

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská**

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering**

Ing. Jan SIEGL, CSc.

**Výzkum únavového chování těles se žárovými nástřiky
Fatigue Behaviour of Bodies with Thermally Sprayed Coatings**

Summary

The specific desired properties for structures and components working under critical conditions demand development of advanced materials, tailored to corresponding applications. New sophisticated materials must become lighter, stronger, more fatigue resistant, and able to operate at higher temperature. These demands cannot be fulfilled with only commonly used structural materials. A solution may be found by applying different types of surface modifications and/or using composite materials. One of the perspective approaches is application of thermally sprayed coatings with appropriate properties to component surfaces. Thermal spray is an advanced material-processing tool and is being used in a wide range of industries to solve increasingly challenging problems. Considerable advances in equipment and materials technology have greatly expanded the range of materials and applications for which thermal spray can be used. Thermal spraying processes are widely used techniques enabling production of different protective coatings that can be used as thermal-barrier, wear-resistant, and corrosion-resistant surface layers. This technology has become such an important that, e.g., modern marine and jet aircraft engines would not be able to operate without it, also medical applications for surgical implants are very important. All of these applications implicitly demand not only to master technology of coating but also to ascertain how the coatings affect fatigue behaviour of components. Therefore, a great attention is paid to study of fatigue behaviour of coatings.

Presented lecture deals with fatigue properties of substrate – coatings composite. The fatigue tests of bodies with thermally sprayed coatings deposited using various techniques and feedstock materials were performed. The following fractographic analyses of failed bodies allowed us to describe mechanisms of crack initiation and propagation in coatings and in substrate. The obtained results offered information about main factors influencing fatigue life of investigated bodies with coatings.

Souhrn

Zvyšující se nároky na spolehlivost a bezpečnost moderních strojů a zařízení provozovaných často v mezních podmínkách, kladou značné nároky na vlastnosti konstrukčních materiálů. V řadě případů není snadné vyhledat takový materiál, který by splňoval požadavky kladené jednak na odolnost při vysokých úrovních mechanického i tepelného namáhání, jednak na co nejnížší hmotnost příslušné součásti. Jedním z perspektivních řešení podobných materiálových problémů je aplikace žárových nástřiků, kterou může být dosaženo požadovaných vlastností součásti spojením dobrých mechanických či únavových vlastností substrátu s vhodnými korozními, tepelnými, tribologickými či estetickými vlastnostmi nástřiku. Výsledné únavové vlastnosti těles se žárovými nástřiky mají klíčový význam v řadě odvětví jako je letecký nebo automobilový průmysl (např. otěruvzdorné nástřiky na různých součástech atd.), zdravotnictví (biokompatibilní vrstvy na kloubních implantátech, třecí plochy umělých kloubů atd.) a jiné. Keramické vrstvy nanášené pomocí plazmatického stříkání se zpravidla používají pro zvýšení tepelné odolnosti součástí leteckých motorů a případně pro zvýšení otěruvzdornosti lopatek turbín. Nanášením kovových vrstev je dosahováno např. zvýšení tvrdosti a únavové životnosti důležitých součástí v papírenském průmyslu. Optimální použití plazmaticky nanášených vrstev vyžaduje nejen zvládnutí požadovaných technologických procesů, ale i podrobné znalosti procesů degradace probíhajících při různých způsobech zatěžování těles s těmito vrstvami. Proto je věnována značná pozornost výzkumu únavového chování nástřiků.

Předkládaná práce se zabývá studiem vlivu typu nanášeného materiálu a technologií nanášení na únavové vlastnosti systému substrát - nástřik. V návaznosti na popis metodických postupů aplikovaných experimentů jsou shrnuty hlavní výsledky jak únavových zkoušek těles s různými druhy nástřiků, tak následné fraktografické analýzy. Na základě těchto výsledků byly získány informace o hlavních faktorech, které ovlivňují délku únavového života těles s nástřiky. Dále byl popsán mechanismus únavového porušování nástřiku i substrátu a provedena rekonstrukce souslednosti rozvoje únavových trhlin v nástřiku a substrátu.

Klíčová slova: žárové nástřiky, plazmové nanášení, únavové zkoušky, únavový život, únavové trhliny, fraktografická analýza, procesy porušování, striace, zbytková pnutí.

Keywords: thermal coatings, plasma spraying, fatigue tests, fatigue life, fatigue cracks, fractographic analysis, failure processes, striation, residual stresses.

České vysoké učení technické v Praze

Název: Výzkum únavového chování těles se žárovými nástřiky

Autor: Ing. Jan Siegl, CSc.

Počet stran: 18

Náklad: 150 výtisků

© Jan Siegl, 2007

OBSAH

1. ÚVOD	6
2. METODIKA EXPERIMENTŮ	8
3. SHRNU TÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ	10
4. ZÁVĚRY	15
LITERATURA	16
CURRICULIM VITAE	18

1. ÚVOD

Vývoj nových materiálů s vysokou užitnou hodnotou je stále v popředí zájmu všech průmyslových zemí. Tento trend odpovídá skutečnosti, že nejen vlastnosti a kvalita, ale i cena konstrukčních materiálů byly a stále jsou faktory, které limitují všechna odvětví strojírenství, energetiky i dopravy. Když v roce 2 000 zveřejnila American National Academy of Engineering seznam dvaceti nejvýznamnějších inženýrských triumfů dosažených v průběhu dvacátého století [1], byly na posledním dvacátém místě „nové sofistikované materiály – s vyšší kvalitou, pevnější, lehčí a velmi dobře aplikovatelné“. Je však zřejmé, že bez vývoje a výroby takovýchto nových kvalitnějších a spolehlivějších materiálů s požadovanými vlastnostmi by žádného z ostatních úspěchů (např. v oblasti automobilů, letadel, kosmické techniky atd.) nemohlo být dosaženo. Přínos nových materiálů a technologií jejich použití lze velmi dobře dokumentovat na změnách, které v uplynulém století prodělaly především letadlové konstrukce. Zatímco na začátku 20. století byly draky letadel vyráběny ručně ze dřeva a plátna (často metodou pokusů a omylů), jsou dnes při značně automatizované výrobě moderních letadlových konstrukcí používány nové typy progresivních materiálů (hliníkové a titanové slitiny, uhlíkové kompozity atd.).

Hlavní cíle výzkumu a vývoje nových materiálů lze obecně formulovat takto [2]: nové progresivní konstrukční materiály musí být lehčí, pevnější, více korozně odolné, schopné pracovat při vysokých teplotách a současně by neměla růst jejich cena. Rozsah problémů, které je v uvedených souvislostech třeba řešit, je tedy značně široký a závisí na oblasti použití příslušných materiálů – odolné a snadno spojovatelné materiály pro stavební průmysl; nové speciální materiály pro levnou výrobu energie; progresivní materiály zajišťující vyšší účinnost, lepší korozní odolnost, delší dobu života, velkou spolehlivost, nižší hmotnost a především snížení cen pro automobily, letadla, stavební a zemědělské stroje atd. Analogické požadavky jsou kladeny i na speciální materiály pro počítače a další elektronická zařízení.

Výše uvedených cílů ve výzkumu a vývoji nových materiálů by nebylo možné dosáhnout bez nových sofistikovaných metod studia a zkoušení různých materiálových charakteristik. Rychlý rozvoj elektroniky v druhé polovině minulého století umožnil rozvoj komerčně dostupné přístrojové techniky a vývoj metod, jejichž aplikace vedly k posunu základního i aplikovaného výzkumu do mikroobjemu pevných látek, kde je klíč k poznání a řízenému ovlivňování makroskopických vlastností materiálů. Mezi tyto metody patří například měření mikrotvrdosti, elektronová mikroskopie, lokální elektronová mikroanalýza, rtg. a neutronové difrakční metody atd. Za jednu z nejefektivnějších metod studia procesů probíhajících v mikroobjemu materiálů lze považovat řádkovací elektronovou mikroskopii, která vedla ke kvalitativním změnám nejen při používání fraktografické analýzy, ale především v interpretaci získaných výsledků. Následný rozvoj kvalitativních a posléze i kvantitativních fraktografických metod umožnil popisovat procesy, probíhající při porušování

materiálů v mikroobjemu, ve vazbě jak na technologické a mikrostrukturní charakteristiky, tak na způsob zatěžování i na podmínky, ve kterých zatěžování probíhalo. V této podobě je fraktografická analýza prakticky nezastupitelným zdrojem informací o materiálových vlastnostech a mikrostrukturních parametrech. Fraktografické informace jsou využívány jako základní vstupní data při modelování technologických postupů výroby nových materiálů. Finálním výsledkem komplexního výzkumu je výroba materiálů, jejichž definované charakteristiky a vlastnosti jsou přizpůsobeny předpokládaným konkrétním aplikacím [2], [3] a [4].

Z hlediska vývoje nových materiálů a technologií lze za velmi perspektivní považovat iontové a žárové nanášení povlaků a tenkých vrstev, případně další postupy zaměřené na modifikace povrchu součástí. Žárové nanášení se v uplynulých letech stalo jednou z velmi efektivních metod zaměřených na zvyšování odolnosti různých strojních částí proti korozi, opotřebení, únavě a dalším degradačním procesům. Značná univerzálnost této technologie vedla k výraznému rozšíření aplikačních možností materiálů s nástriky v nejrůznějších průmyslových odvětvích [5] a [6] (například při výrobě výkonných leteckých či lodních motorů, podvozků letadel atd.). Významnou oblastí aplikace je i zdravotnictví, kde se žárové nástriky používají při přípravě biokompatibilních vrstev na kloubních implantátech, či pro přípravu třecích ploch umělých kloubů. Nezbytným předpokladem průmyslových i lékařských aplikací dílců s povlakovanými povrchy je znalost procesů degradace, ke kterým v těchto dílcích dochází v důsledku cyklického namáhání. Je třeba si uvědomit, že mechanické vlastnosti nástriků jsou v důsledku výrazné anizotropie, pórovitosti a zbytkových pnutí zcela odlišné od vlastností kompaktních materiálů stejného chemického složení. Navíc nelze opominout ani vliv žárově nanesených vrstev na vlastnosti substrátu [7] a [8]. Z těchto důvodů byl v uplynulých deseti letech na katedře materiálů FJFI ČVUT v Praze realizován rozsáhlý experimentální program zaměřený na výzkum únavového chování těles s různými typy žárových nástriků. Tento výzkumný program, vedený autorem předkládané práce, byl realizován ve spolupráci s Ústavem fyziky plazmatu AV ČR v.v.i., Praha a State University od New York, Stony Brook.

Předložená práce si neklade za cíl podrobné shrnutí všech výsledků, získaných při studiu únavového chování těles s nástriky; to by ani vzhledem k rozsahu této práce nebylo možné. Hlavním záměrem bylo především dokumentovat význam komplexního přístupu ke studiu únavového chování těles s nástriky. Poznatky získané v průběhu řešení ilustrují, že cílevědomé začlenění fraktografie a dalších speciálních metod do výzkumu vede nejen k rozšíření interpretačních možností výsledků únavových zkoušek, ale může významným způsobem přispět i k rozšíření aplikačních možností a tedy i výtěžnosti samotné fraktografické analýzy.

2. METODIKA EXPERIMENTŮ

Fraktografickým výzkumem únavového chování těles s žárovými nástřiky se katedra materiálů ČVUT-FJFI začala zabývat v roce 1997. V této době však byly v dostupné literatuře pouze velmi omezené informace o experimentech podobného typu. Z toho vyplynulo, že prvním a zcela zásadním problémem výzkumu únavového chování těles s žárovými nástřiky byl nejen vývoj metodických postupů fraktografické analýzy porušených nástřiků, ale především vývoj metodiky únavových zkoušek. Vzhledem k našim předchozím zkušenostem, získaných při studiu vlivu balotínování a dalších povrchových úprav na únavovou životnost těles z leteckých Al-slitin [9], bylo rozhodnuto použít pro únavové zkoušky těles s nástřiky speciální elektromagnetické zatěžovací zařízení „SF-test“, vyvinuté na KMAT-FJFI. Toto zařízení umožňuje zatěžovat jednostranně vetknutá plochá zkušební tělesa cyklickým ohybem v rezonačním režimu. Únavové chování zkušebních těles je při tomto způsobu zatěžování velmi citlivé na charakteristiky povrchu a výsledky zkoušek tak mohou poskytnout velmi cenné informace o vlivu povrchových úprav na délku únavových životů. V zařízení SF-Test není zatěžování řízeno silou, ale výchylkou volného konce tělesa (tj. deformací). Konstantní velikost výchylky podélné osy zkušebních těles je v průběhu zkoušky zajišťována pomocí počítačem řízených změn amplitudy a frekvence budícího napětí ve vychylovacích cívkách. V důsledku iniciace a šíření únavových trhlin dochází ke snižování nosného průřezu zkoumaného tělesa, se kterým je spojen pokles jeho tuhosti a tedy i rezonanční frekvence. Pokles budící frekvence o předem zvolenou hodnotu pak lze použít jako podmínku pro ukončení zkoušky. Podrobné informace o testovacím zařízení a o metodice zkoušek jsou uvedeny v práci [10]. Výstupem únavové zkoušky je smluvní délka únavového života N_f zkoumaného tělesa, t.j. počet cyklů potřebných k dosažení požadovaného porušení nosného průřezu. Pro zajištění možnosti objektivního porovnávání výsledků zkoušek těles s různými povrchovými úpravami byla zavedena relativní délka únavového života R_f , tj. počet cyklů zatížení do porušení těles s nástřikem (či jinou úpravou) byl vztažen k počtu cyklů do porušení u těles ze stejného substrátu, ale bez povrchových úprav. Tento způsob hodnocení výsledků únavových zkoušek nám navíc umožnil vyloučit vliv odlišných vlastností substrátu (pásová ocel byla dodána ve třech mírně odlišných variantách).

Pro únavové zkoušky byla použita plochá tělesa vyrobená z nízkouhlíkové oceli (ČSN 11343.21). Jako polotovár pro výrobu zkušebních těles byl použit ocelový pás o tloušťce 4 mm. Povrch zkušebních těles byl upraven různými způsoby. Pro každý typ úpravy povrchu byla připravena a odzkoušena jedna série minimálně šesti těles. Podrobné informace o geometrii zkušebních těles a způsobu přípravy vrstev různého typu jsou uvedeny například v [9] a [12]. Bylo odzkoušeno více než 300 zkušebních těles, rozdělených do 40 sérií s různými povrchovými úpravami a 3 referenčních sérií. V průběhu únavových

zkoušek byl ověřován nejen vliv různých typů vrstev (kovových i keramických), ale i vliv různých podmínek tryskání povrchu substrátu před nanášením.

Lomové plochy pro fraktografickou analýzu byly připraveny buď statickým dotržením únavově poškozených těles na trhačím stroji, nebo pomocí speciálních postupů, popsaných například v [10]. Pro sledování mikromorfologie lomových ploch byla použita řádkovací elektronová mikroskopie. Fraktografické analýzy těles s elektricky nevodivými keramickými nástřiky byly prováděny na mikroskopu JEOL JSM-5510LV, který umožňuje pozorovat mikromorfologii povrchu pomocí záznamu signálu zpětně odražených elektronů v nízkovakuovém režimu (tj. lomové plochy není třeba před pozorováním pokovit tenkou vodivou vrstvou). Pro fraktografické pozorování těles bez nástřiků byl zvolen režim detekce sekundárních elektronů při vysokém vakuu.

První etapa fraktografických analýz těles porušených při únavových zkouškách neposkytla dostatečný objem informací, které by umožnily jednoznačně rozlišit fraktografické znaky únavového a silového lomu nástřiků. Mikromorfologické charakteristiky lomových ploch neposkytly ani žádnou informaci o směru šíření trhlin ať už v kovových, nebo keramických vrstvách. Z fraktografického nálezu se nepodařilo získat žádné informace o tom, zda při cyklickém ohybovém zatěžování sledovaných těles vzniknou nejprve trhliny ve vrstvě a po jejich reiniciaci na rozhraní „vrstva-substrát“ dojde k únavovému porušování substrátu, nebo zda nejprve iniciují únavové trhliny na povrchu substrátu a až při určitém stupni porušení nosného průřezu tělesa se začne porušovat i vrstva nástřiku.

Z těchto důvodů byly vyvinuty speciální experimentální postupy pro studium počátečních fází únavového porušování těles s nástřiky. Pro tyto experimenty byly připraveny metalografické výbrusy v přesně definovaných řezech zkušebními tělesy, jejichž zkoušky byly předčasně ukončeny při porušení cca 5 % nosného průřezu [11] a [13]. Unikátní informace o procesech porušování nástřiků poskytlo in-situ sledování procesu porušování speciálně připravených vzorků řádkovacím elektronovým mikroskopem [14]. Důležitým zdrojem informací z hlediska interpretace fraktografického nálezu byla i lokální elektronová mikroanalýza chemického složení materiálu v mikroobjemu. Zejména v případě směsných a vícevrstvých nástřiků bylo možné pomocí této metody identifikovat složení jednotlivých splatů na lomových plochách nebo na metalografických výbrusech. Pro získání informací o vlivu způsobu přípravy nástřiků na únavové porušování bylo realizováno podrobné studium mikromorfologie jak volného povrchu nástřiků, tak i povrchu přiléhajícího k substrátu (vzorky byly připraveny odleptáním substrátu), získané výsledky byly porovnávány s mikromorfologií povrchu substrátu [10].

Výsledky únavových zkoušek i fraktografických analýz poskytly velmi cenné informace o únavovém porušování těles s nástřiky. Z hlediska objasnění příčin a průběhu procesů porušování nástřiků bylo nezbytné provést i další experimenty – např. měření mikrotvrdosti, zbytkových pnutí a modulu pružnosti (spolupráce s ÚFP AV ČR, v.v.i).

3. SHRNUÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ

Poznatky získané v průběhu rozsáhlého programu únavových zkoušek lze stručně shrnout do následujících bodů:

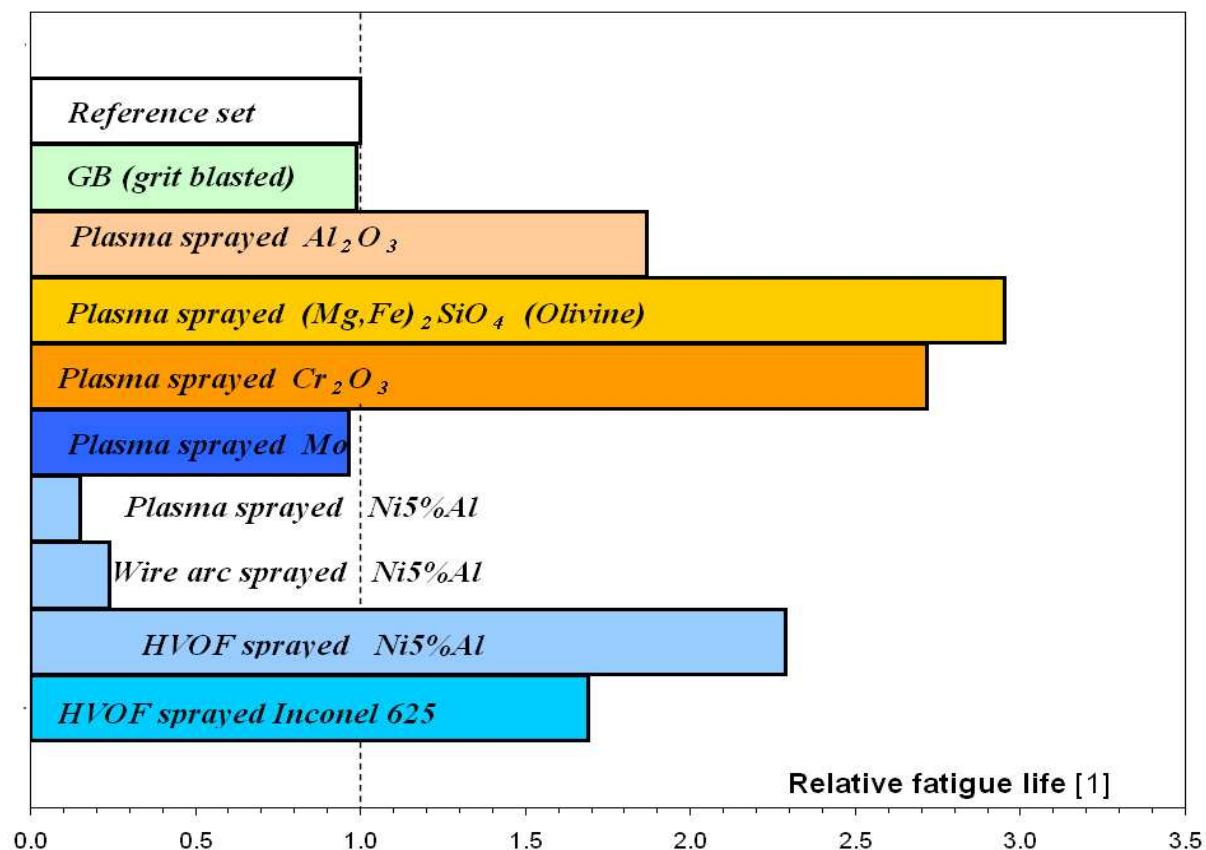
- Tryskání povrchu substrátu před nanesením vrstev není příčinou změn únavových životů těles s nástřiky. Opakovaně bylo prokázáno, že únavové životy tryskaných těles bez nástřiku jsou prakticky stejné jako životy referenčních těles (tj. v původním stavu bez úprav), obr. 1. Navíc stejný způsob tryskání povrchu vede v kombinaci s některými nástřiky k prodloužení, zatímco s jinými nástřiky vede ke zkrácení únavových životů (viz např. [10] až [14]).

Je třeba si uvědomit, že cílem používaného způsobu tryskání je pouze odmaštění a zdrsňení povrchu substrátu, aby se zlepšila soudržnost vrstvy a substrátu. Je sice pravděpodobné, že optimalizace podmínek tryskání by mohla vést k prodloužení únavových životů tryskaných těles, otázkou však zůstává, zda by tento efekt nebyl při žárovém nanášení vrstev eliminován.

- Žárové nástřiky významným způsobem ovlivňují délku únavových životů těles. V závislosti na technologii nanášení a typu nanášeného materiálu může dojít buď k prodloužení ($R_f > 1$) nebo zkrácení ($R_f < 1$) únavových životů (viz například obr. 1). Opakovaně bylo zjištěno, že vrstvy ze stejného materiálu, nanesené různým způsobem, vedou ke značně odlišným délkám únavových životů (např. vrstvy Ni5%Al v obr. 1). V práci [16] bylo například ukázáno, že zatímco keramická vrstva Al_2O_3 nanesená vodou stabilizovaným hořákem WSP[®]160 vede k zhruba dvojnásobnému prodloužení únavového života (tj. $R_f \approx 2$), stejná vrstva nanesená plynem stabilizovaným hořákem GSP vykazuje poměrně významné zkrácení únavový životů ($R_f < 1$).

Pro obecné závěry o výsledném vlivu typu materiálu i jednotlivých způsobů nanášení na délku únavových životů těles s nástřiky sice nemáme dostatečné průkazné experimentální podklady, ale z výsledků realizovaných únavových zkoušek vyplývá:

- Keramické nástřiky plazmově nanesené vodou stabilizovaným hořákem WSP[®]160 vedly k poměrně výraznému prodloužení únavových životů zkušebních těles ($R_f > 1,9$). Nástřik kovové vrstvy Ni10%Al délku únavového života prakticky neovlivnil ($R_f \approx 1$), [15] a [17].
- Keramické i kovové nástřiky plazmově nanesené plynem stabilizovaným hořákem GSP ve všech případech vedly k zkrácení únavových životů ($R_f < 1$). Toto zkrácení bylo podstatně výraznější u kovových nástřiků [15] a [16].
- Kovové nástřiky nanesené metodou HVOF vykazovaly výrazné prodloužení únavových životů ($R_f > 1,7$). Otázkou zůstává jaký vliv by měly keramické vrstvy nanesené touto metodou.
- Kovové nástřiky nanesené elektrickým obloukem vedly ve všech sledovaných případech ke zkrácení únavových životů (viz [11] a [15]).

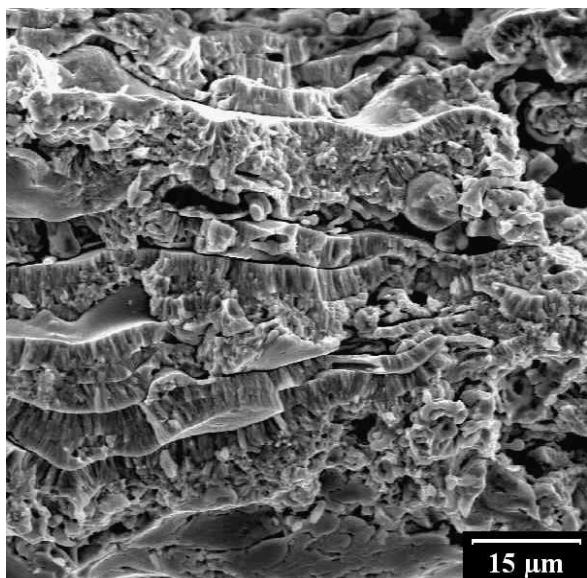


Obr. 1 – Vliv technologie nanášení a přídavného materiálu na průměrné hodnoty relativních únavových životů těles s tloušťkou substrátu 4 mm (průměrné hodnoty únavových životů jsou vztaženy k referenční průměrné hodnotě únavového života substrátu). Upraveno podle [15].

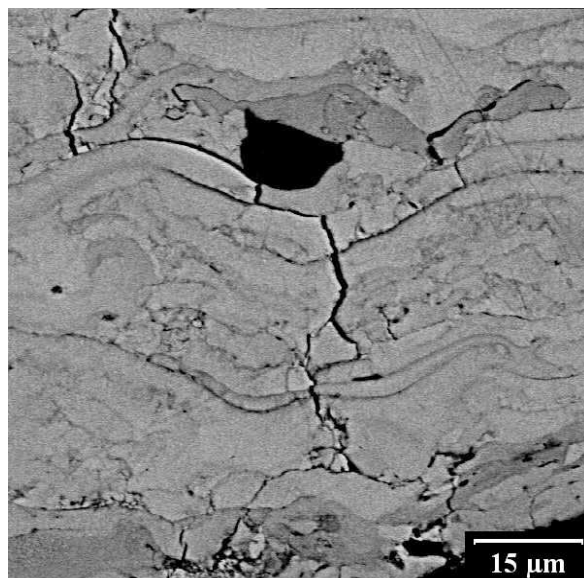
- Porušování nástřiků probíhá mechanismem lámání splatů, propojováním intersplatových a intrasplatových trhlin, dutin a pórů, případně dekohezí splatů. Jednoznačný popis mechanismu porušování je založen na propojení výsledků studia mikromorfologie lomových ploch nástřiků a in-situ sledování rozvoje porušování nástřiků při zatěžování těles s nástřiky ve vakuové komoře řádkovacího elektronového mikroskopu (snímky na obr. 2).

Mikromorfologické znaky neumožňují určení oblasti iniciace únavových trhlin ani směr jejich šíření v nástřiku. Fraktografický nálezn navíc prokázal, že mechanismus porušování nástřiku je stejný jak při cyklickém, tak jednorázovém zatížení. Z tohoto důvodu je jednoznačné vymezení únavově porušené části nosného průřezu žárově nanesených vrstev velmi obtížné, tj. hranici mezi únavovým porušením a oblastí závěrečného silového dolomení zbytku nosného průřezu lze pouze odhadnout na základě vymezení analogických oblasti na lomové ploše substrátu.

Charakter mikromorfologie lomu jednotlivých nástřiků je předurčen jak tvarem a velikostí splatů, tak velikostí a distribucí pórů a dutin. Jinými slovy, mikromorfologie lomových ploch nástřiků odpovídá charakteru mikrostruktury vrstvy a je tedy předurčena jak typem naneseného materiálu, tak technologií a podmínkami nanášení (obr. 2 a 3), např. [11] a [15].

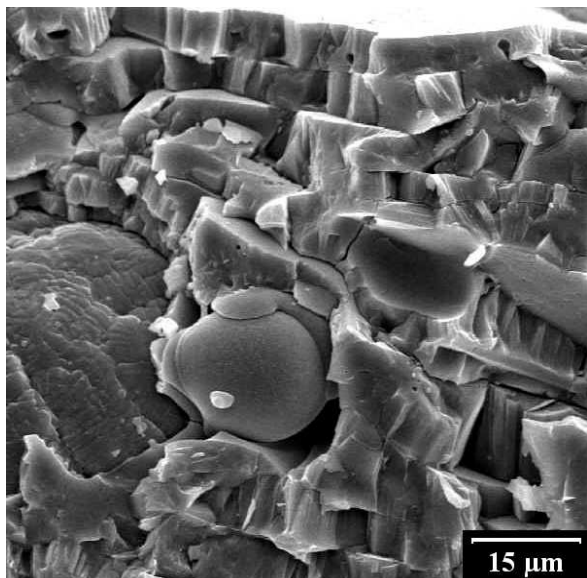


a) Únavový lom

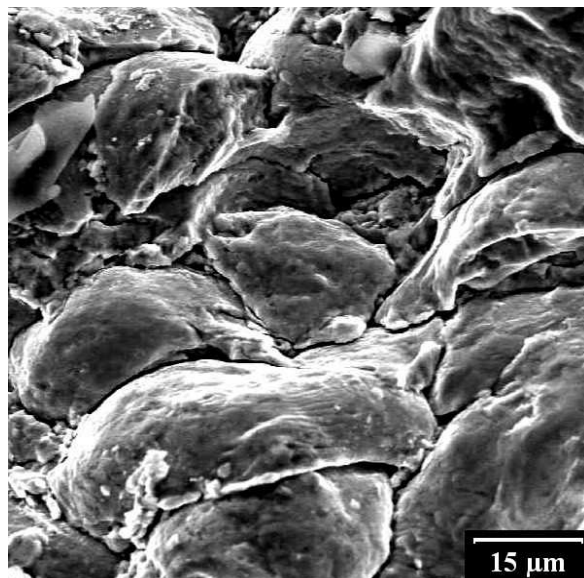


b) Statické zatížení (in-situ sledování)

Obr. 2 – Charakteristické mikromorfologické znaky lomové plochy plazmově naneseného nástřiku molybdenu.



a) Al_2O_3 – naneseo plazmově



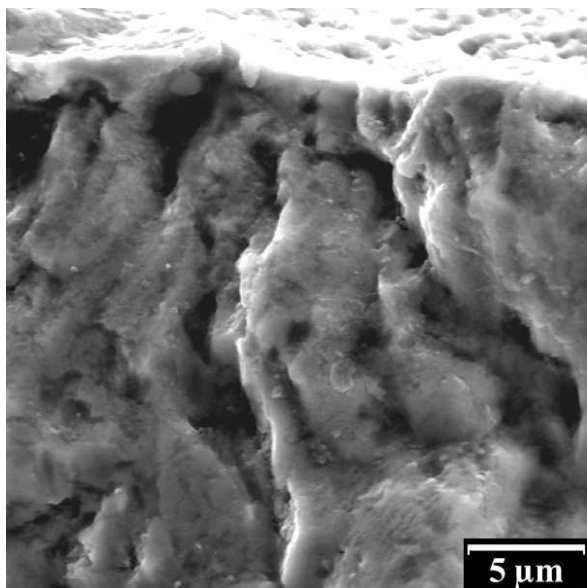
b) Ocel 316L – naneseo HVOF)

Obr. 3 – Porovnání mikromorfologie lomu keramického (Al_2O_3) a kovového (ocel 316L) nástřiku nanesených odlišnými postupy.

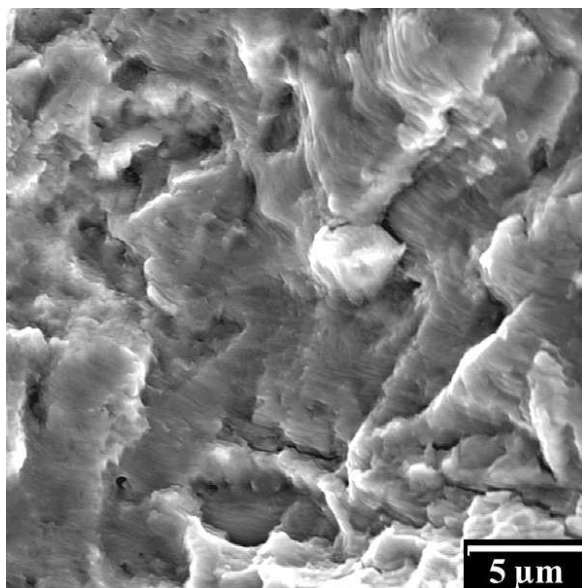
- Porušování ocelového substrátu probíhá striacním mechanismem. Únavové trhliny iniciují na povrchu ocelového substrátu (tj. pod nástřikem) na povrchových nehomogenitách (obr. 4).

Mechanismus únavového porušování substrátu byl u všech sledovaných těles shodný, tj. není ovlivněn ani technologií nanášení ani chemickým složením nástřiku, viz např. [11].

Výsledky orientačních měření roztečí striací naznačují, že rozdílné délky únavových životů těles s nástřiky nejsou způsobeny rozdílnou rychlostí šíření trhlin, ale rozdílným počtem cyklů potřebným pro iniciaci růstuschopné trhliny v substrátu.



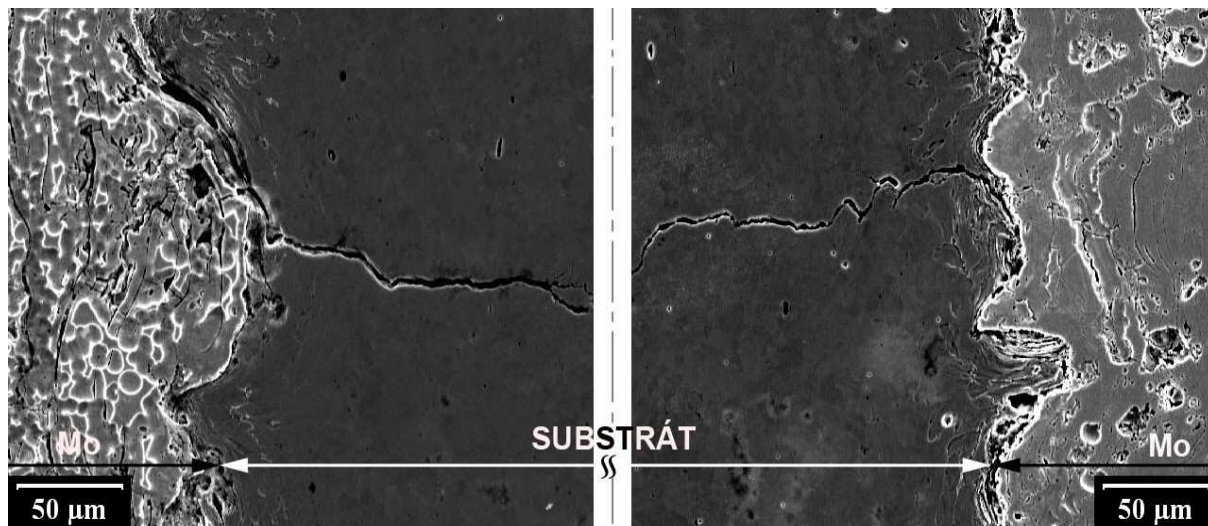
a) Oblast iniciace



b) Oblast šíření

Obr. 4 – Charakteristická mikromorfologie únavového lomu ocelového substrátu – snímky dokumentují striační mechanismus porušování.

- Z hlediska časové souslednosti dojde nejprve ke vzniku a rozvoji únavových trhlin substrátu a teprve potom se porušuje nástřík. Zkušební tělesa, jejichž únavová zkouška byla předčasně ukončena, byla postupně rozřezána a na vybraných řezech (v rovině kolmé k povrchu vrstev a rovnoběžné s podélnou osou tělesa) byly připraveny metalografické výbrusy. Sledování těchto řezů prokázalo výskyt trhlin, které iniciovaly na povrchu substrátu a šířily se směrem k neutrální ose zkušebního tělesa. V nástříku přitom žádné spojitě trhliny nalezeny nebyly (viz například snímky na obr. 5).

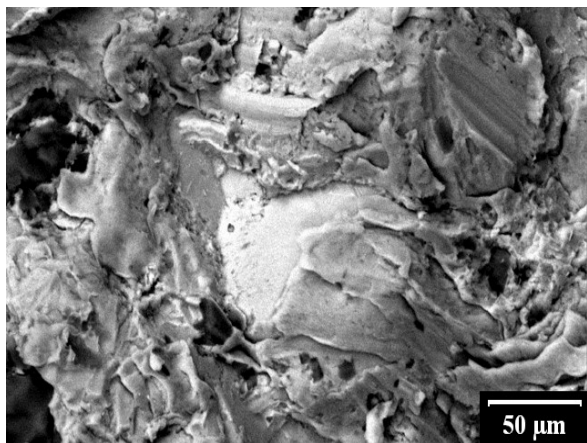


Obr. 5 – Metalografický výbrus v rovině kolmé k povrchu vrstev a rovnoběžné s podélnou osou tělesa. Na snímcích lze pozorovat únavové trhliny, které iniciovaly na povrchu substrátu (pod vrstvou molybdenu) a šířily se napříč přes tloušťku substrátu.

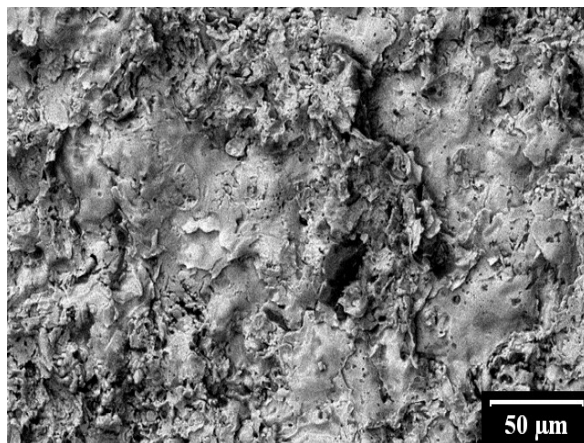
Sledování prvních etap porušování těles s nástříky vede k závěru, že únavové porušování nástříků je důsledkem deformací vyvolaných šířením únavových

trhlin v substrátu (tj. otvíráním a zavíráním trhliny), [11]. K analogickému závěru dospěli například i autoři práce [8].

- Charakter rozhraní substrát-vrstva má zásadní vliv nejen na soudržnost nástřiků se substrátem, ale i na délku únavových životů. Studium povrchu vrstev přiléhajícího k substrátu (vzorky byly připraveny odleptáním substrátu) prokázalo, že u zkušebních těles s prodlouženými únavovými životy ($R_f > 1$) vyplnil nanášený materiál velmi dobře nerovnosti na povrchu, tj. po oddělení substrátu jsme obdrželi více či méně zdařilou repliku povrchu substrátu (obr. 6a). Naopak u zkušebních těles ze sérií se zkrácenými únavovými životy ($R_f < 1$) nevyplnil materiál nástřiku povrchové nerovnosti substrátu dostatečně a mikromorfologie povrchu vrstvy příslušnému povrchu substrátu neodpovídá (obr. 6b). Z těchto výsledků vyplývá, že geometrické vlastnosti rozhraní jsou jedním z faktorů, které můžou zvýšit odolnost těles s nástřiky proti únavovému porušování. Studium mikromorfologických charakteristik rozhraní tedy může poskytnout informace, které umožní optimalizaci technologie nástřiků, [18].



a) HVOF nástřik ($R_f = 2,30$)



b) Plazmový nástřik ($R_f = 0,15$)

Obr. 6 – Vliv technologie nanášení na mikromorfologii povrchu nástřiků ze strany substrátu (v závorkách jsou uvedeny délky relativních životů).

- Soubor nových poznatků vede k závěru, že jedním z rozhodujících faktorů určujících vliv nástřiků na únavové chování těles jsou zbytková pnutí vznikající v průběhu přípravy nástřiku. Tato pnutí významným způsobem ovlivňují jednak celkový stav napjatosti zkušebního tělesa při únavovém namáhání, jednak přenos sil mezi nástřikem a substrátem. Výsledkem těchto dějů pak může být vytvoření více či méně účinných bariér proti šíření únavových trhlin, viz například [11] a [12]. Vzhledem k obtížím s měřením zbytkových pnutí, zejména s určením gradientu těchto pnutí v oblasti rozhraní vrstva-substrát, se doposud nepodařilo zcela uspokojivě popsat vazby mezi technologickými parametry nanášení nástřiku a zbytkovým pnutím. Z těchto důvodů nemáme dostatečné informace pro vysvětlení vlivu zbytkových pnutí na výsledné únavové chování těles s různými typy nástřiků.

4. ZÁVĚRY

Předložená práce se zabývá výzkumem únavového chování těles se žárovými nástřiky. V průběhu rozsáhlého experimentálního programu realizovaného na katedře materiálů byla získána celá řada původních poznatků o procesech únavového porušování zkušebních těles se žárovými nástřiky:

- Délky únavových životů těles s žárovými nástřiky jsou významně ovlivňovány jak typem nanášeného materiálu, tak technologií nanášení, zatímco vliv běžných postupů úpravy povrchu substrátu je z praktického hlediska nevýznamný.
- Proces porušování nástřiků probíhá mechanismem lámání splatů, propojováním intersplatových a intrasplatových trhlin, dutin a pórů, případně dekohezí splatů.
- Únavové trhliny v tělesech s nástřiky iniciují na povrchu substrátu (tj. pod nástřikem), k porušování nástřiků dochází až při určitém stupni porušení substrátu.
- Mezi faktory ovlivňující dobu do iniciace únavových trhlin patří mechanické vlastnosti rozhraní vrstva-substrát, které jsou mimo jiné závislé na míře vyplnění povrchových nerovností substrátu materiálem nástřiku.
- Jedním z rozhodujících faktorů určujících vliv nástřiků na únavové chování těles jsou zbytková pnutí vznikající v tělesech během přípravy nástřiku.

Uvedené poznatky poskytují důležité informace pro případné průmyslové aplikace žárových nástřiků. Je třeba zdůraznit závažné varování: u dílců s nástřiky nemohou ani relativně časté provozní kontroly a prohlídky vést ke včasnému zjištění poruchy, neboť únavové porušování iniciuje pod nástřikem a navíc na značně členitém povrchu nástřiku lze trhliny identifikovat jen velmi obtížně. V průběhu řešení byla získána celá řada poznatků metodického charakteru, které bude možno využívat při dalších podobných experimentech. Byla vyvinuta a ověřena jednoduchá a spolehlivá metodika únavových zkoušek, které poskytují užitečné informace o vlivu povrchových úprav zkušebních těles na jejich únavové chování. Běžné metodické postupy fraktografické analýzy lomových ploch byly rozšířeny o speciální fraktografické metody, které poskytly další informace o mechanismech a časovém průběhu procesů únavového porušování zkušebních těles s nástřiky. Jednalo se především o in-situ sledování procesu porušování ve vakuové komoře řádkovacího elektronového mikroskopu, sledování ranných stádií procesu porušování a sledování povrchu nástřiku po odleptání substrátu. Právě poznatky, získané těmito speciálními metodami, umožnily jednoznačnou interpretaci fraktografického nálezu lomových ploch.

Předložená práce dokumentuje že aplikace speciálních fraktografických metod může poskytnout jinak nezjistitelné poznatky o procesech porušování a rozšiřuje tak interpretační možnosti výsledků únavových zkoušek a běžného fraktografického hodnocení lomových ploch.

LITERATURA

- [1] HUNT, M.W.: Materials Rule. Advanced Materials and Processes. Vol.157 (2000), No.4, p.4.
- [2] HUNT, M.W.: Millennium Materials. Advanced Materials and Processes. 157 (2000), No.3, p.4.
- [3] NEDBAL, I.: Fraktografická analýza v komplexním přístupu ke studiu mezních stavů těles a konstrukcí. [Habilitační práce.] Praha, ČVUT-FJFI-KMAT, 1979, 116 s.
- [4] SIEGL, J. – KARLÍK, M. – KUNZ, J.: Fractographic Research of Failure Processes in Advanced Materials. Proc. Int. Conf. FRACTOGRAPHY 2000. Ed. L.Parilák. IMR SAS Košice 2000, pp. 70-81.
- [5] LADRU, F. et al: Tailored Solutions for Off-Shore Applications by Plazjet Sprayed Coatings. In: Proc. United Thermal Spray Conference. ASM, Materials Park, Ohio 1997, pp. 175-181.
- [6] HERMAN, H. – SAMPATH, S. – McCUNE, R.: Thermal Spray: Current Status and Future Trends. MRS Bulletin, Vol.25, 7 (2000), pp. 17 -25
- [7] MATĚJÍČEK, J.: Processing Effects on Residual Stress and Related Properties of Thermally Sprayed Coatings. [PhD Thesis.] State University of New York, Stony Brook 1999, 154 pp.
- [8] IBRAHIM, A. – BERNDT, C.C.: Fatigue Behaviour and Deformation of Aluminum and Steel HVOF Sprayed with WC-Co Coatings. In: Proc. United Thermal Spray Conference. ASM, Materials Park, Ohio 1997, pp. 731-736.
- [9] KUNZ, J. – NEDBAL, I. – SIEGL, J.: Vliv balotínování na únavové porušování chemicky frézovaných těles z Al slitiny. In: Sborník 7. konference Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů (Mariánské Lázně). FS ČVUT Praha&ČSNMT 1996, s.119 – 121.
- [10] KOVÁŘÍK, O.: Popis mechanismu únavového porušování těles s žárově nastříkanými vrstvami. [Disertační práce.] Praha, ČVUT-FJFI-KMAT 2003, 96 s.
- [11] SIEGL, J. – KANTOR, P. – ADÁMEK, J.: Fatigue Processes in Bodies with Surface Coatings. In: Proc. 14th Int. Conference on Surface Modification Technologies. (Paris 2000) Eds. T.S.Sudarshan, M.Jeandin. ASM International and IOM Communication Ltd. 2001, pp. 64-70.
- [12] KOVÁŘÍK, O. – SIEGL, J. – NOHAVA, J. – CHRÁSKA, P.: Young's Modulus and Fatigue Behaviour of Plasma Sprayed Alumina Coatings. In: Proc. ITSC 2003, 5-8 May 2003, (Orlando), Eds. C.Moreau and B.Marple, ASM International, Materials Park, Ohio, USA 2003, pp. 1379-1386.
- [13] SIEGL, J. – NOHAVA, J. – KANTOR, P.: Fraktografický výzkum

- únavového porušování těles s různými typy nástřiků. In: Sborník METAL 99 (Ostrava). III.díl, Ostrava, Tanger s.r.o. 1999, s. 257-265.
- [14] SIEGL, J. – ADÁMEK, J. – KOVÁŘÍK, O. – KARLÍK, M.: In-situ Study of Failure Processes of Plasma Spraying Mo Coatings. In: Proc. 12th European Congress on Electron Microscopy (Brno). Vol. II/4, Eds. J.Gemperlová, I.Vávra. Brno, Czechoslovak Society for Electron Microscopy 2000, pp. 531-532.
- [15] SIEGL, J. – PROCHÁZKA, Z. – KOVÁŘÍK, O.: Fatigue Tests of Bodies with Various Thermally Sprayed Coatings. Kovové materiály. Připraveno k publikaci.
- [16] SIEGL, J. – ADÁMEK, J. – KOVÁŘÍK, O. – DUBSKÝ, J. – CHRÁSKA, P.: Evaluation of Fatigue Properties of Various Thermal Spray Coatings. In: Proc. ITSC 2006, May 2006, (Seattle), Eds. B.R.Marple, M.M Hyland, Y.CH.Lan, J.Voyer, ASM International, Materials Park, Ohio, USA 2006, 6 p (CD-ROM)
- [17] BENSCH, J. – SIEGL, J. – KOVÁŘÍK, O.: Procesy porušování plazmově nanášených keramicko-kovových vrstev. Proc. Int. Conf. Fractography 2006, Ed. L.Parilák. IMR SAS Košice 2006. pp.189-196.
- [18] KOVÁŘÍK, O. – SIEGL, J.: Procesy porušování termicky nanášených materiálů. Proc. Int. Conf. FRACTOGRAPHY 2003. Ed. L.Parilák. IMR SAS Košice 2003, pp. 334-342.

Ing. Jan SIEGL, CSc.

CURRICULIM VITAE

<i>Narozen:</i>	2.7.1949 v Litomyšli
<i>Vzdělání:</i>	1980 – CSc., Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu (ČVUT-FJFI) 1974 – Statistická teorie spolehlivosti mechanických systémů (třísemestrální postgraduální kurz, ČVUT-FJFI-KMAT) 1972 – Ing., Fyzikální inženýrství (ČVUT-FJFI)
<i>Zaměstnavatel:</i>	ČVUT FJFI v Praze, katedra materiálů 1977 – dosud) (odborný asistent, vedoucí laboratoří KMAT)
<i>Pedagogická činnost</i>	Experimentální metody II, Fraktografie a analýza poruch, Výběrový seminář, přednášky o řádkovací elektronové mikroskopii a fraktografické analýze. Vedení studentských prací v řádném i doktorském studiu (celkem 27 prací). Vedení zahraničních studentů (5 projektů).
<i>Oblasti vědecko-výzkumné činnosti</i>	Řádkovací elektronová mikroskopie a lokální elektronová mikroanalýza. Fraktografické studium procesů porušování těles a konstrukcí, analýza poruch. Výzkum vlastností nově vyvíjených materiálů.
<i>Publikace:</i>	Autor respektive spoluautor 182 příspěvků v odborných časopisech a sbornících z konferencí, více než 300 výzkumných zpráv pro tuzemské i zahraniční partnery. Autor 19 oponentských či lektorských posudků článků, grantových projektů, zpráv a diplomových a disertačních prací.
<i>Citace prací:</i>	Celkem 174 citací (z toho 105 v zahraničí)
<i>Zahraniční studijní pobyty:</i>	Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Netherlands (říjen 1989 – květen 1990)
<i>Grantové projekty</i>	GA ČR – 2x řešitel, 5x spoluřešitel, 7x člen řešitelského kolektivu. Člen řešitelského kolektivu 4 výzkumných záměrů MŠMT a 4 mezinárodních projektů (COST, Eureka).
<i>Členství v odborných společnostech:</i>	Spektroskopická společnost Jana Marka Marci Česká společnost pro mechaniku Česká společnost pro nové materiály a technologie ASM International (The Materials Information Society) EMA (European Microbeam Society) ESIS (European Structural Integrity Society)
<i>Další aktivity:</i>	Soudní znalec (od 1992) – Technické obory různé; Strojírenství; Doprava. Člen podoborové komise 106 GA ČR (od roku 2004)