Národní konference s mezinárodní účastíINŽENÝRSKÁ MECHANIKA 200213. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

METODOLOGIE URČOVÁNÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK PLAZMATICKÝCH NÁSTŘIKŮ KORUNDO–BADDELEYITOVÉ KERAMIKY EUCOR

Přemysl Janíček¹, Františka Pešlová², Jaroslav Kubíček³, Jiří Burša¹, Vladimír Fuis¹, Vladimír Kotek¹, Josef Filípek⁴, Leoš Bumbálek³, Miloš Vlk¹, Jarmila Blažíková⁵, Milan Čepera⁵, Jaroslav Valenta⁶

EUCOR je obchodní označení korundo-baddeleyitového materiálu, který vzniká tavením křemičitanu zirkončitého (ZrSiO₄) a oxidu hlinitého (Al_2O_3), případně dalších přísad ve vhodném poměru v elektrické obloukové peci. Výrobce tohoto materiálu, firma EUTIT Stará Voda, předpokládá aplikačního využití plazmatických nástřiků EUCOR-u, což je podmíněno znalostmi o jejich vlastnostech a chování pro účely výpočtového modelování deformačně-napěťových stavů zatížených těles, pro posuzování degradačních procesů v nástřicích a pro posuzování mezních stavů. To byl důvod, proč bylo přistoupeno ke komplexnímu zjišťování vlastností a chování EUCOR-ových plazmatických nástřiků. Tento výzkum se skládá z určování: abrazivního opotřebení nástřiků, jejich konstitutivních charakteristik, zbytkových napětí a kavitačního opotřebení nástřiků.

Klíčová slova: plazmatický nástřik keramiky EUCOR, strukturní a fázová analýza, abrazivní opotřebení, zbytková napětí, moduly pružnosti, kavitační opotřebení.

1. Technologie plazmatického nástřiku EUCOR-u

Plazmatické nástřiky EUCOR-u byly nanášeny na ocelové povrchy a na litý EUCOR. Kovové povrchy byly odmaštěny a otryskány hnědým korundem o zrnitosti 0,5 až 0,8 mm, při tlaku 0,3 MPa. Jako mezivrstva mezi nástřik EUCOR-u a ocelový povrch byl použit materiál NiAl. Pracovalo se s těmito parametry nástřiku:

- Plazmový proud: 550A, Napětí oblouku: 68 V,
- ▶ Průtok plazmového plynu: Argon 41,5 l/min, Vodík 12 l/min,
- ➢ Průtok podávacího plynu: Argon 1,5 l/min,
- ➢ Vzdálenost nástřiku: 140 mm, Tloušťky povlaků: 0,5až 1 mm.

¹ Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc., Ing. Jiří Burša, PhD., Ing. Vladimír Fuis, PhD., Doc. Ing. Miloš Vlk, CSc., Ing. Vladimír Kotek, Ústav mechaniky těles, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, Česká republika; tel.:+420 541142807, fax: +420 5 41142876; E-mail: janicek@umtn.fme.vutbr.cz

² Prof. Ing. Františka Pešlová, CSc., Katedra dopravní techniky, Dopravní fakulta J. Pernera, Univerzita Pardubice, Slovanská 452, Česká Třebová, Česká republika, tel.: +420 465 533006

³ Ing. Jaroslav Kubíček, Ing. Leoš Bumbnálek, PhD. Ústav strojírenské technologie Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, Česká republika

⁴ Doc. Ing. Josef Filípek, CSc., 00420 5 45132123, Ústav základů techniky, AF-MZLU v Brně, Zemědělská 1, Brno.tel.: +420 5 41142512, +420 5 41142506.

⁵ PhDr. Jarmila Blažíková, PhDr. Milan Čepera, PhD. Vojenský technický Ústav ochrany. Veslařská 230, Brno, tel.: +420 5 43562137.

⁶ Ing. Jaroslav Valenta, EUTIT s.r.o. Stará Voda 196, 353 01 Mariánské Lázně, tel.: +420 165 691301.

2. Strukturní a fázová analýza plazmatického nástřiku EUCOR-u

Rentgenovou energiově-disperzní spektrální mikroanalýzou byly zjištěny tyto průměrné hodnoty oxidů: Al₂O₃ 41,0%, SiO₂ 13,1%, ZrO₂ 45,7%.

Rentgenovou difrakční analýzou bylo zjištěno, že Al₂O₃ se vyskytuje v tetragonální fázi a ZrO₂ v monoklinické (70 obj.%) a tetragonální (30 obj.%) fázi.

3. Určování abrazivního opotřebení plazmatického nástřiku EUCOR-u

3.1 Metoda rotujícího vzorku v rotujícím abrazivu

Princip této metody spočívá v tom, že zkušební vzorek rotuje v prostoru naplněném abrazivem, jehož složky vykonávají vůči povrchu vzorku náhodný pohyb. Metoda byla realizována na zařízení Bond, jehož schéma je na obr. 1. Zařízení se skládá z letmo uloženého rotujícího hřídele (možnost změny otáček), na jehož převislém konci je disk na který lze uchytit 8 vzorků ve tvaru destiček (75x40xvolný rozměr do cca 15mm), a to tak, že podélná osa symetrie vzorku má radiální směr. Příruba se vzorky se nachází v prostoru uzavřeném rotujícím bubnem, který rotuje ve stejném smyslu s diskem, ale menšími otáčkami. Vzdálenost mezi hranou vzorku a rotujícím bubnem je 10 mm. Použití Bondova přístroje pro určování abrazivního opotřebení tenkých vrstev je nevhodné, protože během krátké doby dochází k výraznému opotřebení hran vzorku až na základní materiál.



Obr. 1 Schéma zkušebního zařízení BOND pro zjišťování abrazivní odolnosti materiálů

3.2 Metoda brusného plátna

Podstata a metodika je dána normou ČSN 01 5084. Na rovnoměrně se otáčející vodorovné desce (průměr 480 mm) je upevněno brusné plátno (korundový kepr). Zkušební vzorek, který je pak závažím přitlačován k brusnému plátnu, se během zkoušky posouvá od středu k okraji brusného plátna, takže jeho aktivní část (plocha kruhu o průměru 10 mm) je neustále ve styku s nepoužitým brusným plátnem. Velikost přítlačného měrného tlaku byla 0,32 N.mm⁻². Hmotnostní úbytek vzorku se určoval po proběhnutí 50 m třecí dráhy. Na obr. 2 je pohled na zkušební zařízení pro metodu brusného plátna a na obr. 3 jsou výsledky měření. Souhrnně lze konstatovat:

- Litý EUCOR vykazuje výrazně vyšší rozptyl naměřených hodnot, než nástřik EU-COR–u. Je to v souladu s předpokladem, že plazmatický nástřik EUCOR–u má větší strukturní homogenitu než jeho litá struktura.
- 2) Poměrná odolnost vůči abrazivnímu opotřebení nástřiku EUCOR-u (hodnota 4,6) je srovnatelná s nejnižšími naměřenými hodnotami u litého EUCOR-u (4,3 až 4,6).



Obr. 2 Zkušební zařízení pro metodu brusného plátna



Obr. 3 Výsledky měření abrazivního opotřebení na brusném plátně

3) Plazmatický nástřik EUCOR-u má větší poměrnou odolnost vůči abrazivnímu opotřebení (hodnota 4,6) než Hadfieldova ocel (hodnota 2).

3.3 Metoda rotujícího vzorku v rotujícím abrazivu v bubnové brousící nádobě

Schéma přístroje pro zjišťování abrazivního opotřebení volným abrazivem v bubnové brousící nádobě je na obr. 4. Zkušební vzorky, jejichž tvar je zřejmý z obr. 5 se vloží do brousící nádoby a zjišťují se hmotnostní úbytky vzorků při abrazi hnědým umělým korundem v závislosti na čase. Etalonem byla ocel 11 373. Výsledky zkoušek jsou na obr. 6. Lze konstatovat, že abrazivní opotřebení oceli 11 373 je cca o 18% větší než u plazmatického nástřiku EUCOR-u, a to po 96-ti hodinách zkoušek.



Obr. 4 Schéma zkušebního zařízení s bubnovou brousící nádobou



Obr. 5 Pohled na zkušební vzorky s plazmatickým nástřikem EUCOR-u



Obr. 6 Konfidenční pásy středních hodnot hmotnostních úbytků na hladině významnosti 0,05

4. Určování kavitačního opotřebení

Kavitace a kavitační porušování, jako jeden z degradačních procesů materiálu, jsou stále aktuální problematikou jak v oblasti technické praxe tak i technické vědy. Vzhledem ke složitosti matematického popisu procesu kavitačního porušování je v současnosti experimentální vyšetřování tohoto procesu nejpoužívanější a současně i nejefektivnější metodou. Lze ho považovat za **experimentální simulační modelování**, protože v laboratorních podmínkách se simulují procesy kavitace vedoucí ke kavitačnímu porušování. *Zařízením na určování kavitačního opotřebení byl ultrazvukový dezintegrátor*, jehož funkcí je generovat ultrazvukové pole, které kavitačním procesem rozrušuje materiály, jsou-li tyto vloženy do tohoto pole.

Ověřovací zkoušky kavitačního opotřebení plazmatických nástřiků keramiky EUCOR se realizovaly ve dvou různých médiích, a to ve vodě a ve zředěné kyselině sírové. Ilustrativní ukázky mikrostruktur keramiky v procesu kavitování v obou uvedených médiích jsou uvedeny na obr. 7 až obr. 10. Komplexní analýza výsledků kavitačních procesů bude možná až po realizaci statisticky významného množství vzorků. V tomto stadiu prací lze konstatovat tyto skutečnosti. Struktury keramických nástřiků jsou tvořené z jemných částic křemičitanu zirkoničitého a oxidu hlinitého. V procesu kavitace dochází k postupnému uvolňování jednotlivých zrn. V současné době nelze s určitostí říci, která z těchto částic bude přednostně působit jako iniciátor porušení. Vzniklé kavitační krátery mají ostrá a členitá rozhraní, která se dalším působením ultrazvukových vln nekontrolovatelně rozpadají. Nastane-li porušení vrstvy do větších hloubek, je napadnutý i kovový materiál. Potom dochází k erozně-koroznímu opotřebení, které synergicky urychluje celý kavitační proces. V dalším by se již nejednalo pouze o problematiku odolnosti keramického nástřiku proti kavitaci, ale o celkovou degradaci nástřikem upraveného povrchu materiálu.



Obr. 7 Pohled na kavitační opotřebení keramického nástřiku EUCOR-u – kavitováno v H₂O



Obr. 8 Detail obr. 7





Obr. 9 Pohled na kavitační opotřebení keramického nástřiku EUCOR-u – kavitováno v H₂SO₄

Obr. 10 Detail obr. 9

Dále lze konstatovat, že ovlivnění struktury keramiky kavitačním procesem při kavitování v H_2O a v H_2SO_4 nebyly pozorovány zásadní rozdíly. Stejně tak i doby kavitace do prvního obnažení kovového podkladu vzorku se pro obě použitá média významně nelišily. Na základě těchto skutečností lze konstatovat, že keramika EUCOR je málo citlivá na agresivitu prostředí, v němž dochází ke kavitačním procesům.

5. Určování zbytkových napětí v plazmatických nástřicích EUCOR-u

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 nástřik byl nanesen na trámeček z litého EUCOR-u,
- varianta "*EUCOR na oceli"* plazmatický nástřik byl nanesen na trámeček z oceli, přičemž mezi vrstvu plazmatického nástřiku a základní materiál byly nanesena mezivrstva NiAl-u.

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 měřícího 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. 11, na obr. 12 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



Obr. 11 Celkový pohled na zařízení MTS 3000 HBM

Obr. 12 Pohled na zkušební vzorek s nalepenou tenzometrickou růžicí

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.



Obr. 13 Celkový pohled na vyvrtaný otvor

Na obr. 13 je pohled na odvrtaný otvor ve zkušebním vzorku. Snímky byly získány na elektronovém rastrovacím mikroskopu. Na obou snímcích 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.

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

Tab. 1 Hodnoty tlouštěk nástřiku EUCOR-u a mezivrstvy

Závislost uvolněných délkových přetvoření na hloubce odvrtaného otvoru (výsledky jsou uvedeny do hloubky 0,5 mm) pro variantu "nástřik EUCOR na litém EUCOR-u"

je na obr. 14. Průběhy hlavních zbytkových napětí pro tuto variantu jsou na obr. 15. Závislost uvolněných délkových přetvoření na hloubce odvrtaného otvoru pro případ *"nástřik EUCOR-u na oceli"* je na obr. 16, odpovídající průběhy napětí na obr. 17. Analýza výsledků měření vedla k těmto konstatováním:

- Závislost hlavních zbytkových napětí na hloubce odvrtaného otvoru pro variantu "nástřik 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 "nástřik EUCOR-u na oceli" má zcela odlišný charakter než předešlá varianta. Obě hlavní zbytková napětí jsou záporná, a tedy tlaková.

6. Určování modulů pružnosti tenkých vrstev materiálů

Určování deformačně-napěťových stavů u těles, realizované výpočtovým modelováním vyžaduje znalost konstitutivních materiálových charakteristik (moduly pružnosti a součinitele příčné kontrakce). Pro současnou dobu je charakteristické, že se rozšiřuje aplikace žárových (plazmatických) nástřiků materiálů na konstrukční části nejen technických objektů ale i komponent totálních endoprotéz kloubů. Jedná se o nástřiky kovových, resp. keramických materiálů. V souvislosti s těmito aplikacemi se objevil požadavek mít k dispozici informace o konstitutivních materiálových charakteristikách žárových nástřiků.



Obr. 14 Závislost poměrných přetvoření na hloubce odvrtaného otvoru





Performance li Hloubka [mm]

Obr. 16 Závislost poměrných přetvoření na hloubce odvrtaného otvoru

Obr. 17 Závislost hlavních zbytkových napětí na hloubce odvrtaného otvoru

Tyto skutečnosti přivedly autory příspěvku na myšlenku určovat elastické charakteristiky na zkušebním vzorku namáhaném ohybem. V oblasti materiálového inženýrství se používá především tzv. čtyřbodový ohyb. Realizace této metody vyžaduje, aby byla k dispozici analytická teorie pro namáhání prutu ohybem pro případ, že na jednom nebo na obou stranách zkušebního vzorku bude jedna nebo dvě tenké vrstvy žárového nástřiku. Odvození této teorie je náplní tohoto příspěvku, protože autorům není známo, že by byla k dispozici.

Nejprve bylo nutno vyřešit tzv. *přímý problém*, u něhož se stanovují poměrná přetvoření (důsledky) v tenkých povrchových vrstvách na základě známých informací o tvaru, zatížení, materiálu a vazbách prutu.

Následně byl řešen *nepřímý problém*, u něhož se na základě experimentálně zjištěných důsledků může určit některá z předešlých entit. V tomto případě je to určování modulů pružnosti v tenkých povrchových vrstvách žárového nástřiku na základě experimentálně určených extrémních přetvoření na površích těchto vrstev, nanesených na zkušební vzorky.

Řešení přímého problému

Pro řešení přímého problému je třeba odvodit vztahy pro extrémní poměrná délková přetvoření, a to u prizmatického prutu zatíženého tak, aby byl namáhán na ohyb. Odvození je provedeno pro konkrétní (obdélníkový) tvar příčného průřezu prutu (viz obr.18).



Obr. 18 Schémata příčných průřezů prutu pro jednotlivé varianty

Ten je tvořen:

- jednou, tzv. "nosnou částí" parametry v této části budou označeny indexem 1,
- u varianty I jednou tenkou vrstvou na horní straně, jednou tenkou vrstvou na spodní; každá z těchto vrstev může mít obecně různé tloušťky a různé hodnoty modulů pružnosti,
- u varianty II dvěma tenkými vrstvami na jedné straně,
- u varianty III dvěma tenkými vrstvami na obou stranách; parametry v horní vrstvě budou označeny indexem 3, v mezivrstvě (vrstva mezi nosnou částí a horní vrstvou) indexem 2 – parametry ve spodní vrstvě budou označeny indexem 5, v mezivrstvě (vrstva mezi nosnou částí a spodní vrstvou) indexem 4.

Teorie prosté pružnosti prutů je založena na předpokladu, že příčné průřezy při deformaci zachovávají svou rovinnost a pouze se posouvají nebo natáčejí. Moderními metodami experimentálního a výpočtového modelování bylo však prokázáno, že i u materiálově homogenních prutů existují případy, u nichž tento předpoklad není splněn (např. krut prutů s nekruhovým příčným průřezem). Proto, obzvlášť u materiálově nehomogenních (např.vícevrstvých) prutů, by neměl být předpoklad o zachování rovinnosti příčných průřezů v procesu jejich zatěžování považován a priori za splněný, i když se používá např. i v teorii laminátů, ale měl by být dostupnými prostředky ověřen. Prostředkem, vhodným pro ověření, je metoda konečných prvků, která je založena na zcela jiném principu a tento předpoklad nezavádí. Ve výpočtovém modelu vytvořeném v programu ANSYS, byl uvažován poměr modulů pružnosti obou materiálů 2 : 1 a celková výška prutu 15 mm.

Průběh poměrných přetvoření ε_x po výšce náhodně zvoleného příčného průřezu prutu je na obr. 20, z něhož je zřejmé, že je v rámci běžné rozlišovací úrovně skutečně lineární, což znamená, že příčný průřez si po deformaci zachoval rovinnost jako celek a nastalo pouze jeho natočení.

Dále jsou uvedeny polohy neutrálních os a vztahy pro extrémní poměrná přetvoření pro jednotlivé řešené varianty poloh tenkých vrstev.



Obr. 19 Schéma čtyřbodového ohybu



Obr. 20 Kontrola zachování rovinnosti příčných průřezů u prutu namáhaného ohybem

VARIANTA I

$$e = \frac{1}{2} \frac{E_3 t_3 (h + t_3) - E_2 t_2 (h + t_2)}{E_1 h + E_2 t_2 + E_3 t_3}$$
(1)

$$\varepsilon_{2} = \frac{M_{oy}}{b} \frac{6(h+2t_{2}+2e)}{E_{1}[h^{3}+12he^{2}] + E_{2}[t_{2}^{3}+3t_{2}(h+t_{2}+2e)^{2}] + E_{3}[t_{3}^{3}+3t_{3}(h+t_{3}-2e)^{2}]}$$
(2)

$$\varepsilon_{3} = \frac{M_{oy}}{b} \frac{6(h+2t_{3}-2e)}{E_{1}[h^{3}+12he^{2}]+E_{2}[t_{2}^{3}+3t_{2}(h+t_{2}+2e)^{2}]+E_{3}[t_{3}^{3}+3t_{3}(h+t_{3}-2e)^{2}]}$$
(3)

VARIANTA II

$$e = \frac{E_1 h(t_2 + t_3) - E_2 t_2 (h - t_3) - E_3 t_3 (h + t_2)}{2(E_1 h + E_2 t_2 + E_3 t_3)}$$
(4)

$$\varepsilon_{3} = -\frac{M_{oy}}{b} \frac{6(h+t_{2}+t_{3}+2e)}{E_{1}[h^{3}+3h(t_{2}+t_{3}-2e)^{2}] + E_{2}[t_{2}^{3}+3t_{2}(h-t_{3}+2e)^{2}] + E_{3}[t_{3}^{3}+3t_{3}(h+t_{2}+2e)^{2}]}$$
(5)

VARIANTA III

$$e = \frac{E_4 t_4 (h + t_4) + E_5 t_5 (h + t_5 + 2t_4) - E_2 t_2 (h + t_2) - E_3 t_3 (h + t_3 + 2t_2)}{2(E_1 h + E_2 t_2 + E_3 t_3 + E_4 t_4 + E_5 t_5)}$$
(6)

$$\varepsilon_{3} = \frac{M_{oy}}{b} \frac{6(h+2(t_{2}+t_{3}+e))}{A} \qquad \qquad \varepsilon_{5} = \frac{M_{oy}}{b} \frac{6(h+2(t_{4}+t_{5}-e))}{A}$$
(7)

kde:

$$A = E_1 [h^3 + 12he^2] + E_2 [t_2^3 + 3t_2(h + t_2 + 2e)^2] + E_3 [t_3^3 + 3t_3(h + t_3 + 2t_2 + 2e)^2] + E_4 [t_4^3 + 3t_4(h + t_4 - 2e)^2] + E_5 [t_5^3 + 3t_5(h + t_5 + 2t_4 - 2e)^2]$$
(8)

Řešení nepřímého problému

Nepřímý problém je formulován takto (označení platí pro variantu I).

Odvodit vztahy pro určení modulu pružnosti E_3 v tahu a E_2 v tlaku ve vrstvách žárového nástřiku z experimentálně stanovených extrémních poměrných přetvoření ε_2 a ε_3 , a to pro prut jehož geometrie, zatížení, materiály a vazby jsou stejné jako u přímého problému.

Pro extrémní poměrná přetvoření v tlakové a v tahové oblasti prutu byly odvozeny vztahy (2) a (3). Vyřešit nepřímý problém znamená z těchto dvou rovnic určit moduly

pružnosti materiálu nástřiku v tahu (E₃) a v tlaku (E₂). Řešení je ještě komplikováno skutečností, že posun neutrální osy e je rovněž funkcí neznámých modulů pružnosti, popsanou vztahem (1). Ostatní veličiny v těchto vztazích jsou známé, a to rozměry příčného průřezu b, h, t₂ a t₃, modul pružnosti E₁ střední části prutu, dále ohybový moment $M_{oy}(x) = F.a$ a experimentálně zjištěná extrémní poměrná přetvoření v tahové oblasti (ε_3) a v tlakové oblasti (ε_2).

Vzhledem ke komplikovanému tvaru těchto rovnic je nutné jejich řešení vzhledem k neznámým veličinám E_2 a E_3 realizovat numericky. Pro varianty II a III se pro určení neznámých modulů pružnosti vrstev nástřiku v tahu a v tlaku použijí odpovídající vztahy pro e a ε . K tomu je třeba navíc znát samozřejmě moduly pružnosti příslušných mezivrstev E_2 (viz obr. 18b), příp. i E_4 (viz obr. 18c).

7. Závěr

Příspěvek shrnuje výsledky vstupní studie týkající se určování některých mechanických charakteristik plazmatického nástřiku keramiky EUCOR. Navržené metodiky pro určování abrazivního opotřebení tenké vrstvy nástřiku, pro určování zbytkových napětí v tenkých vrstvách, pro určování kavitačního opotřebení tenkých vrstev a pro určování modulů pružnosti v tahu a v tlaku materiálů tenkých vrstev mají obecný charakter. Lze je tedy využít pro určování mechanických charakteristik tenkých vrstev jakýchkoliv typů keramiky.

Tato práce byla realizována v rámci Výzkumného záměru MŠMT č. CEZ:322/98 262100001.