je nejnebezpečnější tvar zápichu ten, který má největší osovou výšku „Z“, tj. 3. tvar zápichu. Je to proto, že při větší vzdálenosti „Z“ se zmenší výška kontaktní plochy „H1“ [Obr. 9.1.1.1, str. 21], z toho plyne, že se zmenší i kontaktní plocha. Pak vlivem nejmenší kontaktní plochy se při konstantním zatížení vyvodí největší tlak na kontaktní plochu, což způsobí největší rozevření kužele hlavičky.
- U variant s tvarovou odchylkou od **nominální kuželovitosti** mohou nastat dva nebezpečné stavy s pohledu 1. hlavního napětí:

a) Stav, kdy je maximální napětí v místě vyústění kužele hlavice

Potom platí, že nejnebezpečnější tvar zápichu je ten, který má největší osovou výšku „Z“, tj. 3. tvar zápichu (varianta 7,8,10). Je to proto, že při větší vzdálenosti „Z“ se zmenší výška kontaktní plochy „H1“ [Obr. 9.1.1.1, str. 21], z toho plyne, že se zmenší kontaktní plocha stejně jako u „přesných“ variant. K tomuto stavu dochází u menších hloubek kužele hlavice, kde se maximální napětí nachází ještě v místě vyústění kužele hlavice.

b) Stav, kdy je maximální napětí v místě dna kužele hlavice, tj. místě zápichu

Potom platí, že nejnebezpečnější tvar zápichu je ten, který má nejmenší osovou výšku „Z“, tj. 5. tvar zápichu (varianta 9,11,12). Je to proto, že při menší vzdálenosti „Z“ je koncentrace napětí větší. K tomuto stavu dochází u větších hloubek kužele hlavice, kde se maximální napětí nachází již v místě dna kužele hlavice.

U tvarové odchylky „kuželovitost“ lze tedy konstatovat, že ze zvětšující se hloubkou kužele hlavice maximální hodnota 1. hlavního napětí klesá a současně se oblast maxima přesouvá z místa vyústění kužele hlavice do místa dna kužele hlavice. Dále platí, že pokud se maximum 1. hlavního napětí nachází v místě vyústění hlavice tak změny parametrů zápichu nezpůsobují koncentraci napjatosti, ale pouze rozhodují o výsledné velikosti kontaktní plochy kužele hlavice. Pokud však maximum 1. hlavního napětí se nachází v místě dna kužele hlavice, tj. v místě zápichu, pak již parametry zápichu jsou závislé na maximálních hodnotách 1. hlavního napětí ve smyslu „koncentrátoru napjatosti“. Jako v předešlém případě, tak i zde má největší podíl na změnách napjatosti právě výška „Z“.

- U variant s tvarovou odchylkou od ***nominální kuželovitosti a kruhovitosti*** je nejnebezpečnější 3. tvar zápichu. Je to proto, že v těchto variantách dominuje vliv ovality, který je závislý od velikosti kontaktní plochy. Tá je nejmenší právě u 3. typu zápichu jak již bylo zmíněno. Změna nastává pouze u poslední (varianta s největší hloubkou kužele hlavice), tedy 18. varianty, kde se již projeví koncentrace napjatosti v okolí zápichu. Nedochozí však k tomu u 5. tvaru zápichu jako tomu bylo u „kuželovitosti“, ale u 4. tvaru zápichu, který má nepatrně menší kontaktní plochu. Je to způsobeno dominantním vlivem „ovality“.

Návrhy pro další řešení:

- Analýza zápchů na dně kužele keramické hlavice totální kyčelní endoprotézy pro fyziologické zatížení
- Analýza vlivu drsnosti povrchu a tření kontaktních ploch mezi keramickou hlavicí a dříkem totální kyčelní endoprotézy
- Dynamická analýzy soustavy keramické hlavice a dříku TEP (srovnání statické a dynamické analýzy)

LITERATURA

- [1] <http://www.umat.fme.vutbr.cz/~jpetruska/pedag.htm>, Počítačové metody mechaniky II.
- [2] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Osteoartróza>
- [3] Release 11.0 Documentation for Ansys.
- [4] Fajfr, M., :Deformačně napěťová analýza keramické hlavice kyčelní endoprotézy s modelovými tvarovými odchylkami kontaktních kuželů, Diplomová práce, 2006.
- [5] Petrovický, P., Štingl, J., Konvičková, S., :Biomateriály a morfologie, Praha, 1995.
- [6] Fuis, V.; Hlavoň, P.: Comparison of the Computational and Experimental Modelling Results of Hip Joint Endoprosthesis Behaviour under Pressing on the Stem. Proc. Conf. Experimental Stress Analysis CD, 2003.
- [7] Filip, P., :Progresivní typy biomateriálů, Ostrava, 1995.
- [8] Fuis, V.,: Napjatostní a spolehlivostní analýza keramické hlavice kyčelní endoprotézy Vědecké spisy VUT v Brně, edice PhD Thesis, sv. 34, Brno, 2000.
- [9] Janíček P., Ondráček E.: Řešení problémů modelováním. Téměř nic o téměř všem, Skriptum FS VUT, Brno 1998.
- [10] Saeed Moaveni: Finite Element Analysis - Theory and Application with ANSYS, New Jersey, 1999.
- [11] Fuis,V., Hlavoň, P., Návrát, T.: Calculation of Weibull material parameters of the ceramic head. Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, nr. 31, pp.15-18, Poland.