



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

STUDIUM NAPĚŤOVÝCH STAVŮ V PLAZMATICKY NANÁŠENÝCH TERMÁLNÍCH BARIÉRÁCH

FINITE ELEMENT SIMULATION OF STRESSES IN PLASMA-SPRAYED THERMAL BARRIER COATING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Lacina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Skalka, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Zdeněk Lacina
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Skalka, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studium napěťových stavů v plazmaticky nanášených termálních bariérách

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Termální bariéry jsou vícevrstevným ochranným systémem užívaným zejména v energetickém a leteckém průmyslu pro zvýšení životnosti vysoce tepelně zatížených součástí (až 1200 °C) a řadí se mezi nejpokročilejší povrchové úpravy pro vysokoteplotní aplikace. Za vysokých teplot dochází během provozu k degradaci materiálu, a to zejména oxidací a vysokoteplotní korozi. Termální bariéry jsou založeny na principu výrazného snížení přenosu tepla mezi prostředím a základním materiálem. Plazmaticky nanášené termální bariéry mají kovový vazebný povlak (BC – bond coat) s vysoce nepravidelnou topografií povrchu, který zajišťuje ochranu proti oxidaci, korozi a dobré mechanické spojení s následně naneseným vrchním keramickým povlakem (TC – top coat). Během provozu vzniká mezi těmito vrstvami další vrstva označovaná jako TGO (thermally grown oxide). Z důvodu nepravidelného rozhraní a rozdílným materiálovým vlastnostem jednotlivých vrstev dochází v blízkosti rozhraní k napěťovým stavům, které vedou k poškození povlaku. Bakalářská práce je zaměřena na posouzení vlivu topografie povrchu vazebné vrstvy na stav napjatosti v termální bariéře.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedení rešeršní studie související s řešenou problematikou
- 2) Vytvoření výpočtového modelu termální bariéry
- 3) Stanovení napěťových stavů v termální bariéře
- 4) Analýza dosažených výsledků a učinění příslušných závěrů

Seznam doporučené literatury:

BOSE, S.: High Temperature Coatings. 1. vyd., USA: Elsevier, ISBN: 978-0-7506-8252-7, 2007

PADTURE, N., GELL, M., JORDAN, E.: Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications, Science, 296, 280–284, 2002

LIU, D., SERAFFON, M., FLEWITT, P., SIMMS, N., NICHOLLS, J., RICKERBY, D.: Effect of substrate curvature on residual stresses and failure modes of an air plasma sprayed thermal barrier coating system, J. Eur. Ceram. Soc., 33, 3345–3357, 2013

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá studiem napěťových stavů v plazmaticky nanášených termálních bariérách. V programu Ansys byl vytvořen dvourozměrný výpočtový model termální bariéry, na kterém bylo simulováno ochlazování termální bariéry z provozní teploty na teplotu pokojovou. Následně bylo studováno rozložení napětí v keramické vrstvě. Výstupem práce je popis vlivu drsnosti povrchu, amplitudy a TGO vrstvy na napětí v keramické vrstvě termální bariéry. Ke zpracování výsledků byl použit program Matlab.

Klíčová slova:

Termální bariéry, Plazmatické nanášení, Tepelné napětí, Drsnost, Metoda konečných prvků

Abstract:

Bachelor's thesis focuses on the study of stress states in thermal barrier coatings. A two-dimensional computational model of thermal barrier coating was created using ANSYS software, on which the process of cooling of thermal barrier from working temperature to room temperature was simulated. The stress distribution in ceramic layer was studied then. The output of this thesis is a description of the influence of roughness, amplitude and TGO layer on the stresses in a ceramic layer of thermal barrier. Matlab software was used to process the results.

Keywords:

Thermal barrier coatings, Plasma spraying, Thermal stresses, Roughness, Finite element method

Bibliografická citace

LACINA, Z. *Studium napěťových stavů v plazmaticky nanášených termálních bariérách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Skalka, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Skalky, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2018

.....

Zdeněk Lacina

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce, panu Ing. Petru Skalkovi, Ph.D. za jeho přístup, ochotu, trpělivost a cenné rady při konzultacích. Velké díky patří i моým rodičům a přítelkyni za podporu v průběhu studia.

Obsah

Úvod	11
1 Formulace problému	12
2 Cíle práce	13
3 Rešeršní studie	14
3.1 Termální bariéry	14
3.2 Funkce termálních bariér	14
3.3 Metody nanášení termálních bariér	15
3.3.1 Metoda APS.....	16
3.3.2 Metoda EB-PVD.....	18
3.3.3 Jiné metody nanášení termálních bariér.....	19
3.4 Složení termální bariéry.....	20
3.4.1 Keramický povlak (Top Coat)	20
3.4.2 Kovový vazebný povlak (Bond Coat)	20
3.4.3 Vrstva oxidu hlinitého (TGO)	20
4 Analýza problému	22
5 Výpočtové modelování	23
5.1 Model geometrie termální bariéry.....	23
5.2 Model materiálových vlastností jednotlivých vrstev.....	27
5.3 Model okrajových podmínek.....	28
5.4 Model zatížení	28
6 Realizace řešení	29
7 Prezentace a analýza výsledků	30
7.1 Analýza napětového pole v keramické vrstvě.....	30
7.2 Analýza vlivu TGO vrstvy na napětová pole v TBC systému	30
7.3 Porovnání modelů s různými vazebnými materiály	35
Závěr	39
Použité zdroje	40
Seznam použitých zkratk a symbolů	41
Seznam obrázků	42
Seznam tabulek	42

Úvod

V dnešní době jsou termální bariéry nedílnou součástí aplikací v různých odvětvích průmyslu, zejména v plynových turbínách na výrobu elektrické energie a leteckých proudových motorech. Jsou totiž jednou z klíčových složek soustrojí, protože pomáhají naplňovat stupňující se požadavky na vyšší účinnost a větší ekologičnost provozu těchto zařízení. Pro správnou aplikaci termálních bariér je však nutné porozumět dějům, které se v těchto systémech odehrávají. Jedním z těchto dějů je vznik napětí při různých zátěžných stavech. Ať už jsou to reziduální pnutí vzniklá při nanášení povlaků, napětí způsobená změnou teploty v pracovní komoře či dalšími faktory, vždy má na rozložení napětí v systému termální bariéry vliv členitost rozhraní jednotlivých vrstev. Pomocí výpočtových simulací lze studovat vztahy mezi jednotlivými geometrickými parametry a napětím a tím tak dosáhnout úspory peněz a času při vývoji TBC systémů [1].

Práce je uvedena řešeršní studií, která popisuje funkci, složení a způsoby nanášení termálních bariér. V praktické části byl popsán dvourozměrný model termální bariéry, na kterém byla provedena simulace ochlazování termální bariéry a poté bylo studováno rozložení napětí v keramické vrstvě.

1 Formulace problému

Napětí v termálních bariérách může vznikat mnoha způsoby, například po nanesení povlaku na základní materiál vznikají reziduální napětí. Při provozu však mohou činit velké problémy napětí způsobená opakovaným chladnutím a zahříváním, tzv. teplotním cyklováním, neboť každý z materiálů systému termální bariéry se v důsledku rozdílných materiálových vlastností ochlazuje, a tím pádem smršťuje, různě rychle. Vliv na rozložení napětí v jednotlivých vrstvách má i členitost rozhraní sousedících vrstev. Je proto žádoucí pomocí výpočtových modelů zjistit vzájemný vztah mezi drsností povrchu, amplitudou a tloušťkou vrstvy TGO na vznikajícím napětí. Díky zjištění těchto závislostí pak lze optimálně nastavit procesní parametry nanášení a provozní podmínky a dosáhnout tak delší životnosti termálních bariér.

2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce bylo provedení rešeršní studie související s problematikou termálních bariér, popis jednotlivých částí systému a metod aplikace. V praktické části bylo cílem vytvoření dvourozměrného výpočtového modelu termální bariéry, na kterém by byla za podmínek rovinné deformace provedena simulace ochlazování termální bariéry. Dalším cílem byla analýza dat z numerických simulací a vyvození příslušných závěrů.

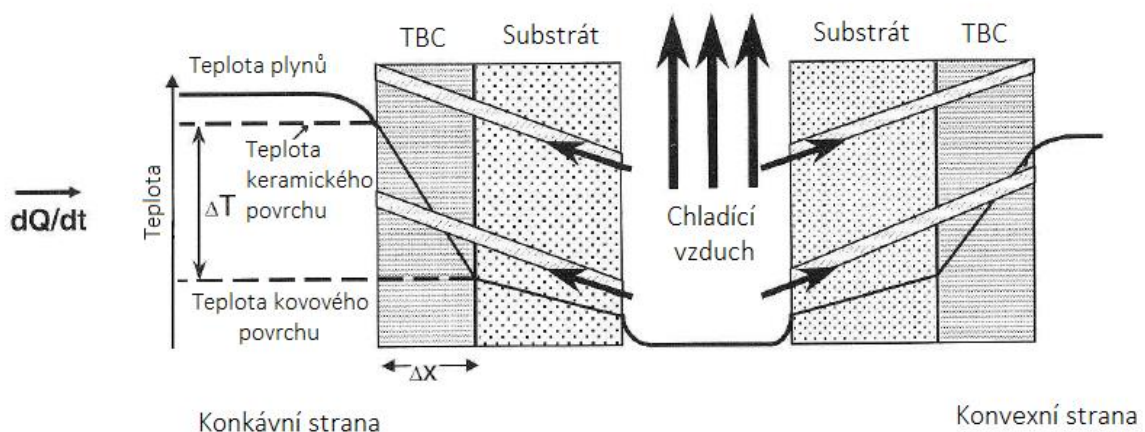
3 Rešeršní studie

3.1 Termální bariéry

Termální bariéry (zkratka TBC) jsou speciální druh povlaků, jejichž primárním úkolem je ochrana základního materiálu před vysokými teplotami, natavením či oxidací. Systém termální bariéry se skládá z několika vrstev, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Hlavní oblast využití TBC jsou aplikace pracující ve velmi vysokých teplotách, jakými jsou například součásti spalovacích komor v proudových motorech nebo plynových turbínách. Zvyšující se nároky na účinnost turbín znamenají vyšší teploty pracovních plynů, na což musí reagovat i vývoj termálních bariér. To se projevuje i na nových způsobech nanášení TBC povlaků. Zároveň však zvyšující se teploty pracovních plynů znamenají, že se termální bariéry stávají kritickou součástí celého turbínového soustrojí. Při selhání a následné delaminaci, byť jen části povlaku, může dojít k natavení základního materiálu, což může způsobit nevratné škody v systému [1,2].

3.2 Funkce termálních bariér

Hlavním důvodem používání TBC je jejich schopnost zabránit prostupu tepla do základního materiálu. Aby se však teplo neakumulovalo ve vrstvách termální bariéry, je jim potřeba zajistit chlazení. K tomu slouží dutiny, kterými je nasáván studený vzduch z kompresoru. Podle zákonů termomechaniky přechází teplo z prostředí teplejšího do prostředí studenějšího, tudíž vzduch odebírá teplo jak samotným součástí turbíny, tak i systému termální bariéry a tím je ochlazuje. Ohřátý vzduch je pak nutno odvést pryč z dutiny, k čemuž slouží malé dírký (průměry v řádech stovek mikronů) ve stěnách součástí soustrojí. Na obr. 1 je zobrazen mechanismus proudění vzduchu komponentou a zároveň i průběh teplot v jednotlivých vrstvách [2].



Obr. 1 Schéma chlazení TBC, převzato a upraveno [2]

V případě jednorozměrného vedení tepla (ve směru tepelného toku) lze zapsat rovnici vedení tepla následujícím způsobem

$$\frac{dQ}{dt} = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

kde dQ/dt je tepelný tok, K je tepelná vodivost, A je průřez a dT/dx teplotní gradient. Pro tenké vrstvy, jako jsou právě například termální bariéry, lze dT/dx nahradit výrazem $\Delta T/\Delta x$ a po vyjádření ΔT obdržíme rovnici

$$|\Delta T| = \frac{1}{K \cdot A} \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{dQ}{dt}\right) \quad (3.2)$$

Z této rovnice lze vypočítat několik závislostí:

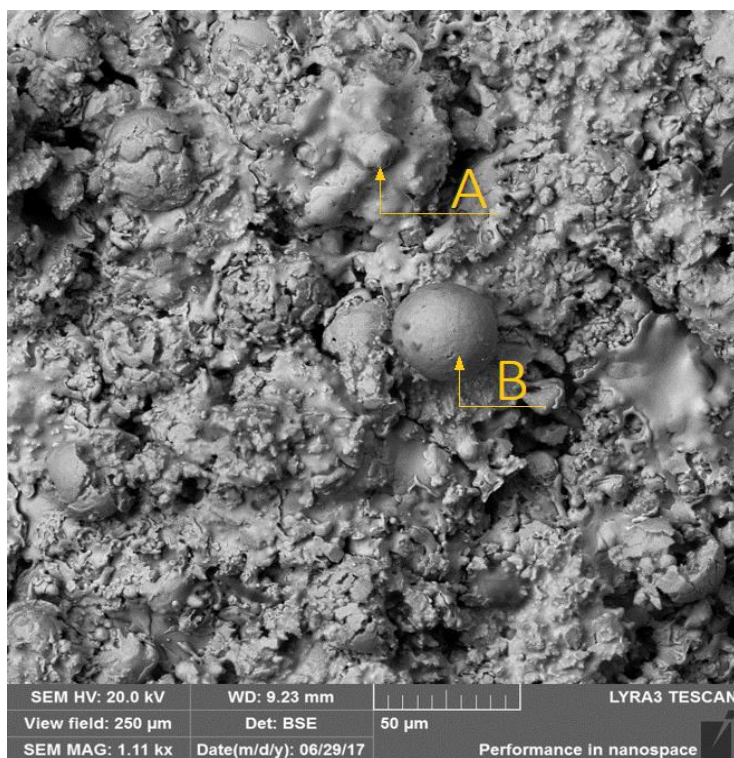
- čím menší je tepelná vodivost materiálu, tím větší je rozdíl teplot před a za termální bariérou, proto by měly být použité materiály, zejména pak keramická vrstva, co nejnižší tepelnou vodivost.
- změna teploty ΔT je přímo úměrná tepelnému toku. To v praxi znamená, že například u lopatek přední části turbíny, jimiž prochází větší tepelný tok, bude větší teplotní rozdíl než u lopatek následujících.
- čím tlustší je TBC (tedy čím větší Δx), tím větší je redukce teploty. Zdálo by se tedy, že je vhodné TBC vrstvu udělat co nejtlustší. To však není žádoucí zejména kvůli rostoucí hmotnosti a rostoucím zbytkovým napětím. Proto je potřeba při určování tloušťky termální bariéry najít rovnováhu mezi všemi těmito parametry a zohlednit je při návrhu TBC. [2]

3.3 Metody nanášení termálních bariér

Nejvíce omezujícím faktorem při nanášení termálních bariér jsou fyzikální vlastnosti oxidu zirkoničitého, který vytváří svrchní keramickou vrstvu. Bod tání zirkonia je totiž 2690 °C a této teploty nelze dosáhnout tradičními metodami ohřevu, například použitím plamene. Na řadu tedy přicházejí technologie, které jsou schopné vyvinout dostatečné množství tepla na roztavení tohoto materiálu. Nejčastěji používanými metodami v této oblasti jsou zejména APS a EB-PVD, které budou podrobněji popsány na následujících řádcích. Při nanášení TBC se musí dbát i na celkovou porozitu vytvořeného povlaku. Obvykle se tato hodnota pohybuje okolo 15 % a přispívá ke snížení tepelné vodivosti a zlepšení kompenzace napětí v materiálu. Na druhou stranu však porozita oslabuje materiál z hlediska odolnosti vůči erozi a dalším poškozením [1,2].

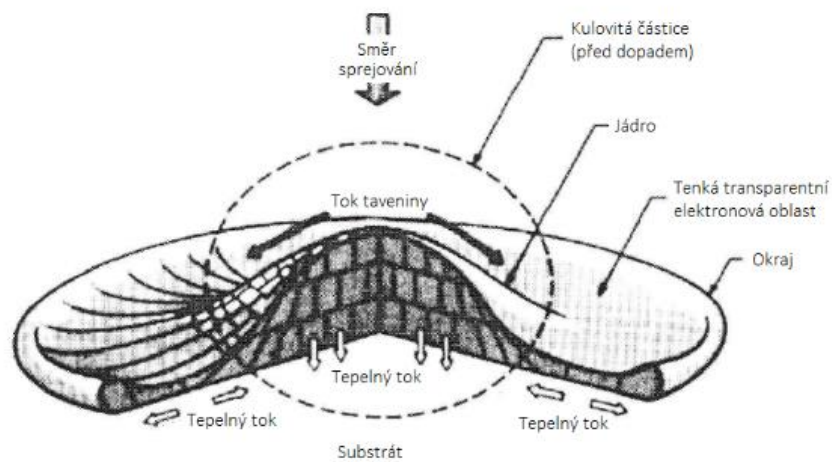
3.3.1 Metoda APS

Velmi rozšířenou metodou, kterou je možné nanášet termální bariéry, je metoda **APS** (Air Plasma Spraying), tedy **metoda plazmatického nanášení**. Celý proces probíhá v otevřené atmosféře, není tedy zapotřebí speciálních ochranných plynů či vakua. Jednou z nejdůležitějších částí nanášecího systému je plazmové dělo. Toto zařízení vytváří žhavou plazmu, která proudí směrem k povrchu povlakované součásti. Do proudu plazmatu jsou vystřelovány částice práškového YSZ, které se vlivem vysoké teploty začnou tavit. Vstřelovací rychlost granulátu by měla být nastavena optimálně tak, aby částice dosáhly středu plazmatického proudu. V případě, že by jejich rychlost byla menší či naopak větší než rychlost optimální, částice by se dostatečně neprohřála, tudíž by se celá nenatavila, a to by způsobilo nehomogenity v TBC vrstvě. Stejně tak musí být správně zvolena i velikost granulátu. Optimální velikost granulátu se pohybuje od 10 do 100 μm , přičemž mnohem menší částice by mohly uvíznout na okraji plazmatického paprsku, u mnohem větších částic by pak nedocházelo k prohřevu v celém objemu. Na obr. 2 lze vidět natavenou částici (A) a vedle ní částici nenatavenou (B). Princip vazeb mezi základním materiálem a plazmaticky nanášenou termální bariérou je zejména mechanický. Platí tedy, že čím drsnější je povrch, tím lépe se povlak přichytí. Pro dobré vazebné účinky je vhodné materiál při aplikaci povlaku předeheat, a to nejčastěji na teplotu mezi 127 až 227 $^{\circ}\text{C}$. Součást i plazmové dělo mohou během procesu nanášení vzájemně měnit polohu pro dosažení co nejlepšího povlaku. Úhel dopadu plazmatického paprsku by měl být optimálně mezi 75 až 90 $^{\circ}$, jelikož na tomto úhlu závisí mechanické vlastnosti termální bariéry [2,3].

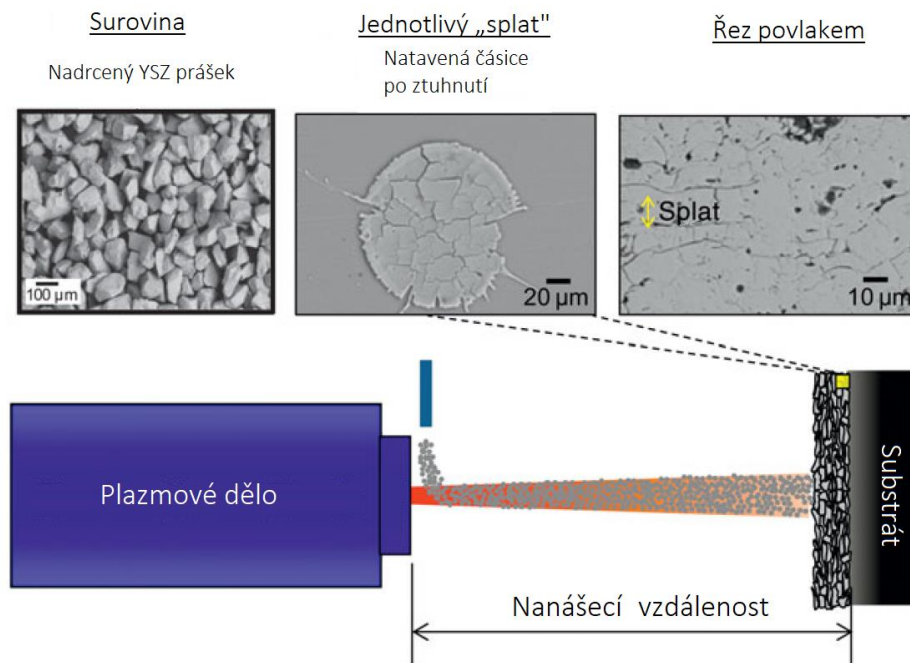


Obr. 2 Pohled na vazebný povlak nanášený metodou APS

Poté, co se částice nanášeného materiálu nataví v plazmatu, jsou vrženy tímto silným proudem proti povrchu povlakované součásti. Tím získají obrovskou kinetickou energii, která při kontaktu se substrátem způsobí deformaci částice a vznikne útvar diskovitého tvaru, tzn. „splat“ (viz obr. 3). Po dopadu roztavená částice extrémně rychle zchladne a ztuhne, přičemž rychlost ochlazování dosahuje 10^6 K/s. Toto ztuhnutí sebou nese nežádoucí průvodní jevy ve formě reziduálních napětí, kvůli kterým vznikají v materiálu jemné mikrotrhlínky. Jednotlivé „splaty“ se pak postupně vrství na sebe a vzniká tak cihlovitá struktura, která je charakteristická pro APS metodu [2].



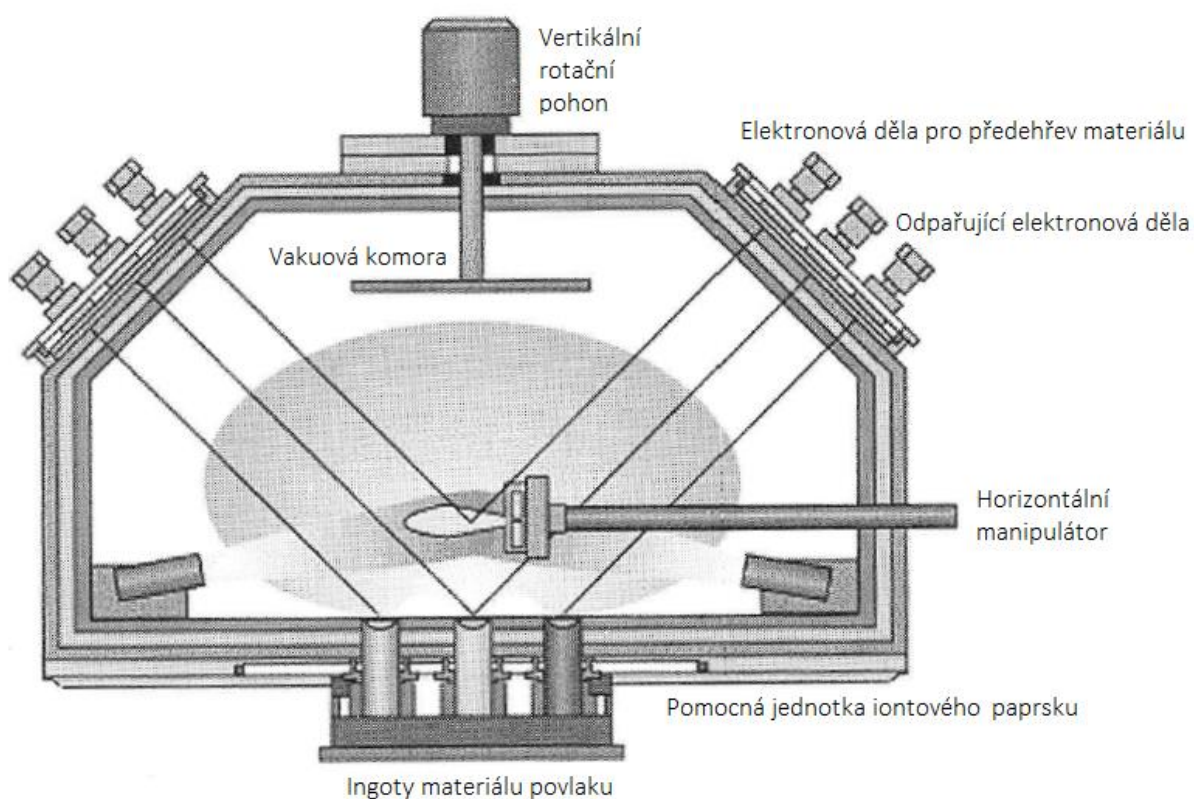
Obr. 3 Schéma dopadu částice a tvorba "splatu", převzato a upraveno [2]



Obr. 4 Schéma plazmatického nanášení, převzato a upraveno [3]

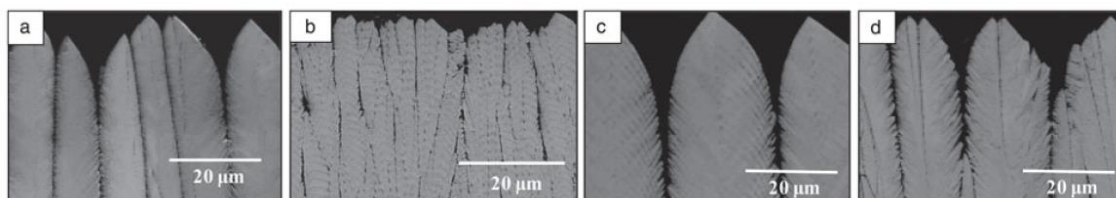
3.3.2 Metoda EB-PVD

Další metodou používající se k nanášení termálních bariér je metoda **EB-PVD** (Electron Beam-Physical Vapor Deposition), neboli **metoda fyzikální depozice z plynné fáze elektronovým paprskem**. Do pracovní vakuové komory je umístěna součást určená k povlakování, elektronové dělo a materiál povlaku, nejčastěji ve formě prášku či ingotů. Pro lepší přilnavost termální bariéry se součásti předehřívají na předem stanovenou teplotu, čímž se dosáhne zlepšení difúzních pochodů a lepšího růstu struktury. Při samotném procesu nanášení emituje elektronové dělo (či děla, může jich být v jedné komoře více) paprsek elektronů, které dopadají na ingoty či částice prášku a vlivem velké kinetické energie dopadajících elektronů dochází k natavení a vypařování materiálu povlaku. Odpařené molekuly materiálu se pak při kontaktu se základním materiálem zachytí na povrchu a stanou se tak součástí nově vznikající vrstvy povlaku. Ingoty jsou průběžně doplňovány, aby hladina taveniny byla stále ve stejné vzdálenosti od komponenty. Povlakované součásti jsou umístěny na manipulátorech, které se různě natáčejí a pohybují tak, aby měla vrstva na celém povrchu konstantní tloušťku, a aby byly pokryty všechny plochy součásti. Depozice molekul je totiž tzv. „line of sight process“, což znamená že molekuly putují pouze po přímých drahách. Proto aby byly pokryty vrstvou všechny plochy součásti, i ty obtížněji dostupné, musí tato součást při nanášení rotovat ve více osách. Metoda EB-PVD se používá zejména pro povlakování tepelně namáhaných rotujících součástí turbínového soustrojí [2,3].



Obr. 5 Schéma metody EB-PVD, převzato a upraveno [2]

Výsledná struktura povlaku je sloupcovitá, přičemž mezi jednotlivými sloupci působí pouze slabé vazby. Tato struktura poskytuje prostor pro expanzi materiálů při ohřevu, což snižuje napětí v materiálu. Na druhou stranu však tato struktura neposkytuje tak dobrou tepelnou izolaci jako například APS, tudíž je součinitel tepelné vodivosti vyšší u struktury nanášené metodou EB-PVD než metodou plazmatického nanášení [3].



Obr. 6 Sloupcovitá struktura povlaku vytvořená metodou EB-PVD (variace struktur v závislosti na procesních parametrech) [3]

3.3.3 Jiné metody nanášení termálních bariér

Výše zmíněné metody jsou v této době nejpoužívanější, avšak mají i řadu omezení, které jim znemožňují možnost použití ve speciálních aplikacích. Například u metody APS bylo zmíněno, že velikost vstupních částic nanášeného materiálu musí mít rozměry v určitém intervalu (10-100 μm), aby na povlaku nevznikaly nežádoucí struktury. Nové aplikace však požadují nanometrové tloušťky vrstev, což touto metodou nelze uskutečnit. V takovém případě je pro nanášení povlaku použita relativně nová metoda **suspenzního plazmatického nanášení**, zkráceně **SPS** (Suspension Plasma Spraying). Zásadním rozdílem mezi APS a SPS je forma surového materiálu. Zatímco u APS to jsou pevné částice, které do proudu plazmatu dopraví unášecí plyn, u SPS jsou základním materiálem submikronové částičky rozptýlené v rozpouštědle, například v etanolu. Tak vznikne suspenze sloužící zároveň jako přenosové médium při vstřikování do plazmatu. V horkém plazmatickém proudu dojde k vypaření rozpouštědla a jednotlivé částice se nataví a po dosažení povrchu komponenty vytvoří miniaturní „splaty“. Takto navrstvený materiál má nižší tepelnou vodivost než obyčejný APS povlak, a to právě kvůli jemnější struktuře. Na podobném principu pak pracuje další progresivní metoda, a to metoda **roztokového plazmatického nanášení**, zkráceně **SPPS** (Solution Precursor Plasma Spray) [3].

Poslední metodou, zde zmíněnou, je metoda **fyzikální depozice z plynné fáze pomocí plazmatického sprejování** neboli **PSPVD** (Plasma Spray Physical Vapor Deposition). Vychází z metody EB-PVD, proces probíhá za sníženého tlaku ve vakuové komoře, ovšem v tomto případě dochází k vypařování materiálu vlivem působení plazmatického paprsku. Výhodou metody je, že s ní lze povlakovat i plochy, které nejsou přímo v trajektorii pohybu molekul nanášeného materiálu, a je tedy vhodná pro aplikaci povlaků na velmi členité povrchy [3,4].

3.4 Složení termální bariéry

Termální bariéry jsou vícevrstevný systém, ve kterém každá vrstva plní určitou funkci. Jednotlivé vrstvy se vzájemně liší, a to zejména materiálovými vlastnostmi. V následujících odstavcích budou tyto vrstvy popsány podrobněji.

3.4.1 Keramický povlak (Top Coat)

Horní vrstva termálních bariér je velmi důležitou součástí celého systému, jelikož musí odolávat nejvyšším teplotám. To má za následek velmi přísná kritéria při výběru vhodného materiálu pro tuto aplikaci. Materiál tedy musí splňovat následující požadavky:

- **Vysoký bod tání** – pracuje při vysokých teplotách
- **Nízkou tepelnou vodivost** – musí co nejvíce snížit teplotu
- **Vysoký koeficient tepelné roztažnosti** – roztažnost by měla odpovídat koeficientům vazebného kovového povlaku i základního materiálu
- **Stabilní fázi** – změna fáze je při teplem cyklickém namáhání nežádoucí
- **Vysokou oxidační i korozní odolnost**

Těmto podmínkám v současné době nejvíce vyhovuje materiál YSZ (yttria-stabilized zirkonia), což je yttriem stabilizovaný oxid zirkoničitý. Yttrium zamezuje fázové transformaci zirkonia při tepelném cyklování a nedochází tak k nárůstu napětí v materiálu vlivem změny krystalické mřížky. Optimální koncentrace oxidu yttritího Y_2O_3 v oxidu zirkoničitém ZrO_2 byla experimentálně stanovena na 7 hmotnostních procent. Takovýto materiál se pak označuje jako 7YSZ. Menší koncentrace yttria by nemusely zabránit fázové transformaci, zatímco vyšší hodnoty by snižovaly mechanické vlastnosti, zejména pevnost [2].

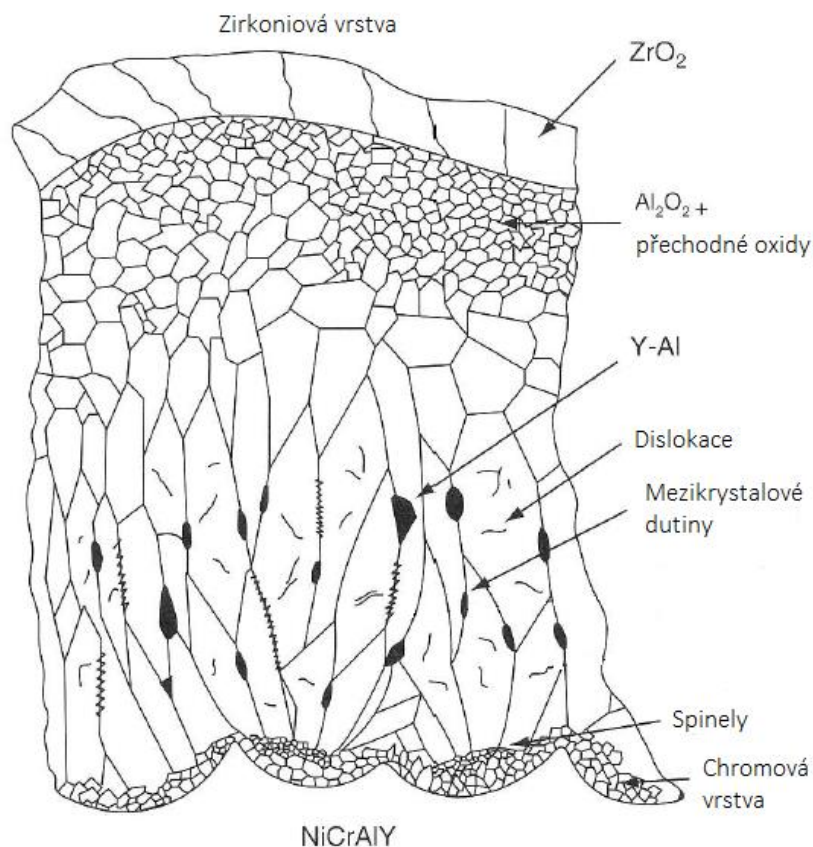
3.4.2 Kovový vazebný povlak (Bond Coat)

Tato vrstva je tvořena nejčastěji materiálem $MCrAlY$, přičemž M je nejčastěji Ni, Co+Ni nebo Fe. Primárně funguje jako zásobárna hliníku, ze kterého se postupně tvoří TGO vrstva, dále pak, jak již z názvu vyplývá, plní vazebnou funkci mezi keramickou vrstvou a základním materiálem [1].

3.4.3 Vrstva oxidu hlinitého (TGO)

Jedná se o vrstvu, která není přímo aplikována při nanášení, ale vzniká až vlivem difúzních procesů v Bond Coatu. Tato tzv. TGO (Thermally Grown Oxide) vrstva vzniká na rozhraní keramického a vazebného povlaku. Keramika YSZ je totiž schopna propouštět molekuly kyslíku, které se při kontaktu s vazebnou vrstvou slučují s molekulami hliníku. Hliník je tak z této vrstvy odčerpáván a vzniká nová tenká vrstva tvořená $\alpha-Al_2O_3$, která chrání základní materiál před kyslíkovou difúzí. Se zvyšující se teplotou prostředí roste i tempo růstu oxidu. Růst vrstvy a s tím již zmíněný pokles koncentrace hliníku v Bond Coatu má za následek postupnou

proměnu složení TGO vrstvy, viz obr. 7. Zrna materiálu u hranic s keramikou jsou jemná a pravidelná, zatímco zrna blíže vazebnému povlaku jsou velká a silně protáhlá s precipitáty na hranicích zrn. TGO je velmi tenká vrstva, většinou se hodnoty její tloušťky pohybují pod $10\mu\text{m}$ [1,2].



Obr. 7 Složení TGO vrstvy, převzato a upraveno z (2)

4 Analýza problému

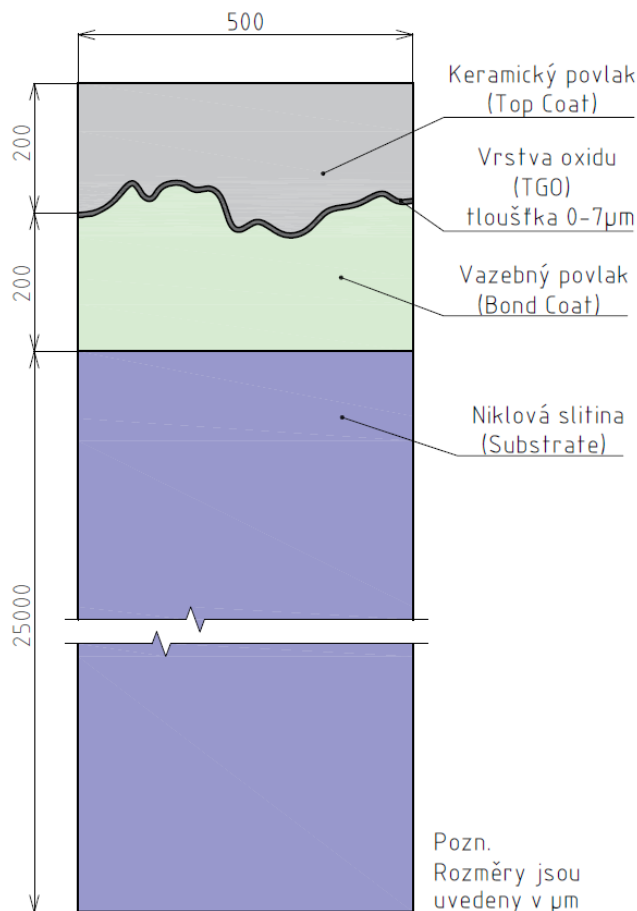
Řešený problém termálních bariér lze charakterizovat jako přímý problém, tedy jsou známy všechny potřebné vstupy a k nim jsou postupně dohledávány výstupy. Při tvorbě výpočtového modelu byly jako vstupy zadány rozměry modelu a geometrie rozhraní vrstev, materiálové charakteristiky, okrajové podmínky a způsob zatížení. Výstupem pak byla deformačně napěťová odezva v jednotlivých vrstvách termální bariéry. Při řešení byly uvažovány velké deformace.

5 Výpočtové modelování

Tato kapitola obsahuje popis tvorby výpočtového modelu termální bariéry. Analýzy byly prováděny pro dva druhy vazebného povlaku. Na každém z těchto povlaků pak byly provedeny tři řezy a na každém řezu byla uvažována TGO vrstva o tloušťce 0, 1, 3, 5 a 7 mikrometrů. Celkem tedy bylo vytvořeno 30 modelů, které se lišily pouze geometrií rozhraní mezi Top Coat a Bond Coat. Výpočtové modely byly vytvořeny na základě dat geometrie povrchu z měření termální bariéry vytvořené metodou APS, tedy metodou plazmatického nanášení.

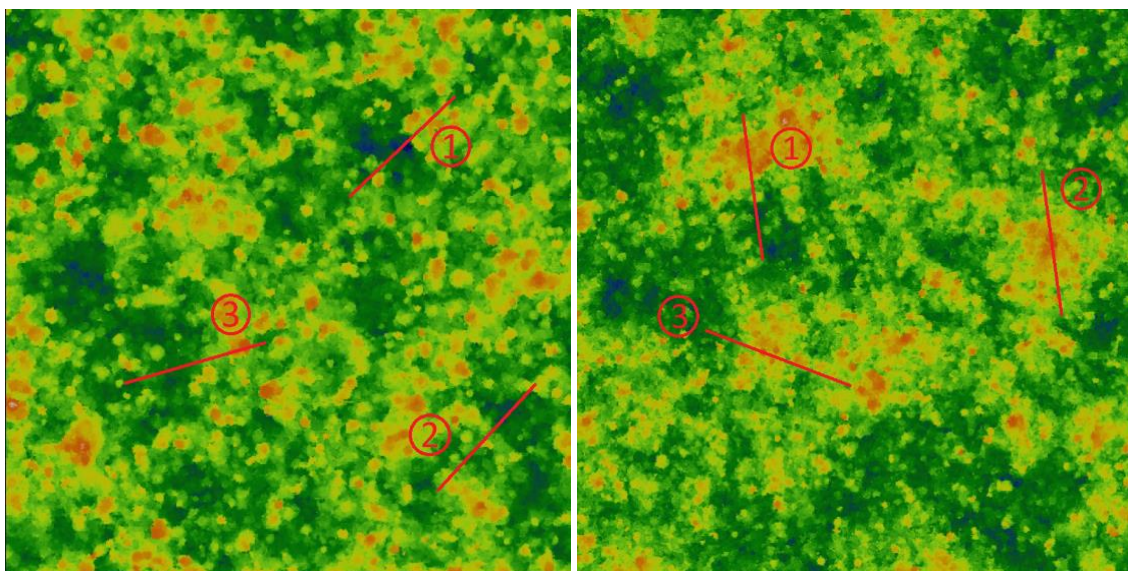
5.1 Model geometrie termální bariéry

Výpočtový dvourozměrný model termální bariéry byl sestaven ze čtyř vrstev, přičemž každou vrstvu tvořil materiál s různými vlastnostmi. Největší část modelu byla tvořena základním materiálem čili substrátem. Výška této vrstvy byla stanovena na 25 mm. Tloušťka vrstev Top Coat a Bond Coat byla shodně 200 μm . Tloušťka TGO vrstvy byla značně nepravidelná, a proto její rozměry byly popsány referenčními hodnotami 0, 1, 3, 5 a 7 μm . Šířka celého modelu termální bariéry byla 500 μm .



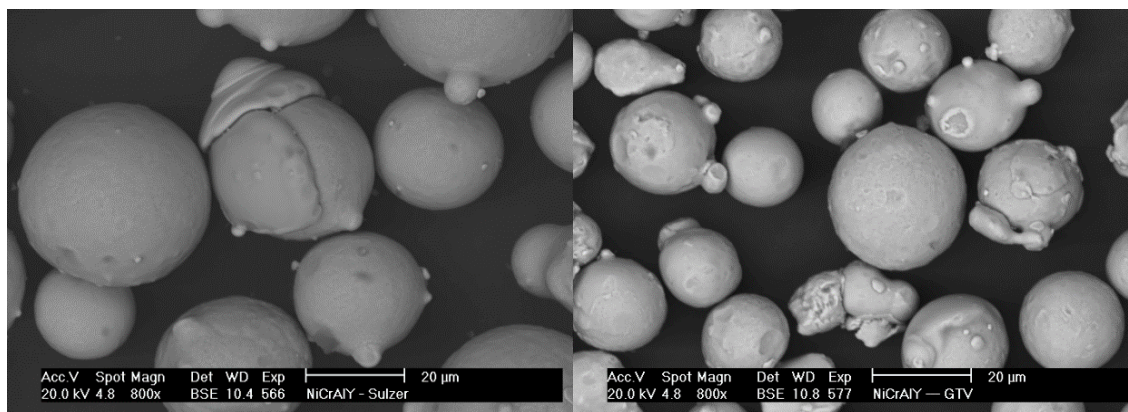
Obr. 8 Model geometrie termální bariéry

Rozhraní Top Coat – Bond Coat bylo vytvořeno na základě dat naměřených vzorků termální bariéry. Data z měření výškových polí povrchu byla zpracována ve speciálním softwaru Gwyddion, což je open-source program sloužící k analýze výškových polí získaných technikou SPM (Scanning Probe Microscopy) [5]. Z naměřených dat byly odstraněny chybové hodnoty vzniklé při měření. Pro každý z použitých materiálů byly vytvořeny 3 řezy povrchem (obr. 9) a souřadnice bodů rozhraní vzniklých těmito řezy byly dále použity při tvorbě modelu.



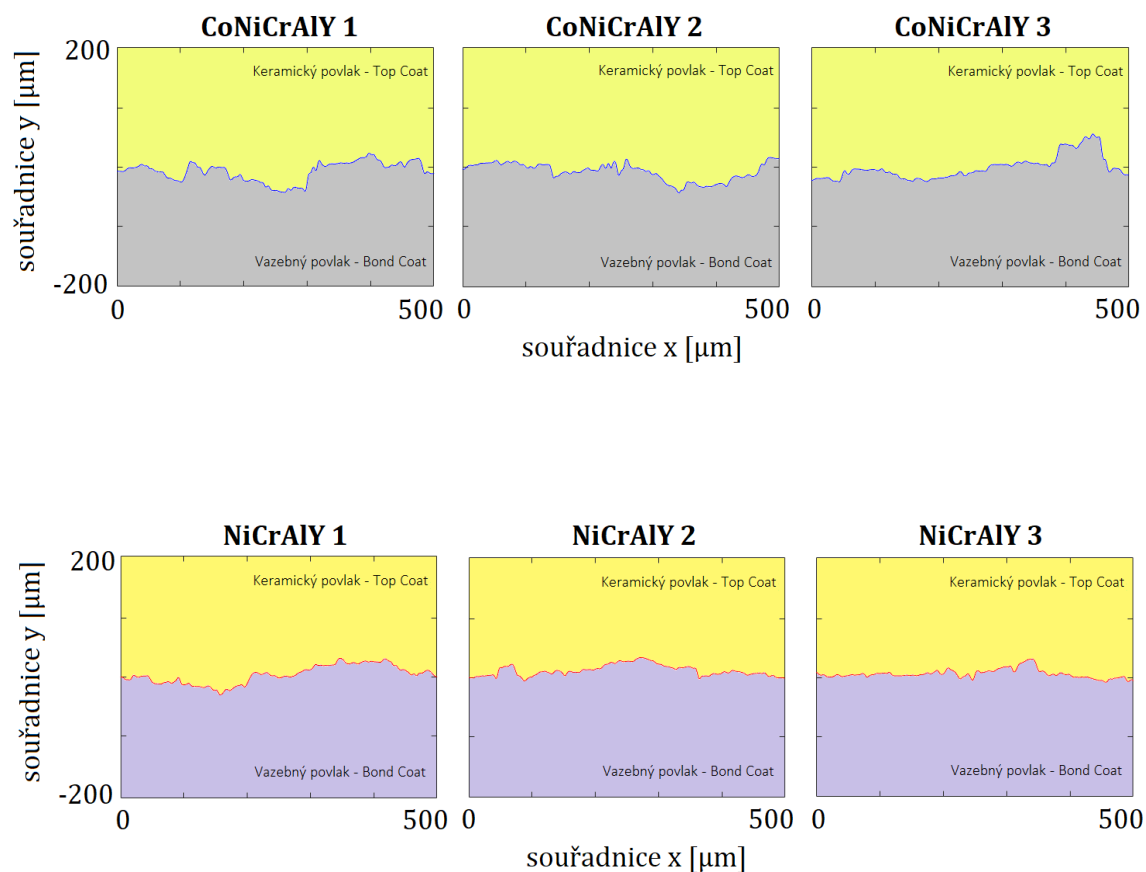
Obr. 9 Znárodnění řezů materiálem CoNiCrAlY (vlevo) a NiCrAlY (vpravo)

V souvislosti s geometrií modelu, zejména s rozhraním mezi keramikou a vazebným povlakem (rozhraní Top Coat – Bond Coat) je vhodné zmínit, jak ovlivňuje volba materiálu drsnost povrchu. Obr. 10 ukazuje částice NiCrAlY a CoNiCrAlY před nanesením na základní materiál metodou APS. Dle velikosti částic lze předpokládat, že menší částice budou tvořit povrch s menší drsností. Tento předpoklad potvrzuje i tabulka 1 obsahující hodnoty drsností rozhraní použitých ve výpočtových modelech.



Obr. 10 Porovnání velikostí částic CoNiCrAlY (vlevo) a NiCrAlY (vpravo)

Celkem bylo pro účely bakalářské práce vytvořeno třicet různých modelů, které se od sebe lišily geometrií rozhraní Top Coat – Bond Coat a tloušťkou TGO vrstvy. Na obr. 11 lze vidět rozhraní vrstev bez TGO.

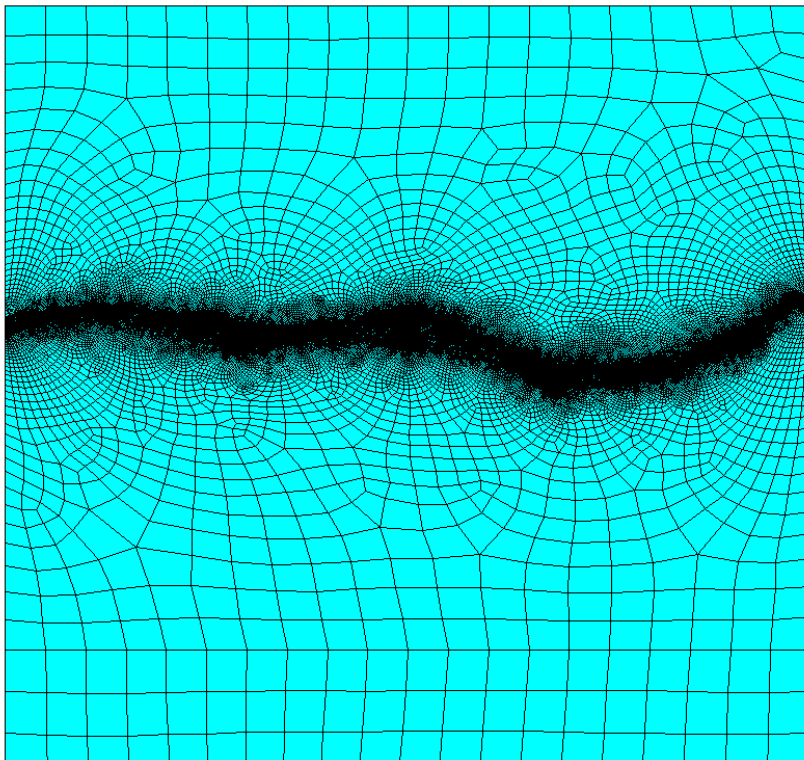


Obr. 11 Geometrie rozhraní – materiál CoNiCrAlY (nahore) a NiCrAlY (dole)

Tabulka 1 – Drsnost povrchu R_q [μm] jednotlivých rozhraní

	Řez 1	Řez 2	Řez 3
CoNiCrAlY	16,484	14,748	20,051
NiCrAlY	15,532	9,408	7,563

Diskretizace modelu byla provedena prvkem *PLANE 183*, což je kvadratický rovinný prvek s 8 či 6 uzly, v každém uzlu jsou definovány dva stupně volnosti, a to posuvy [6]. Kvůli členitosti rozhraní keramiky a vazebného povlaku byla síť značně nepravidelná a jednotlivé prvky měly velikosti od desetin až po stovky mikrometrů. Nejmenších rozměrů dosahovaly prvky na rozhraní Top Coat – Bond Coat. V případě modelů termální bariéry s TGO vrstvou to pak bylo rozhraní Top Coat – TGO a TGO – Bond Coat. U modelů bez TGO bylo rozhraní rozděleno na prvky o velikosti $0.45\ \mu\text{m}$, u modelů s TGO vrstvou byly použity prvky o velikosti $0.5\ \mu\text{m}$.



Obr. 12 Ukázka konečnoprvkové sítě modelu termální bariéry

5.2 Model materiálových vlastností jednotlivých vrstev

- Jako materiál substrátu byla uvažována niklová superslitina Inconel 713LC, která se používá zejména v tepelně velmi namáhaných aplikacích, jako jsou letecké motory či plynové turbíny.
- TGO vrstva je ve skutečnosti velmi komplexní směs různých prvků, pro zdejší účely však byly použity materiálové charakteristiky oxidu hlinitého
- keramický povlak je modelován vlastnostmi oxidu zirkoničitého, který je pro lepší vlastnosti stabilizován yttriem
- pro vazebný povlak byly v práci uvažovány dva materiály, a to CoNiCrAlY a NiCrAlY. Jelikož jsou jejich materiálové charakteristiky podobné a větší vliv na chování těchto dvou materiálů při zatěžování má velikost jejich prášků, byly při výpočtu použity materiálové charakteristiky CoNiCrAlY i pro model termálních bariér s vazebnou vrstvou z NiCrAlY.

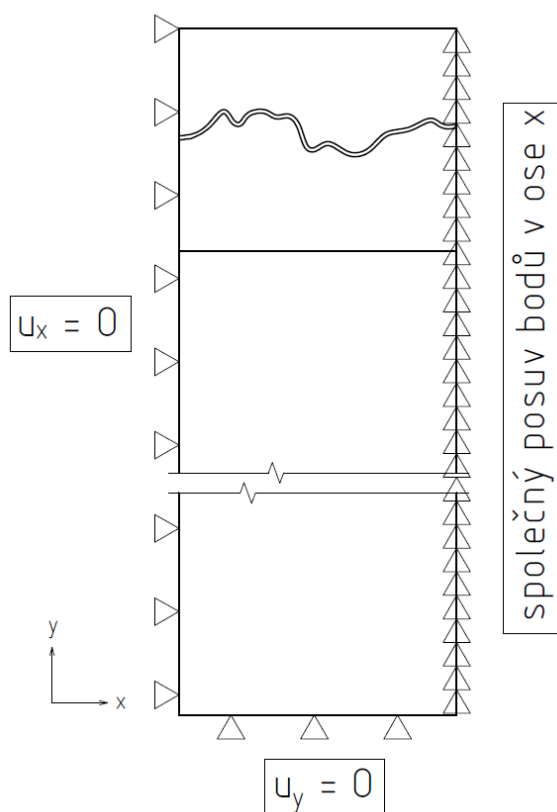
Ucelenější přehled o vlastnostech použitých materiálů poskytuje tabulka 2. Materiály substrátu, Top Coatu a TGO byly uvažovány jako lineárně elastické, homogenní a izotropní, materiál Bond Coatu byl uvažován jako ideálně plastický.

Tabulka 2 - Souhrn materiálových vlastností, převzato a upraveno z [7]

	Teplota t (°C)	Youngův modul E (GPa)	Poissonův poměr ν (–)	Teplotní součinitel $\alpha \times 10^{-6}$ délkové roztažnosti (°C ⁻¹)	Mez kluzu σ_y (MPa)
Substrát (Inconel 713LC)	21	190	0.3	10	–
	540	190	0.3	15.8	–
	650	185	0.3	16	–
	760	175	0.3	16.2	–
	870	160	0.3	16.7	–
	980	130	0.3	17	–
Bond coat (MCrAlY)	20	152	0.32	12.4	780
Vazebný povlak	220	151	0.33	13	720
	420	145	0.33	13.9	620
	620	132	0.34	15	510
	820	109	0.35	16.2	50
	1020	72	0.35	17.7	10
TGO (Al ₂ O ₃)	20	380	0.27	5.1	–
	220	369	0.27	5.9	–
	420	361	0.27	6.7	–
	620	352	0.27	7.6	–
	820	336	0.27	8.4	–
	1020	309	0.27	9.2	–
Top coat (YSZ)	20	17.5	0.2	9.7	–
Keramický povlak	220	16.3	0.2	9.7	–
	420	15.2	0.2	9.7	–
	620	14.0	0.2	9.8	–
	820	12.9	0.2	10	–
	1020	11.7	0.2	10.4	–

5.3 Model okrajových podmínek

Pro model termální bariéry byla použita podmínka rovinné deformace. Levé hraně modelu byla předepsána podmínka zamezení posuvu v ose x , tedy $u_x = 0$. Spodní hraně byl předepsán nulový posuv v ose y , tedy $u_y = 0$. Pravé hraně modelu, lépe řečeno do všech uzlů tvořících pravou hranu, byla předepsána podmínka stejného posuvu (coupling) ve směru x . Tato podmínka je velice důležitá, jelikož model tvoří více vrstev s různými materiálovými charakteristikami a tím pádem různými koeficienty tepelné roztažnosti, a proto by při ochlazování docházelo k odlišným posuvům v jednotlivých vrstvách.



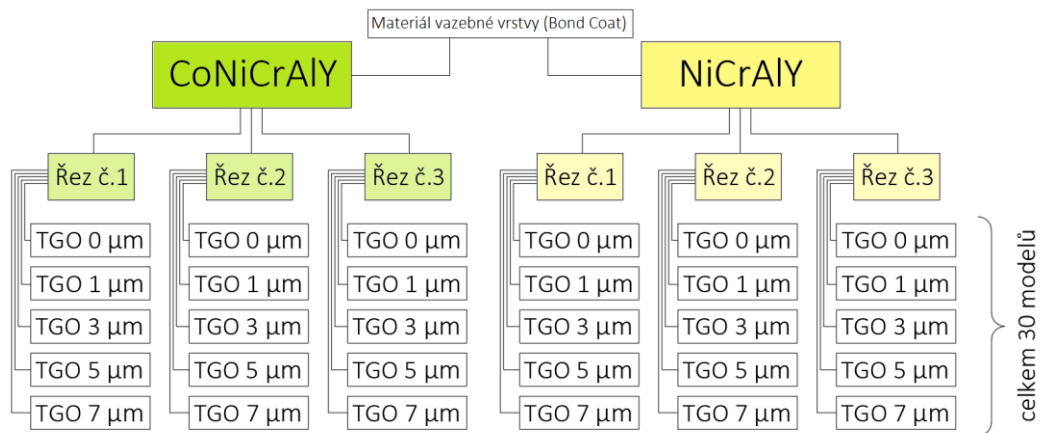
Obr. 13 Model okrajových podmínek

5.4 Model zatížení

Model teplotního zatížení byl navržen podle reálného cyklického způsobu zatěžování termálních bariér se zaměřením na část cyklu, ve kterém dochází k ochlazování z provozní teploty 1000 °C na pokojovou teplotu 20 °C. Vznikající napětí v jednotlivých vrstvách je důsledkem odlišných teplotních součinitelů délkové roztažnosti v jednotlivých vrstvách [8].

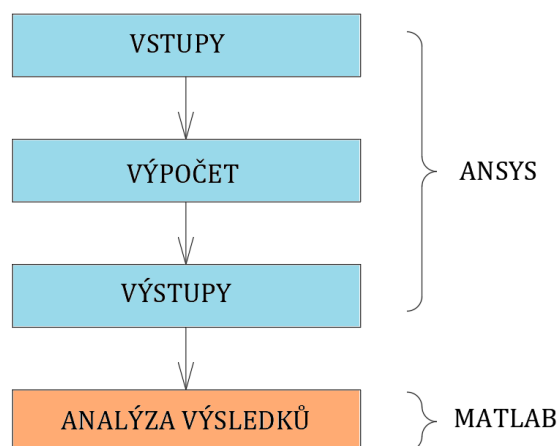
6 Realizace řešení

Jelikož se bakalářská práce zabývala pouze přímým problémem, nebyl samotný algoritmus řešení složitý. Vstupem do algoritmu byl model geometrie termální bariéry, model materiálových vlastností, model použitých okrajových podmínek a model teplotního zatížení. Celkem bylo vytvořeno třicet různých geometrií modelu termální bariéry (obr. 14), přičemž geometrie rozhraní a materiálové vlastnosti Bond Coatu byly vstupy, kterými se od sebe jednotlivé modely lišily.



Obr. 14 Přehled řešených variant

Výstupem byly napěťové odezvy v jednotlivých vrstvách systému termálních bariér. Data následně zpracována a studována v programu Matlab.



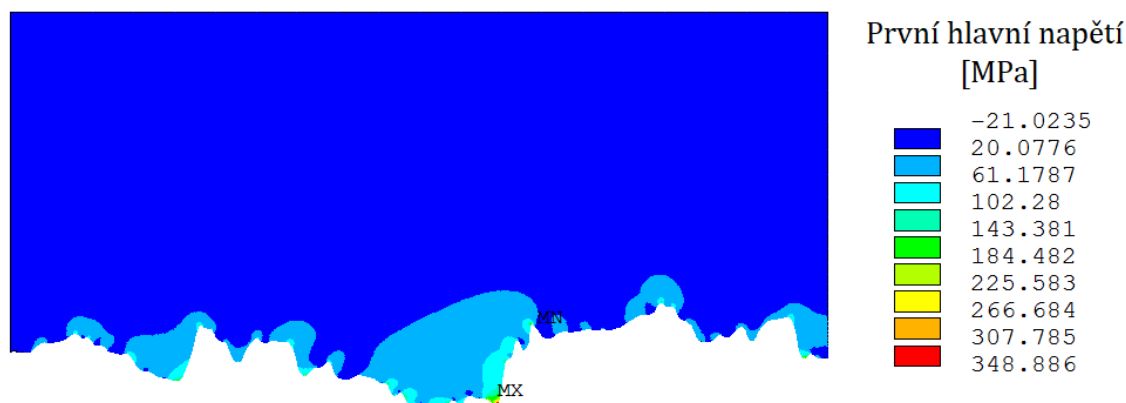
Obr. 15 Schéma algoritmu řešení

7 Prezentace a analýza výsledků

Výstupem z programu Ansys byla napěťová pole v jednotlivých vrstvách termální bariéry. Tato práce se zaměřovala primárně na studium napěťových polí v keramické vrstvě, tudíž všechny zde prezentované výsledky se budou vztahovat na tuto část termální bariéry.

7.1 Analýza napěťového pole v keramické vrstvě

Obr. 16 znázorňuje rozložení napětí v keramické vrstvě TBC. Lze vypořadovat, že ve větší části vrstvy vzniká pouze velmi malé napětí v řádu jednotek, maximálně desítek megapascalů, a to jak v tahové, tak i tlakové oblasti. Důležitější je však pohled do blízkosti rozhraní, kde vznikají mnohem větší napětí, která mohou za určitých podmínek způsobit poškození vrstvy, například delaminaci. Kritickými místy budou pak zejména údolí, tedy místa, kde je keramika obklopena kovovým vazebným povlakem. Geometrie rozhraní modelu na obr. 16 odpovídá řezu 1 v materiálu CoNiCrAlY bez TGO vrstvy. Obdobné napěťové odezvy však vykazovaly všechny vytvořené modely.



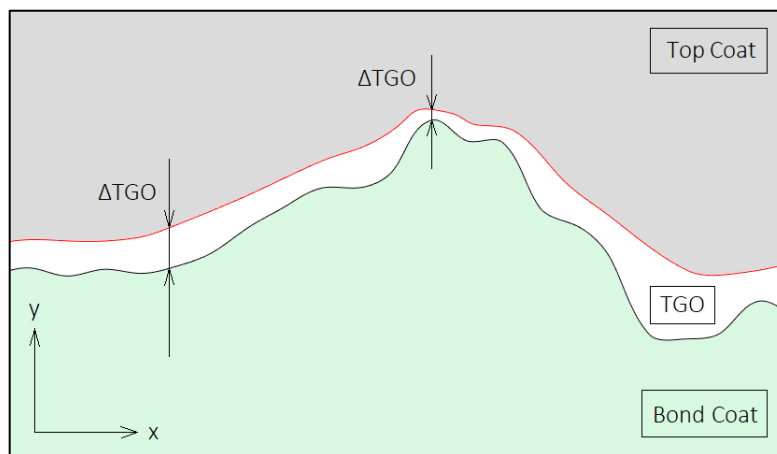
Obr. 16 Ukázka rozložení napětí v keramické vrstvě

7.2 Analýza vlivu TGO vrstvy na napěťová pole v TBC systému

Pro podrobnější studium výsledných napětí by použit program Matlab. Jako vstupy byly použity souřadnice a napětí jednotlivých uzlů rozhraní Top Coat – Bond Coat, respektive Top Coat - TGO. Zkoumanými parametry, které by mohly mít vliv na vznik a velikost napětí v materiálu byly určeny:

Tloušťka TGO vrstvy

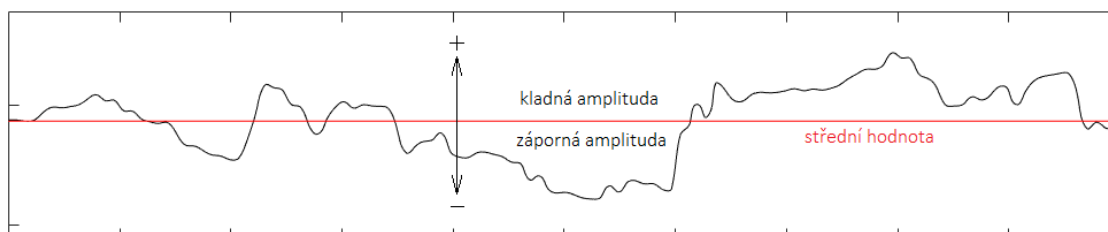
- Napětí v systému termální bariéry je jednoznačně ovlivněno velikostí hliníkové oxidační vrstvy, tudíž tento parametr musí být uvažován. Tloušťka značně nepravidelné vrstvy se ovšem měří značně obtížně a nejde jednoznačně definovat. V této práci tak pro zjednodušení byla brána jako tloušťka vrstvy vertikální vzdálenost bodů se stejnou x-ovou souřadnicí, přičemž horní bod byl na rozhraní Top Coat – TGO a spodní bod na rozhraní TGO – Bond Coat.



Obr. 17 Měření tloušťky TGO vrstvy

Amplituda

- Amplitudou je zde myšlena odchylka od střední hodnoty profilu rozhraní. Střední hodnotu profilu vypočítáme sečtením ypsilonových souřadnic bodů rozhraní a následným vydělením počtem bodů. Poté porovnááme vzdálenost ypsilonových souřadnic jednotlivých bodů od této střední hodnoty. Pokud je amplituda kladná, je daný bod nad střední hodnotou, naopak pokud je amplituda záporná, znamená to, že bod leží pod střední hodnotou.



Obr. 18 Měření amplitudy

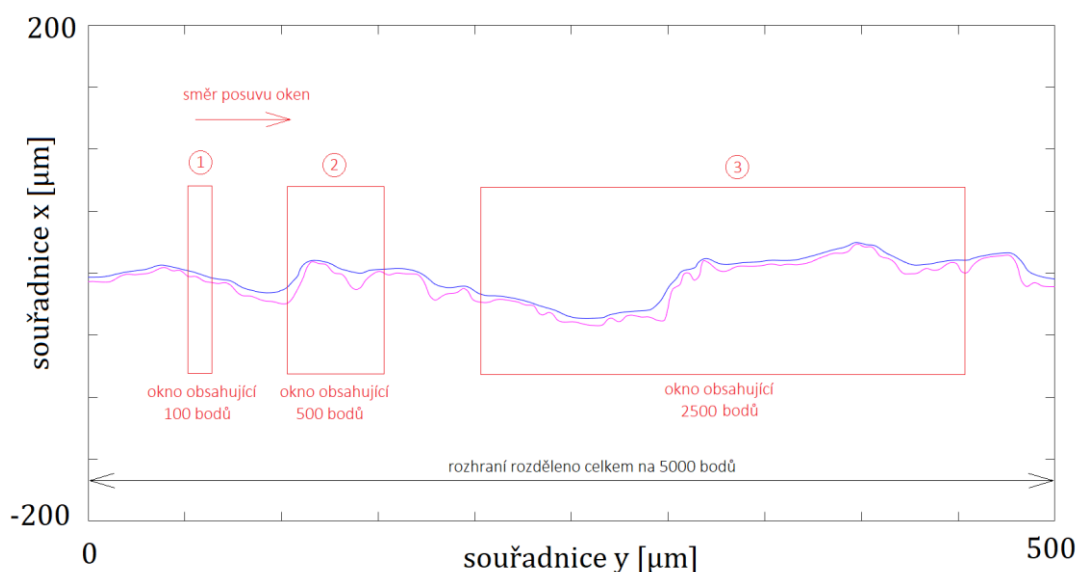
Drsnost R_q

- Pro stanovení drsnosti povrchu byl použit parametr R_q , což je směrodatná odchylka od střední hodnoty. Vypočítá se podle následujícího vzorce

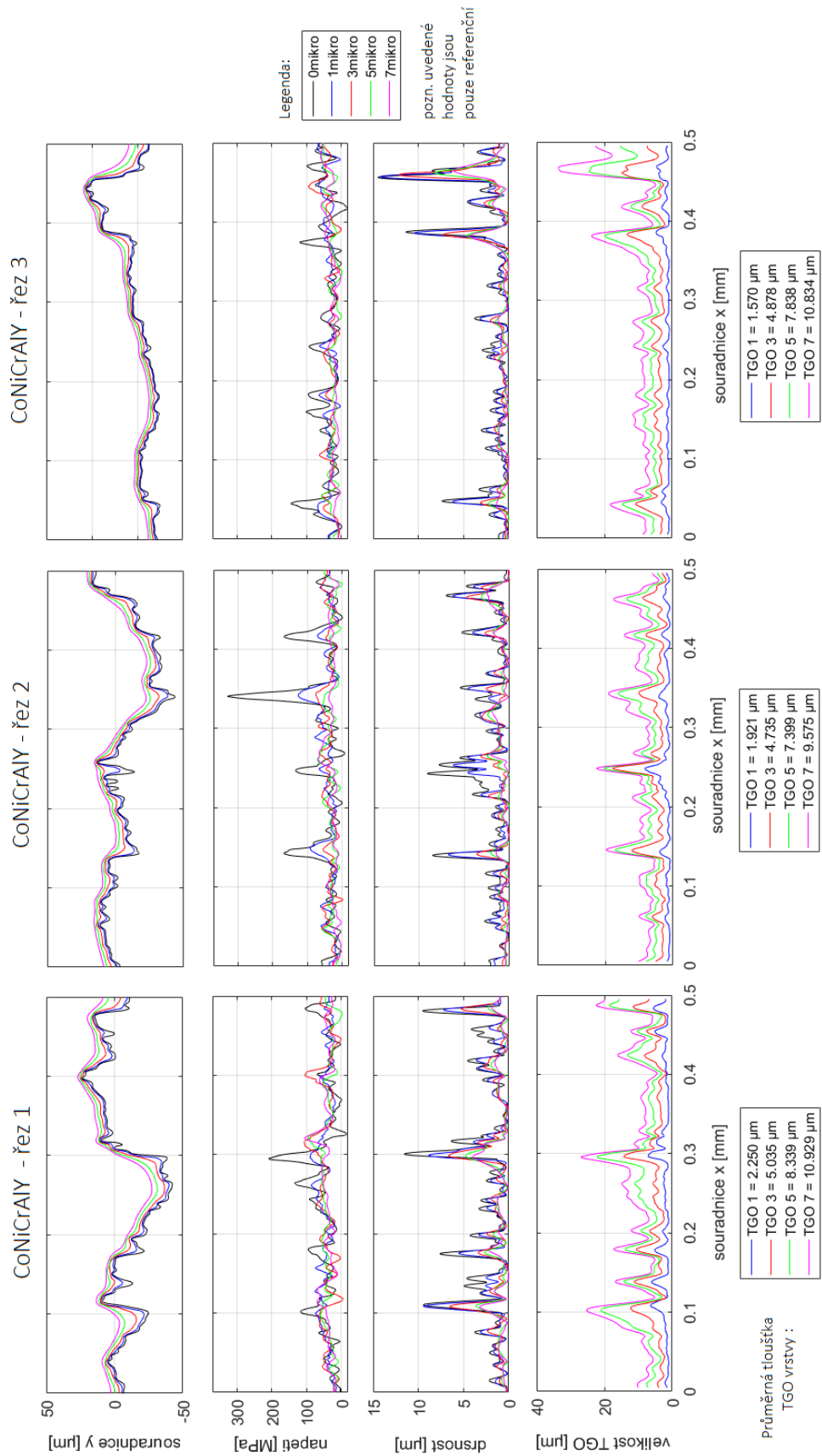
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{střední})^2} \quad (5.1)$$

kde R_q je drsnost profilu, N je počet bodů rozhraní, y_i souřadnice bodů v ose y a $y_{střední}$ je střední hodnota profilu.

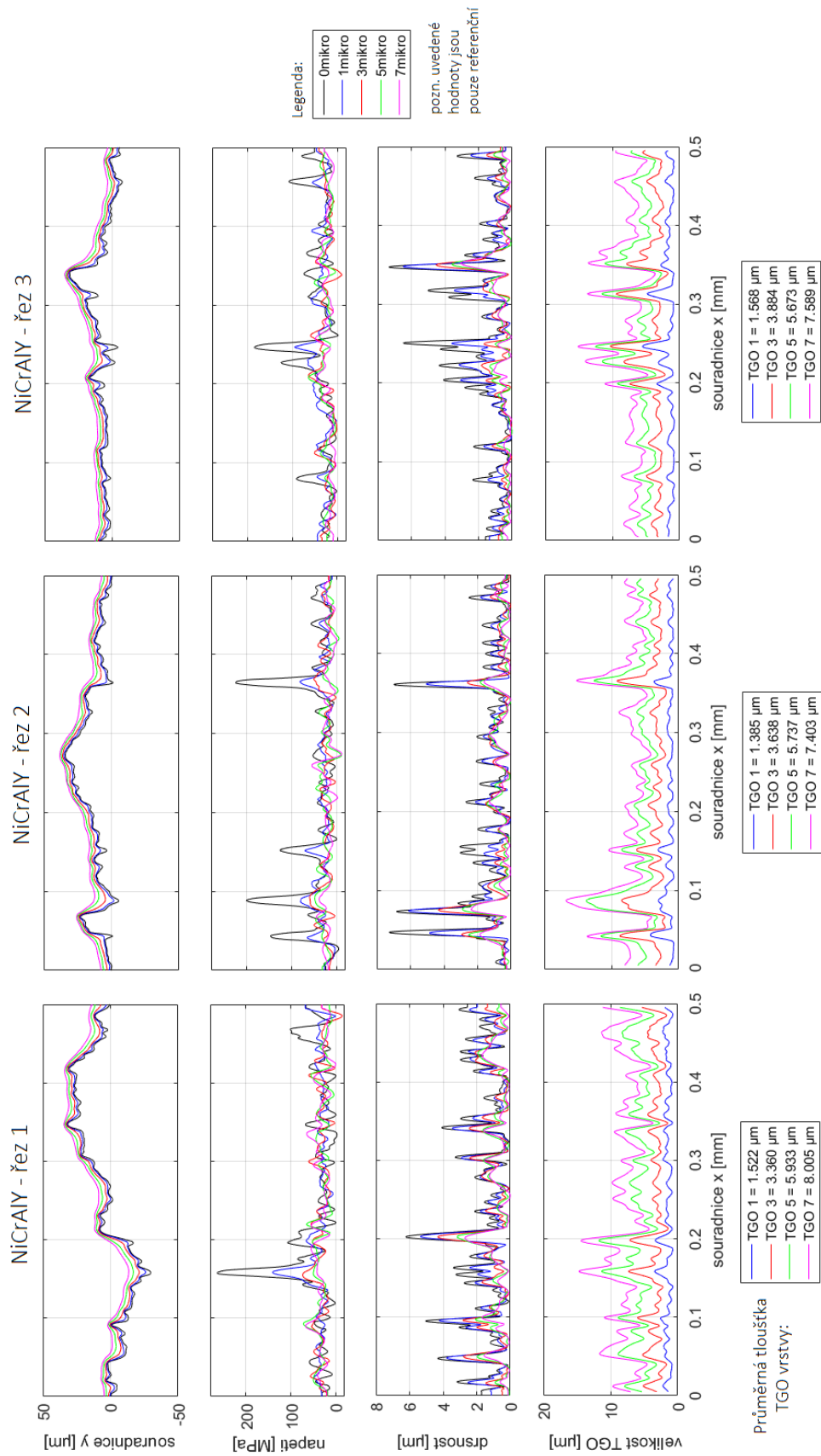
K získání těchto parametrů byla využita tzv. **metoda oken**. Princip spočívá ve vytvoření virtuálního okna, které obsahuje pouze určitou část ze všech zkoumaných hodnot výsledků. V tomto okně se vyhodnotí požadované parametry, tedy průměrné napětí, průměrná drsnost, průměrná amplituda a průměrná tloušťka TGO. Po vyhodnocení těchto lokálních parametrů dojde k jejich zápisu do prázdného vektoru. Okno se poté pomocí dalšího cyklu posune o jednu hodnotu dále, a vznikne tak okno s novými daty, kde proběhne opět stejný proces. Celý děj trvá až do doby, než okno dojde na konec zkoumaných hodnot a zapíše poslední výsledky lokálních parametrů do vektoru. Z něj tak vznikne soubor nových dat, která se poté dají dále zkoumat. Přínosem této metody je, že lze měnit velikost okna, čímž dostaneme více informací o chování zkoumaného problému. Pokud se zvolí šířka okna malá, znamená to, že okno vyhodnocuje vždy pouze malou část z celkového počtu bodů. V takovém případě tedy je zkoumán vliv drsnosti či mikrodrsnosti povrchu na napětí v materiálu. Pokud se však velikost okna zvolí velká, znamená to, že zkoumaným fenoménem je vliv vlnitosti rozhraní na napětí, jelikož ve velkém okně zcela zaniká vliv drsnosti povrchu.



Obr. 19 Schéma metody „oken“



Obr. 20 Průběhy napětí, drsností a tloušťky TGO - materiál CoNiCrAlY



Obr. 21 Průběhy napětí, drsností a tloušťky TGO - materiál NiCrAlY

Ze zvolených parametrů byly sestaveny grafy znázorňující závislost napětí, drsnosti a tloušťky TGO vrstvy na x-ové souřadnici, což nám říká, jak se dané veličiny mění v průběhu rozhraní. Pro materiál CoNiCrAlY jsou průběhy zmíněných veličin znázorněny na obr. 20 a pro materiál NiCrAlY na obr.21.

Po důkladné analýze grafů bylo zjištěno, že největší napětí vznikají v údolích, jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole. Z toho vyplývá, že ideálně by mělo být rozhraní co nejhladší, aby se zabránilo iniciaci napěťových špiček. Proti tomu však stojí fakt, že určitá členitost povrchu je nutná pro dostatečné uchycení povlaku při nanášení vrstvy.

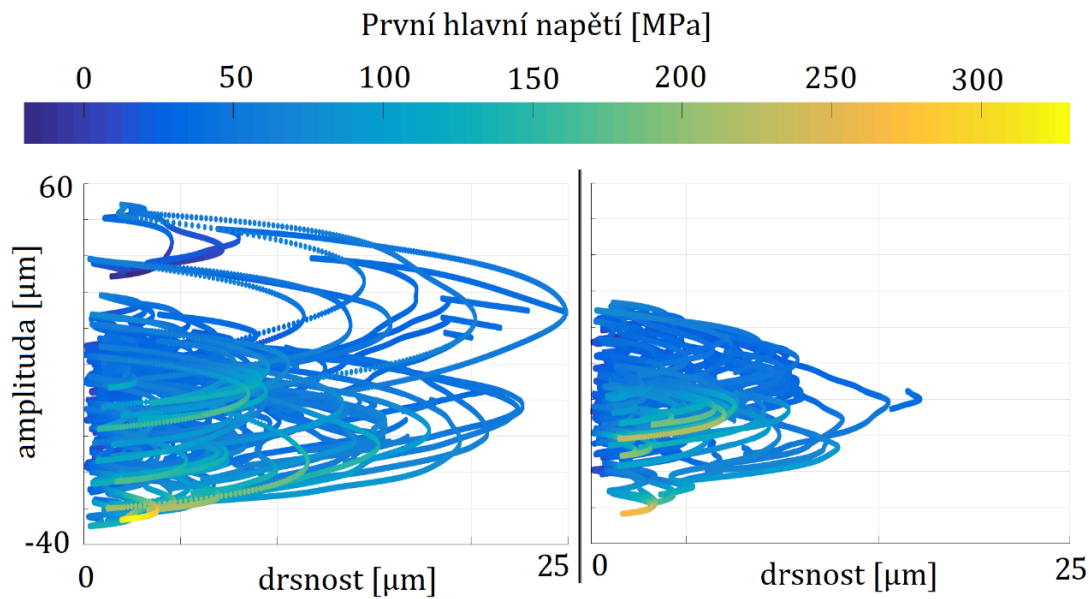
Porovnáme-li velikosti napětí v závislosti na tloušťce vrstvy TGO, pak bylo nejvyšších hodnot prvního hlavního napětí dosaženo na modelech bez této vrstvy. V takovém případě je totiž rozhraní keramiky a vazebného povlaku nejčlenitější, a tudíž nejnáchylnější k vzniku trhlin a následnému poškození. S narůstající TGO vrstvou se rozhraní postupně vyrovnává a napětí v místech údolí klesá.

Na ostatních místech rozhraní mimo údolí se závislost napětí na tloušťce vrstvy takto jednoduše popsat nedá, průběhy napětí při různých tloušťkách TGO budou pravděpodobně ovlivněny i jinými parametry, které v této práci nebyly studovány.

7.3 Porovnání modelů s různými vazebnými materiály

Trochu odlišným způsobem vyhodnocení výsledků bylo sestavení trojrozměrných grafů. Na osu x byly vyneseny drsnosti, na osu y amplitudy. Na třetí osu, tedy osu z, byly zaznamenány velikosti prvního hlavního napětí, které jsou v uvedených grafech reprezentovány barevnou škálou. Data byla získána opět pomocí metody oken a v grafech jsou vyneseny hodnoty pro různé velikosti oken, od velkých (zahrnují vliv vlnitosti), až po velmi malá okna (zohledňují i velmi jemné členění povrchu). V této kapitole bylo vytvořeno celkem pět grafů, tzn. pro každou tloušťku TGO jeden. V každém grafu je vždy porovnán model obsahující materiál CoNiCrAlY s modelem obsahující materiál NiCrAlY.

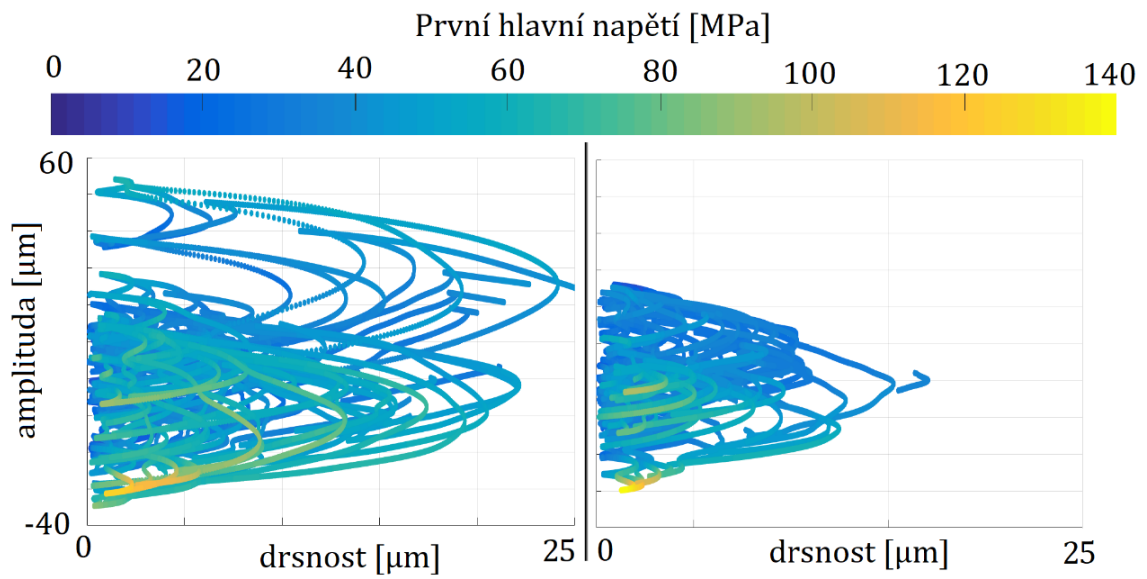
Porovnáním drsností a amplitud obou materiálů, viz obr. 22, se ukazuje rozdíl mezi těmito materiály. Jak již bylo diskutováno v kapitole Model geometrie, NiCrAlY prášek je jemnější než CoNiCrAlY, tudíž povrch tvořený prvním zmiňovaným vykazuje menší drsnost povrchu. Maximální drsnost, respektive spíše už vlnitost, u NiCrAlY je přibližně 17 μm , zatímco u CoNiCrAlY hodnoty dosahují až 27 μm . Stejně tak amplituda, tedy odchylka od střední hodnoty profilu rozhraní je větší u materiálu CoNiCrAlY, což značí větší členitost povrchu.



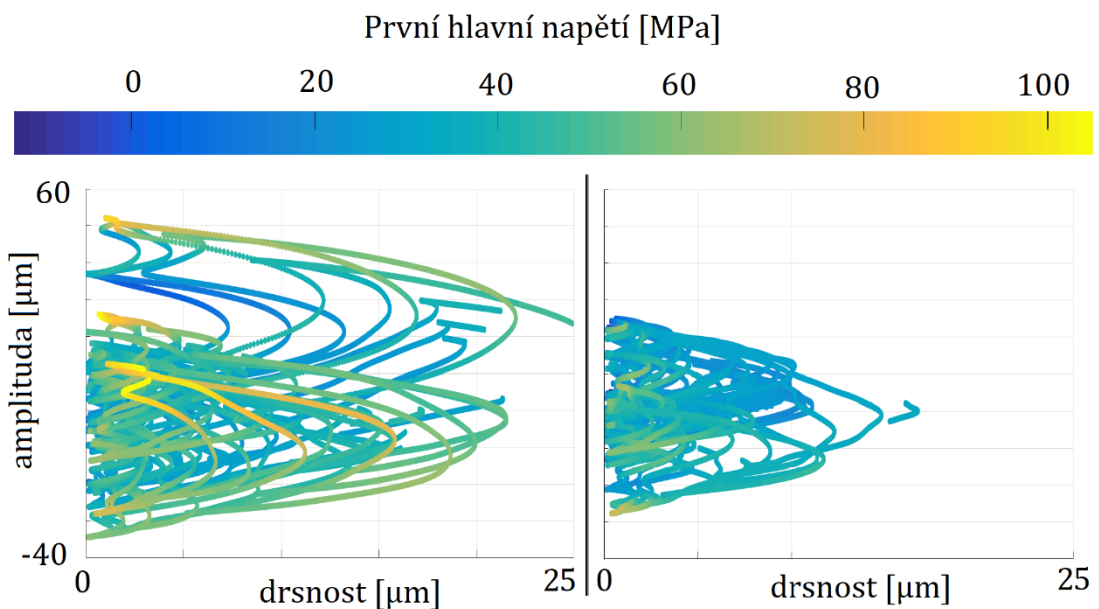
Obr. 22 Závislost drsnost-amplituda-napětí, model bez TGO, materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)

I u těchto grafů může být sledováno napětí v závislosti na geometrických parametrech rozhraní. Maximální napětí, a to u obou studovaných materiálů, vzniká v záporných amplitudách při nízkých drsnostech. Opět se tedy potvrzuje, že kritickými místy jsou údolí, tedy místa, kde keramiku obklopuje kovový vazebný povlak. Směrem ke kladným amplitudám napětí klesá, ve kterých dochází dokonce k záporným napětím, tedy tlakovým.

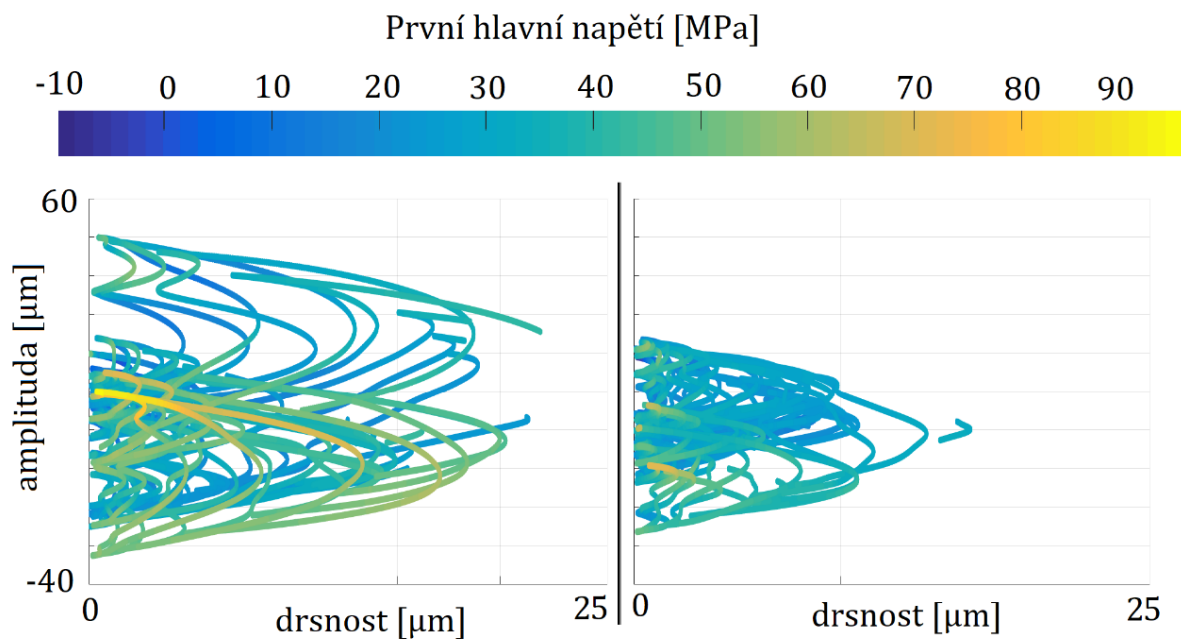
Podobné výsledky jako model bez TGO vrstvy vykazuje i model s vrstvou TGO 1 μm , tedy napětí jsou největší při záporných amplitudách. Od dalších referenčních tloušťek TGO se však situace postupně mění. Vlivem růstu vrstvy dochází k vyhlazování geometrie rozhraní a nedá se tak již jednoznačně určit, ve kterých místech budou vznikat největší napětí. Zvláště patrné je to u materiálu NiCrAlY, kde se maxima napětí objevují jak v kladné, tak záporné amplitudě, viz. obr 23 – 26.



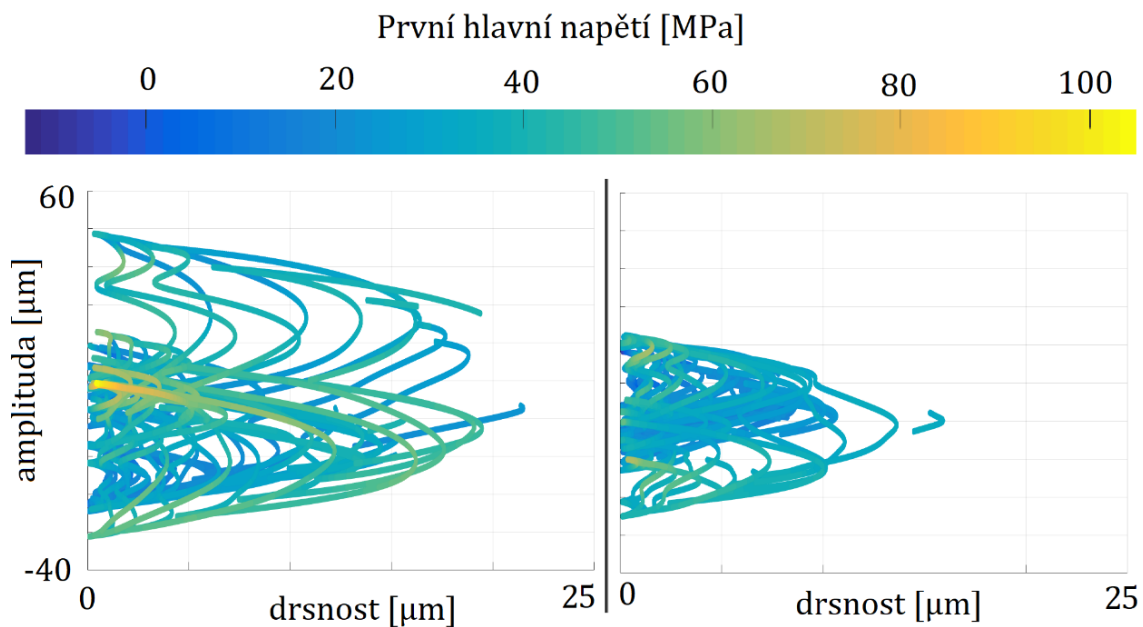
Obr. 23 Závislost drsnost-amplituda-napětí, TGO 1 μm ,
materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)



Obr. 24 Závislost drsnost-amplituda-napětí, TGO 3 μm ,
materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)



Obr. 25 Závislost drsnost-amplituda-napětí, TGO 5 μm , materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)



Obr. 26 Závislost drsnost-amplituda-napětí, TGO 7 μm , materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala studiem napěťových stavů v termálních bariérách, zejména tedy ve vrchní keramické vrstvě. V programu Ansys bylo vytvořeno třicet výpočtových modelů termální bariéry, které se od sebe vzájemně lišily materiálem vazebného povlaku, geometrií rozhraní a tloušťkou vrstvy TGO, přičemž geometrie rozhraní mezi keramickou vrstvou a vazebným povlakem byla vytvořena na základě dat naměřených na reálných vzorcích. Model teplotního zatížení byl navržen tak, aby odpovídal ochlazování termální bariéry z provozní teploty na teplotu pokojovou. Následně byla studována napěťová odezva v materiálu.

V práci bylo popsáno rozložení prvního hlavního napětí v keramické vrstvě. Bylo zjištěno, že největší napětí vznikají na rozhraní mezi keramikou a vazebným povlakem, respektive TGO vrstvou. Tato maxima se nacházejí v tzv. údolích, tedy v místech, kde je keramický povlak obklopen kovovým vazebným povlakem. S narůstající TGO vrstvou dochází k vyrovnávání povrchu a ke snižování prvního hlavního napětí.

Při porovnání modelů obsahující materiál CoNiCrAlY s modely obsahující materiál NiCrAlY bylo zjištěno, že drsnost rozhraní u prvně zmíněného materiálu je vyšší, a to pravděpodobně vlivem větších částic používaných při plazmatickém nanášení. To znamená, že z hlediska napěťových stavů ve vrstvách termální bariéry je lepší použít materiál s nižší drsností, tedy NiCrAlY, neboť napětí vznikající v systému TBC tvořené tímto materiálem budou mít nižší hodnoty.

Jelikož v této práci byl vytvořen rovinný model termální bariéry, nese to sebou i určitá omezení. Na tuto práci se tak dá navázat vytvořením prostorového modelu termální bariéry, přičemž analýza napětí v tomto modelu by mohla odhalit další souvislosti a vztahy mezi geometrií rozhraní a napětím v systému TBC.

Použité zdroje

- [1] CLARKE, David R., OECHSNER, Matthias a PADTURE, Nitin P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*. 2012, Sv. 37, 10.
- [2] BOSE, Sudhangshu. *High temperature coatings*. Amsterdam : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007. str. 299. ISBN 978-0-7506-8252-7.
- [3] SAMPATH, Sanjay, a další. Processing science of advanced thermal-barrier systems. *MRS Bulletin*. 2012, Sv. 37, 10.
- [4] von NIESSEN, Konstantin a GINDRAT, Marco. Plasma Spray-PVD: A New Thermal Spray Process to Deposit Out of the Vapor Phase. *Journal of Thermal Spray Technology*. 20, 2011, Sv. 4, stránky 736-743.
- [5] NEČAS, David a K LAPETEK, Petr. Gwyddion. [Online] Český metrologický institut. <http://gwyddion.net/>.
- [6] PLANE 183. *SHARCNET*. [Online] 2016. https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_PLANE183.html.
- [7] SKALKA, Petr, a další. Stability of plasma-sprayed thermal barrier coatings: The role of the waviness of the bond coat and the thickness of the thermally grown oxide layer. *Surface and Coatings Technology*. 2015, 274, stránky 26-36.
- [8] BÄKER, M. Influence of material models on the stress state in thermal barrier coating simulations. *Surface and Coatings Technology*. 2014, Sv. 240, stránky 301-310.

Seznam použitých zkratek a symbolů

TBC		termální bariéra
TGO		vrstva oxidu hlinitého
dQ/dt	[J/s]	tepelný tok
A	[m ²]	plocha
K	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost
Δx	[μm]	šířka termální bariéry
Rq	[μm]	drsnost
N	[-]	počet bodů rozhraní
y_i	[μm]	souřadnice bodů v ose y
$y_{\text{střední}}$	[μm]	střední hodnota profilu.

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma chlazení TBC, převzato a upraveno [2]	14
Obr. 2 Pohled na vazebný povlak nanášený metodou APS	16
Obr. 3 Schéma dopadu částice a tvorba "splatů", převzato a upraveno [2]	17
Obr. 4 Schéma plazmatického nanášení, převzato a upraveno [3]	17
Obr. 5 Schéma metody EB-PVD, převzato a upraveno [2]	18
Obr. 6 Sloupcovitá struktura povlaku vytvořená metodou EB-PVD (variací struktur v závislosti na procesních parametrech) [3]	19
Obr. 7 Složení TGO vrstvy, převzato a upraveno z [2]	21
Obr. 8 Model geometrie termální bariéry	23
Obr. 9 Znázornění řezů materiálem CoNiCrAlY (vlevo) a NiCrAlY (vpravo)	24
Obr. 10 Porovnání velikostí částic CoNiCrAlY (vlevo) a NiCrAlY (vpravo)	24
Obr. 11 Geometrie rozhraní – materiál CoNiCrAlY (nahore) a NiCrAlY (dole)	25
Obr. 12 Ukázka konečnoprvkové sítě modelu termální bariéry	26
Obr. 13 Model okrajových podmínek	28
Obr. 14 Přehled řešených variant	29
Obr. 15 Schéma algoritmu řešení	29
Obr. 16 Ukázka rozložení napětí v keramické vrstvě	30
Obr. 17 Měření tloušťky TGO vrstvy	31
Obr. 18 Měření amplitudy	31
Obr. 19 Schéma metody „oken“	32
Obr. 20 Průběhy napětí, drsností a tloušťky TGO - materiál CoNiCrAlY	33
Obr. 21 Průběhy napětí, drsností a tloušťky TGO - materiál NiCrAlY	34
Obr. 22 Závislost drsnost-amplituda-napětí, model bez TGO, materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)	36
Obr. 23 Závislost drsnost-amplituda-napětí, TGO 1 μm , materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)	37
Obr. 24 Závislost drsnost-amplituda-napětí, TGO 3 μm , materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)	37
Obr. 25 Závislost drsnost-amplituda-napětí, TGO 5 μm , materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)	38
Obr. 26 Závislost drsnost-amplituda-napětí, TGO 7 μm , materiál Bond Coatu: CoNiCrAlY (vlevo), NiCrAlY (vpravo)	38

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Drsnost povrchu R_q [μm] jednotlivých rozhraní	25
Tabulka 2 - Souhrn materiálových vlastností, převzato a upraveno z [7]	27