

**RESIDUAL STRESS DETERMINATION IN EUCOR CERAMICS
PLASMATIC COATING**

**URČOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ V PLAZMATICKÝCH NÁSTŘICÍCH
KERAMIKY EUCOR**

Vladimír Fuis^{*}, Přemysl Janíček, Miloš Vlk^{}**

Abstract

The paper presents results of residual stress determination in EUCOR ceramics plasmatic coating. The coating was performed on steel test sample and test sample of casted EUCOR ceramics. Hole drilling method has been used. Residual compressive stress occurs in EUCOR plasmatic coating coated on steel sample, residual tensile stress occurs in coating on casted EUCOR. Hole drilling method was simulated by computational modeling. The case of sample made of three layers of materials with different elasticity coefficients was analyzed. The sample was loaded in such a way that plane stress occurred in the sample. The paper presents the strains courses occurring after drilling the bore in the sample found by the simulations.

Keywords: residual stress, EUCOR ceramics, hole drilling method, ceramic coating on steel, NiAl interlayer, ceramics coating on ceramics, computational simulation of hole drilling method, multilayer test samples.

1. Úvod

Výrobní firma keramiky EUCOR se zabývá myšlenkou aplikovat keramické nástřiky na povrchy těles vystavených vysokým teplotám, resp. chemicky agresivním prostředím. Tato skutečnost byla podnětem k tomu, aby se započalo se zkoumáním jaká zbytková napětí existují v plazmaticky nanesených vrstvách EUCOR-u. Tělesa, na něž má být nanášen plazmatický nástřík EUCOR-u mají být ocelová a uvažuje se i s nanášením nástříku na keramiku EUCOR vyrobenou odléváním.

2. Metodika měření zbytkového napětí

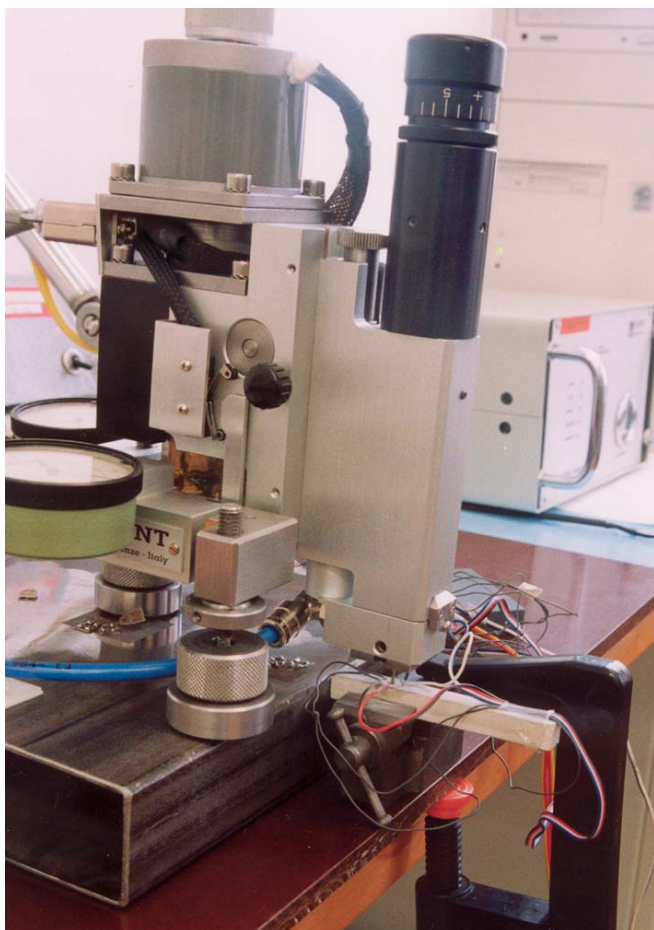
K určování zbytkových napětí byla použita odvrtávací metoda s vrtáním centrálního otvoru, jež se realizovala se soupravou MTS 3000 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Proces určování zbytkových napětí v podstatě znamená realizaci těchto dvou kroků: měření uvolněných deformací na povrchu vzorku a stanovení zbytkových napětí z naměřených přetvoření.

Zbytková napjatost se určovala na površích zkušebních vzorků, které měly tvar trámečku o rozměrech 10x10x80 mm. Byly vyšetřovány tyto dvě varianty:

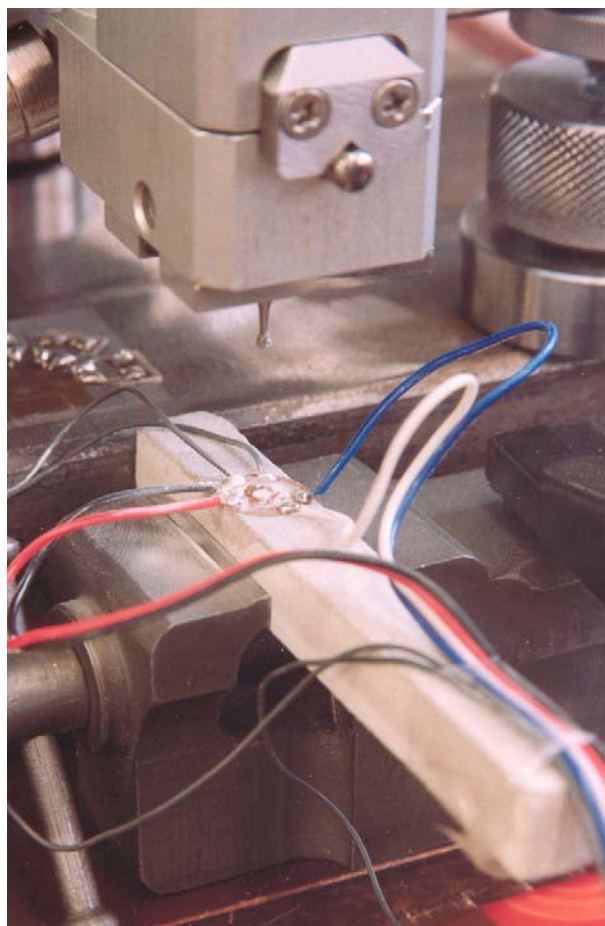
- varianta „**EUCOR na EUCOR-u**“ – plazmatický nástřík byl nanesen na trámeček z litého EUCOR-u,
- varianta „**EUCOR na oceli**“ – plazmatický nástřík byl nanesen na trámeček z oceli, přičemž mezi vrstvu plazmatického nástříku a základní materiál byly nanesena mezivrstva NiAl-u.

^{*} Ing. Vladimír Fuis, PhD.: Sdružené pracoviště Ústavu termomechaniky AV ČR a Ústavu mechaniky těles FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, e-mail: fuis@cis.vutbr.cz,

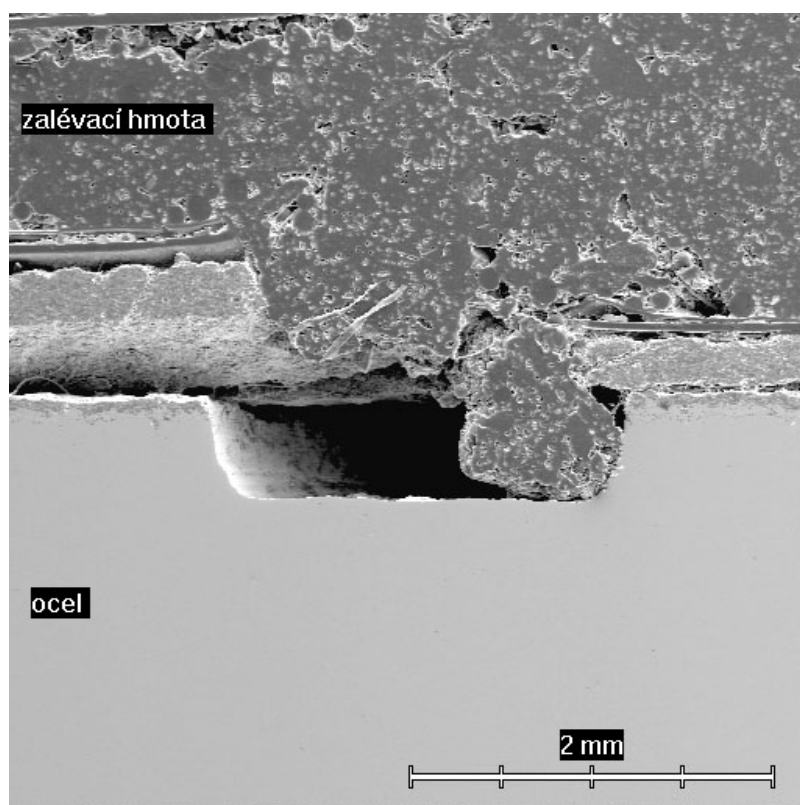
^{**} Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc., Doc. Ing. Miloš Vlk, CSc.: Ústav mechaniky těles, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, e-mail: janicek@umt.fme.vutbr.cz, vlk@umt.fme.vutbr.cz



Obr. 1 Celkový pohled na zařízení MTS 3000 HBM



Obr. 2 Pohled na zkušební vzorek s nalepenou tenzometrickou růžicí



Obr. 3 Celkový pohled na vyvrtaný otvor

Do místa, v němž se určovala zbytková napjatost byla nalepena tenzometrická růžice fa HBM typu 1,5/120 RY 61 S. Pro teplotní kompenzaci byl použit kompenzační tenzometr tvořený stejnou tenzometrickou růžicí jaká byla použita pro měření přetvoření. Při postupném vrtání otvoru (v našem případě o průměru $d=2,26$ mm) zaznamenávají její tři měřicí mřížky (při využití měřicího zesilovače Spider8) velikosti uvolněných délkových přetvoření. Získaná data se ukládají do paměti počítače pro další zpracování. Celkový pohled na měřící zařízení MTS 3000 HBM je na obr. 1. Na obr. 2 je pohled na zkušební vzorek s nalepenou tenzometrickou růžicí (v pozadí vlevo je kompenzační tenzometr, nad růžicí je vyvrtávací frézička).

Určování zbytkových napětí se u komerčně dodávaných zařízení realizuje následně po experimentálním určení průběhů přetvoření v závislosti na hloubce odvrtávaného otvoru. Jelikož bylo výpočtovým simulačním modelováním objektivně prokázáno, že vyhodnocené hodnoty napětí neodpovídají skutečnosti, bylo vyhodnocení napětí provedeno s využitím SW produktu vyvinutém na Ústavu mechaniky těles. Potřebné hodnoty kalibračních koeficientů byly určeny výpočtovým modelováním (simulační experiment). Při něm bylo modelové těleso z EUCOR-u zatíženo tak, že v něm byl vyvolán stav rovinné napjatosti homogenní po jeho tloušťce. Byl vytvořen výpočtový algoritmus, který umožňuje simulovat odvrtávací proces. S využitím metody konečných prvků pak byly zjišťovány hodnoty délkových přetvoření po ploše mřížky jednotlivých snímačů, které odpovídaly příslušné simulované hloubce otvoru. Z nich pak byly stanoveny velikosti kalibračních konstant pro jednotlivé hloubky otvoru. S jejich využitím pak byly metodou ekvivalentních rovnoměrných napětí určena hlavní napětí pro jednotlivé hloubky vyvrtaných otvorů. Pojem „*ekvivalentní rovnoměrné napětí*“ má tento fyzikální význam. Je to takové rovnoměrné napětí po celé hloubce otvoru, které uvolní stejnou deformaci na povrchu součásti jako nerovnoměrně rozdělené napětí po stejné hloubce.

3. Výsledky určování zbytkových napětí

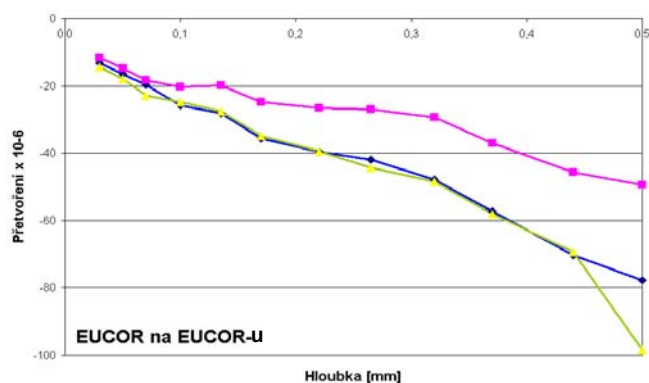
Na obr. 3 je pohled na odvrtaný otvor ve zkušebním vzorku. Snímky byly získány na elektronovém rastrovacím mikroskopu. Na snímku je patrná vrstva nástřiku EUCOR-u a mezivrstva NiAl-u. Při rozřezávání vzorku se vrstva nástřiku EUCOR-u porušila a posunula zleva směrem do prostoru otvoru (doprava). Tloušťka vrstvy nástřiku EUCOR-u a tloušťka mezivrstvy NiAl-u byly změřeny a jsou uvedeny v tab. 1. Závislost uvolněných délkových přetvoření, měřených tenzometrickými mřížkami A, B, a C (viz obr. 8b) na hloubce odvrtaného otvoru (výsledky jsou uvedeny do hloubky 0,5 mm) pro variantu „*nástřík EUCOR na litém EUCOR-u*“ je na obr. 4. Průběhy hlavních zbytkových napětí pro tuto variantu jsou na obr. 5. Závislost uvolněných délkových přetvoření na hloubce odvrtaného otvoru pro případ „*nástřík EUCOR-u na oceli*“ je na obr. 6, odpovídající průběhy napětí na obr. 7.

Keramika s kruhovým čidlem	Měření 1., 2., 3.	Prům. tloušťka [μm]		Měření 1., 2., 3.	Prům. tloušťka [μm]
Nástřík EUCOR-u	290	300 ± 10	mezivrstva	60	60 ± 10
	300			50	
	310			70	

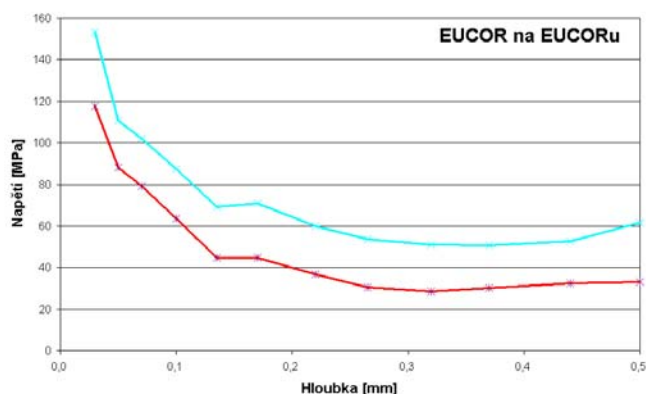
Tab. 1 Hodnoty tlouštěk nástřiku EUCOR-u a mezivrstvy

Analýza výsledků měření vedla k těmto konstatováním:

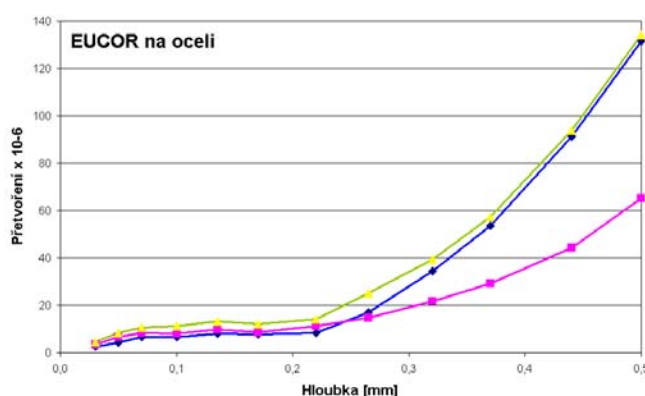
- ♦ Závislost hlavních zbytkových napětí na hloubce odvrtaného otvoru pro variantu „*nástřík EUCOR-u na litém EUCOR-u*“ má klesající charakter. Obě zbytková napětí jsou *kladná*, a tedy *tahová*.
- ♦ Závislost hlavních zbytkových napětí na hloubce odvrtaného otvoru pro variantu „*nástřík EUCOR-u na oceli*“ má zcela odlišný charakter než předešlá varianta. Obě hlavní zbytková napětí jsou *záporná*, a tedy *tlaková*.
- ♦ Fyzikální interpretace dosažených výsledků bude diskutována na konferenci.



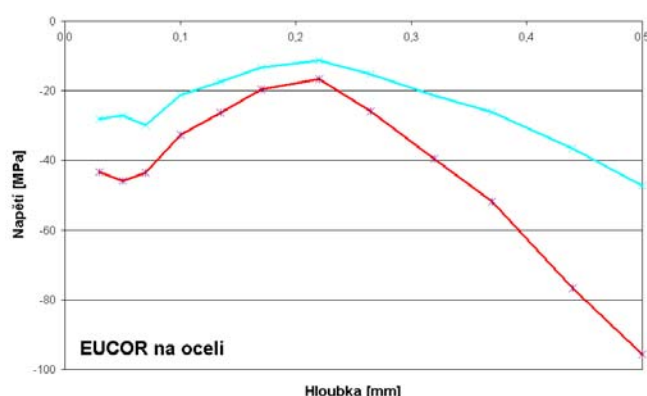
Obr. 4 Závislost poměrných přetvoření na hloubce odvrtaného otvoru



Obr. 5 Závislost hlavních zbytkových napětí na hloubce odvrtaného otvoru



Obr. 6 Závislost poměrných přetvoření na hloubce odvrtaného otvoru

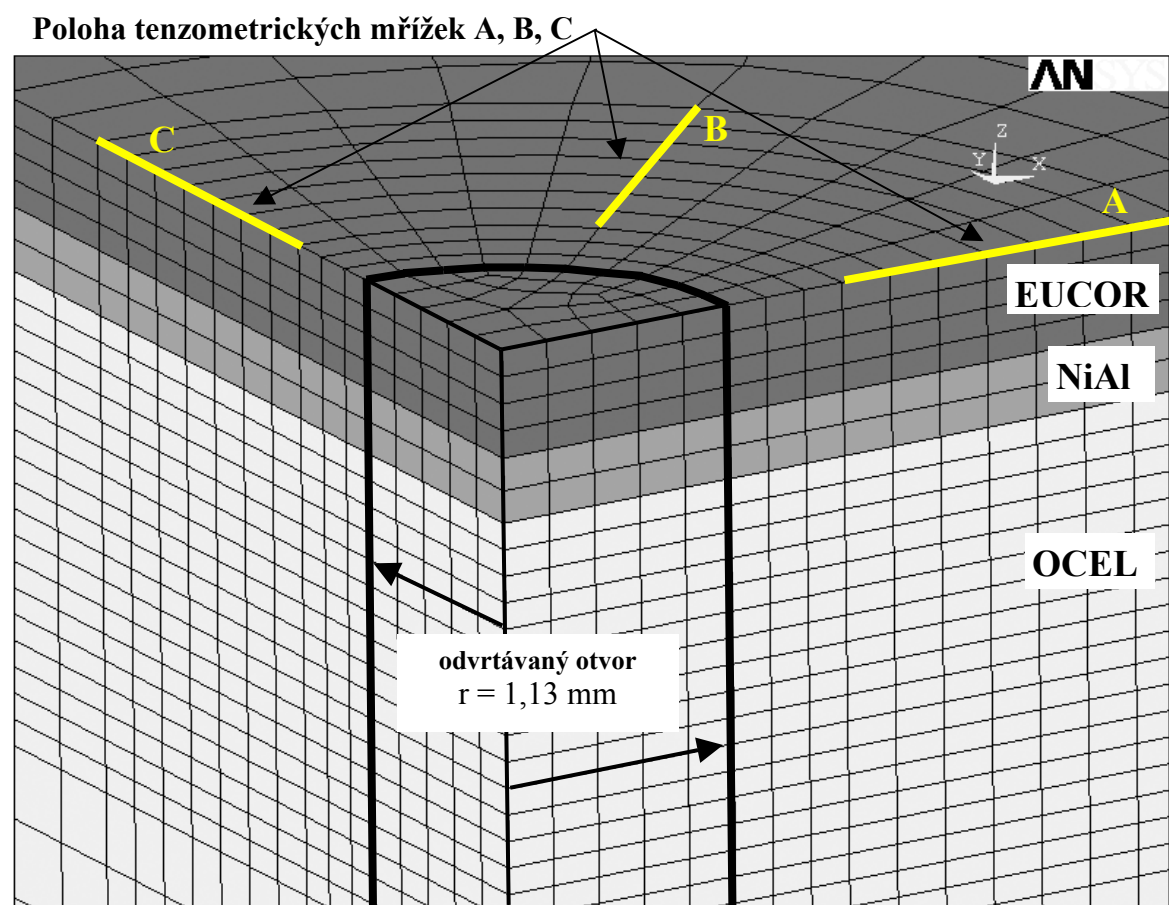
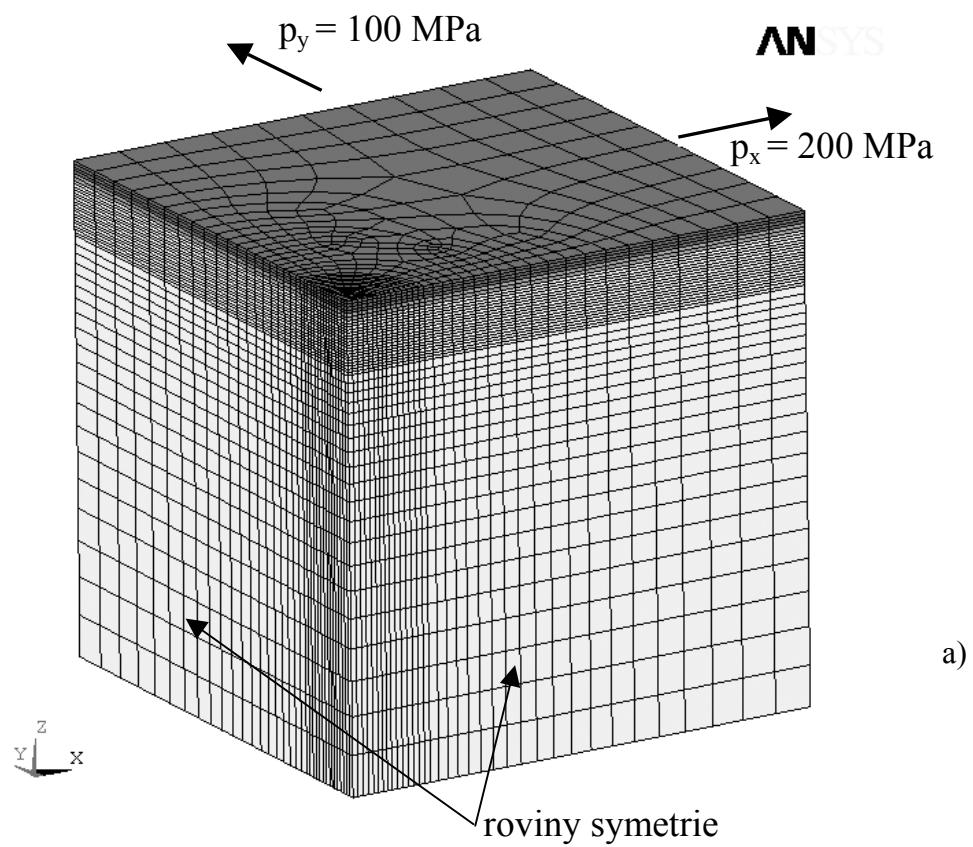


Obr. 7 Závislost hlavních zbytkových napětí na hloubce odvrtaného otvoru

4. Výpočtové simulační modelování odvrtávací metody

Odvrtávací metodou se v místech tenzometrických snímačů zjišťují hodnoty poměrných délkových přetvoření v závislosti na hloubce odvrtaného centrálního otvoru. Z přetvoření se pak výpočtem stanovují průběhy hlavních zbytkových napětí a jejich orientace, a to opět v závislosti na hloubce otvoru. Tento přepočet se realizuje s využitím koeficientů, které jsou stanoveny pro předpoklad homogenního rozložení zbytkových napětí na povrchu tělesa a v rovinách rovnoběžných s povrchem. Po tloušťce tělesa (po hloubce vyvrtávaného otvoru) může být napjatost nehomogenní. Při použití metody „ekvivalentního rovnoměrného napětí“ je *závislost vyhodnocených napětí* (z naměřených poměrných přetvoření) po hloubce odvrtaného otvoru neudává *závislost zbytkových napětí* po hloubce odvrtaného otvoru. Je to jen informace, jaká je odezva na povrchu odvrtávaného tělesa na změnu tvaru kruhového otvoru v důsledku určité neznámé zbytkové napjatosti existující v tělese v blízkém okolí odvrtávání. Metoda „ekvivalentního rovnoměrného napětí“ byla použita z důvodů časové tísně. Pro určování závislosti zbytkových napětí po hloubce otvoru by bylo nutno použít jiné metody, např. „integrální metodu“, jejíž aplikace vyžaduje další informace a je výrazně časově náročnější.

V případě určování zbytkových napětí v tělesech složených z materiálově různorodých vrstev, by se přepočet přetvoření na napětí měl realizovat s využitím koeficientů respektujících různost druhů materiálů. To jsou skutečnosti, které si vyžadují, aby problematika určování zbytkových napětí se stala předmětem bádání. Jedním z příspěvků k tomuto bádání je výpočtové simulační modelování odvrtávací metody. Toto modelování se realizuje na modelovém tělese, jehož struktura je tvořena třemi vrstvami z různých materiálů, konkrétně z vrstvy keramiky EUCOR (elastické konstanty jsou $E_E = 120$ GPa, $\mu_E = 0,17$), vrstvy materiálu NiAl ($E_N = 40$ GPa, $\mu_N = 0,25$) a základního materiálu, kterým je ocel ($E_O = 210$ GPa, $\mu_O = 0,3$). Modelové



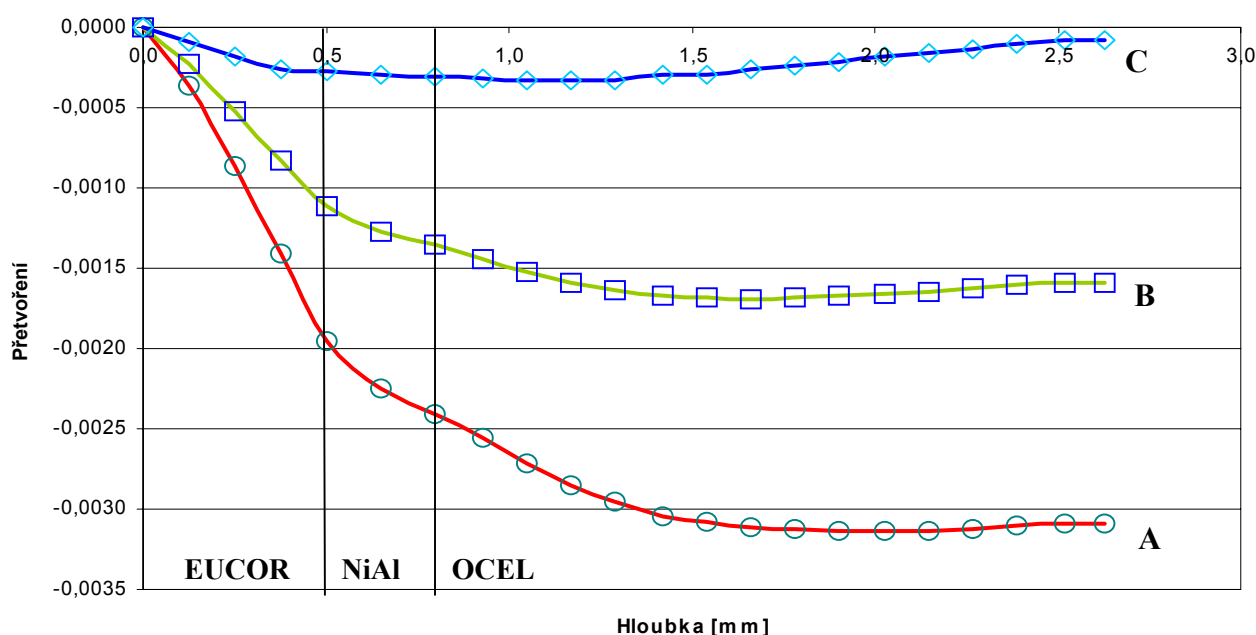
Obr. 8 Modelové těleso – diskretizace z MKP

a) geometrie a zatížení,
b) detail oblasti odvrtávání

těleso bylo na okrajích zatíženo spojitě rozloženým plošným zatížením dle obr. 8a. V různých vrstvách modelového tělesa vznikly různé hodnoty homogenní tahové napjatosti viz tab. 2. Průběhy poměrných přetvoření po odvrtání otvoru jsou na obr. 9. Lze konstatovat, že průběhy jednotlivých poměrných přetvoření mají v jednotlivých vrstvách odlišný charakter (ve vrstvě oceli jsou tyto průběhy strmější, než ve vrstvě NiAl-u), což je odezva na různé hodnoty napětí v těchto vrstvách. Přibližně od hloubky 1,5 mm jsou přetvoření v místech tenzometrických mřížek A, B a C nezávislé na hloubce otvoru, což lze považovat za projev platnosti principu Saint Vénanta. Další bádání bude spočívat v odvození koeficientů pro přepočet přetvoření na zbytková napětí pro materiálové charakteristiky jednotlivých vrstev modelového tělesa. S jejich využitím budou určeny průběhy zbytkových napětí v závislosti na hloubce odvrtaného otvoru. Tyto průběhy pak budou porovnány se skutečnými napětím v jednotlivých vrstvách. Tímto přístupem budou získány informace o tom, jak metoda ekvivalentních rovnoměrných napětí je schopna postihnout nehomogenní rozložení zbytkových napětí po tloušťce tělesa.

	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
EUCOR	112	41
NiAl	39	18
Ocel	213	107

Tab. 2 Rovinná napjatost v jednotlivých vrstvách v oblasti odvrtávání a měření od vnějšího zatížení dle obr.8a ($p_x=200\text{MPa}$ $p_y=100\text{MPa}$),



Obr. 9 Závislost poměrných přetvoření na hloubce odvrtaného otvoru (tři vrstvy materiálu)

5. Závěr

Problematika určování zbytkových napětí v tenkých vrstvách (nástricích) materiálu naneseného na jiný základní materiál je výrazně složitější než určování zbytkových napětí v tělesech vyrobených z jednoho materiálu. Jelikož mezi vrstvu nástriku a základní materiál se obvykle nanáší mezivrstva dalšího materiálu (kvůli zlepšení přilnavosti nástriku), jedná se o problematiku určování zbytkových napětí ve třech vrstvách různých materiálů. Velikost a rozložení zbytkových napětí jsou ovlivňovány mnoha faktory, k nimž lze řadit: parametry technologie nástriku, mechanické a tepelné vlastnosti jednotlivých materiálů, tvar a rozměry tělesa, na které se nanáší nástriku. Určování zbytkových napětí v tenkých vrstvách materiálu je tedy mnohofaktoriálním problémem, přičemž sama „odvrtávací metodika“ pro určování zbytkových napětí nese sebou řadu problémů.

Práce byla realizována za podpory výzkumného záměru MŠMT č. CEZ: 322/98: 262100001.