

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Doc. Ing. Oldřich Ambrož, CSc.

**VYŽITÍ NÍZKOTEPLTNÍ PLAZMY
PŘI VYTVÁŘENÍ POVLAKŮ ŽÁROVÉHO NÁSTŘIKU**

**USING THE LOW TEMPERATURE PLASMA
FOR PRODUCTION OF THERMAL SPRAY COATINGS**

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU
JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ

Obor: Strojírenská technologie



Brno 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

žárový nástřik plazmou, žárový nástřik, pístní kroužky, synchronizační kužele, proudový motor, dentální implantáty

KEYWORDS

plasma thermal spraying, thermal spraying, piston rings, synchron cones, jet engine, dental implants

OBSAH

1	Představení autora	4
2	Vědecko–pedagogická činnost autora	5
	2.1 Sledování základních vlastností povlaků žárového nástřiku	5
	2.2 Výzkum technologie nanášení biokeramických materiálů žárovým nástřikem plazmou	5
	2.3 Vybudování „čistého“ akreditovaného pracoviště pro povrstvování implantátů	6
	2.4 Vybudování pracoviště žárových nástřiků pro služby zákazníkům	6
	2.5 Pedagogika, PGS (CŽV)	7
3	Využití nízkoteplotní plazmy při vytváření povlaků žárového nástřiku	9
	3.1 Úvod	9
	3.2 Aplikace plazmy ve vybraných průmyslových odvětvích	10
	3.3 Žárový nástřik pístních kroužků	10
	3.4 Žárový nástřik synchronizačních kuželů převodovek nákladních automobilů	11
	3.5 Žárový nástřik dílů leteckých proudových motorů	11
	3.6 Žárový nástřik biokeramických materiálů	11
	3.7 Výhled a závěry	13
4	Shrnutí autorovy koncepce vědecké práce a výuky v daném vědním oboru	14
5	Seznam v textu citovaných publikací	15
	Autorovy přednášky na zahraničních institucích	16
6	Abstract	18

1 PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc. Ing. Oldřich AMBROŽ, CSc. se narodil 19. prosince 1939 v Říčanech u Brna. Po absolvování Jedenáctileté střední školy v Brně byl v roce 1957 přijat ke studiu na Fakultě strojní Vysokého učení technického v Brně, kterou úspěšně ukončil v roce 1962 na oboru tváření. Ještě v době studia na Fakultě strojní působil jako pomocná vědecká síla a později jako asistent s částečným úvazkem na katedrách Nauky o materiálu (u Prof. Osiny) a Obrábění (u Prof. Horáka). V pátém ročníku oborového studia byl zaměstnán na částečný úvazek (15 hod. týdně) ve Výzkumném ústavu tvářecích strojů (u Prof. Konečného).

Po desetileté praxi v ČKD Blansku, kdy získal praxi ve svařování korozivzdorných ocelí, ve svařování oběžných kol vodních turbin a ve svařování v ochranných atmosférách v podniku i na montáži, byl konkurzem přijat do Výzkumného ústavu 070 (k Prof. Bezděkovi a Prof. Cenkoví). Za dobu desetileté praxe ve VÚ 070 měl možnost se detailně seznámit s problémy svařování v armádě (svařování pancéřových ocelí, problematika praskavosti ocelových materiálů–pancířů, problematika opotřebení a životnosti pancířů, článků pásů apod.). Po získání zařízení pro navařování a žárové nástřiky v roce 1974 se začal definitivně a plně věnovat technologii žárových nástřiků, okrajově navařování, renovacím a opotřebením součástí. Lze říci, že pracoviště VÚ 070 patřilo v té době ke špičkově vybaveným pracovištím v ČSFR. Kandidátská disertační práce, kterou obhájil v roce 1974, představovala první ucelenou práci ve výzkumu parametrů plazmy s plynovou stabilizací v ČSSR. Kolem roku 1980 začal externě učit na Fakultě strojní VUT v Brně, katedře tváření, kde vyučoval ve cvičeních předmět technologii svařování.

Po jmenování docentem v roce 1982 konkurzním řízením přešel na místo docenta na plný úvazek na Fakultu strojní VUT v Brně, kde se později habilitoval (1994). Na fakultě zastával funkci vedoucího katedry tváření a několik funkčních období proděkana.

Na Fakultě strojní inženýrství nyní přednáší předměty Technologie svařování a tváření, Technologie a teorie svařování, Svařitelnost a Výrobní procesy. Je vedoucím výukového střediska ATB č. 2) s oprávněním pro výuku vyššího svářecího personálu (Evropských svářecích inženýrů, Evropských svářecích technologů a Evropských svářecích specialistů) v ČR a pro výuku Evropských stříkačů a Evropských stříkačů specialistů v ČR.

Má kvalifikaci s certifikací Evropského svářecího inženýra, kterou získal v České i Slovenské republice.

2 VĚDECKO–PEDAGOGICKÁ ČINNOST AUTORA

Pedagogická činnost a s tím velmi úzce spojená vědecko–výzkumná činnost autora plynule navázala po jeho přechodu na Fakultu strojní VUT v Brně v roce 1982, neboť již na Výzkumném ústavu VÚ 070 byl autor orientován na výzkum a vývoj ve svařování a v oblasti žárových nástřiků plazmou. Jmenujme alespoň vývoj pístních kroužků povrstvovaných molybdenem, dále vývoj synchronizačních kuželů nákladních automobilů povrstvovaných molybdenem a povrstvování dílů leteckého proudového motoru. Nejprve bylo nutno vybudovat přístrojové zázemí a vybavení. To se podařilo získáním výrobního zařízení – plazmového zařízení pro žárový nástřik plazmou švýcarské firmy PlasmaTechnik, typ PL A převodem na Fakultu strojní VUT v Brně, katedru tváření v roce 1984, tím byl položen základ výzkumu na Ústavu strojírenské technologie v oblasti žárových nástřiků a vytvořen základ a předpoklady výzkumu a výuky v následujících oblastech:

- 2.1 Sledování základních vlastností povlaků žárového nástřiku
- 2.2 Výzkum technologie nanášení biokeramických materiálů plazmou
- 2.3 Vybudování „čistého“ akreditovaného pracoviště pro povrstvování implantátů plazmou
- 2.4 Vybudování pracoviště žárových nástřiků pro služby zákazníkům využívajícím technologii žárového nástřiku kyslíko-acetylenovým plamenem a plazmou
- 2.5 Pedagogika PGS (CŽV)

Rozpracování technologie žárových nástřiků a pedagogika spolu velmi úzce souvisí, jak bude prokázáno později. A to vše dále ve spojení s výběrem diplomových prací studentů a výběrem témat prací v doktorském studiu.

2.1 SLEDOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ POVLAKŮ ŽÁROVÉHO NÁSTŘIKU

Po zmapování procesu povrstvování pomocí žárového nástřiku plazmou (parametry plazmy, parametry nanášených částic apod.) jsem orientoval svoji pozornost na vlastnosti povlaků žárového nástřiku. Ve středu mé pozornosti se ocitly především dvě základní obecné vlastnosti povlaků žárového nástřiku, které zásadním způsobem ovlivňují další funkční vlastnosti povlaků žárového nástřiku, a to jsou přilnavost těchto povlaků a jejich pórovitost [1]. Problematiku přilnavosti povlaků žárového nástřiku jsem současně studoval a rozpracoval i v rámci výzkumného záměru řešeného na Ústavu strojírenské technologie [2]. Výsledkem řešení byl návrh nové metody a metodiky zkoušky přilnavosti, zkoušky odstraňující stávající nedostatky zkoušky přilnavosti podle ČSN EN 582 [3].

2.2 VÝZKUM TECHNOLOGIE NANÁŠENÍ BIOKERAMICKÝCH MATERIÁLŮ ŽÁROVÝM NÁSTŘIKEM PLAZMOU

Ve spolupráci s firmou LASAK, s. r. o. zabývající se výrobou zubních kostních implantátů jsem rozpracoval technologii žárového nástřiku plazmou kovových zubních implantátů [4]. Tato technologie byla zvládnuta a je o ní pojednáno v práci [5].

2.3 VYBUDOVÁNÍ „ČISTÉHO“ AKREDITOVANÉHO PRACOVÍŠTĚ PRO POVRSTVOVÁNÍ IMPLANTÁTŮ

Výroba bioaktivních sklokeramických a keramických materiálů a dentálních implantátů, včetně plazmatického povlakování titanových implantátů, vyžaduje přesné dodržování výrobních předpisů, technologických návodů a hygienických opatření. Všechny tyto předpisy jsou obsaženy v dokumentu „Sanitární řád provozu Plazmadent Brno na Fakultě strojního inženýrství“. Podle rozdílné funkce jsou na jednotlivé prostory pracoviště kladeny rozdílné požadavky z hlediska zplodin a prachových částic. Provozní prostory jsou podle požadavků na čistotu rozděleny do 2 zón čistoty (pásmo K a D), které jsou na vstupech zřetelně vyznačeny [6].

Mimo to je zpracován Personální řád (osobní hygiena). Přílohu 1 tvoří Pracovní oděvy, Přílohu 2 tvoří Čisticí a dezinfekční prostředky, Přílohu 3 tvoří Čistění a dezinfekce pracovních oděvů, Příloha 4 je tvořena Hygienickými opatřeními – klimatizací a vzduchotechnikou.

Standardní operační postup obsahuje jednotlivé body postupu. Mimo jiné obsahuje tento postup, který se týká povrstvování implantátů, následující body:

- příprava implantátů k tryskání,
- tryskání implantátů,
- příprava implantátů pro plazmatický nástřik,
- plazmatický nástřik implantátů,
- kontrola implantátů po plazmatickém nástřiku,
- balení ošetřených implantátů,
- monitoring parametrů čistých prostorů,
- kontrola a údržba.

Zpracovaná řízená dokumentace vedla ke zpracování dokumentace číslo R – 05 – 99, kterou je Sanitární řád provozu Plazmadent Brno, což je vlastně certifikovaný dokument kontrolovaný SÚKL (Státní ústav pro kontrolu léčiv) [7]. Tento Sanitární řád předepisuje vstup a výstup osob a materiálu do a z kontrolovaných prostor a požadavky na dodržování hygienických opatření v prostorách plazmatického povlakování titanových implantátů na VUT v Brně. Přísná hygienická a zdravotnická opatření vedla k tomu, že vedle běžného („špinavého“) pracoviště bylo vybudováno ještě pracoviště „čisté“. Přísná hygienická opatření se pochopitelně vztahují i na zařízení, tedy plazmovou soupravu. Pochopitelně provozovat „čistou“ a „špinavou“ plazmovou soupravu, každou v ceně několika milionu korun, představuje značné finanční náklady, jejichž získání je velmi složité. Zvolili jsme tedy variantu napojení dvou plazmových hořáků („čistého“ a „špinavého“) [8] na jednu zdrojovou část, jednu regulační část a jedno plynové hospodářství. Tím jsme uspořili značnou část finančních prostředků.

2.4 VYBUDOVÁNÍ PRACOVÍŠTĚ ŽÁROVÝCH NÁSTŘIKŮ PRO SLUŽBY ZÁKAZNÍKŮM

V rámci výzkumného záměru je snaha vybudovat pracoviště pro žárový nástřik plazmou, které by sloužilo zákazníkům na základě jejich požadavků [9]. To vše u vědomí toho, že region okolí Fakulty strojního inženýrství má největší koncentraci stříkacích plazmových souprav prakticky ve střední Evropě. Nejednalo by se tedy o běžné požadavky, ale spíše o požadavky speciální. Realizované požadavky prací a zakázek by byly dokládány i certifikáty vlastnostmi povlaků, zejména přilnavostí a pórovitostí [10].

2.5 PEDAGOGIKA, PGS (CŽV)

Chápal jsem vždy vysokou školu jako zdroj stálého a kontinuálního poznání a z tohoto pohledu jsem na postgraduální studium také pohlížel. V prvních fázích byly kurzy PGS organizovány nahodile, podle toho, jak byl ze strany podniků zájem. Zpočátku to byly např. kurzy svařování, kurzy žárového stříkání a další kurzy postgraduálního studia [11].

Skutečným impulzem rozvoje celoživotního vzdělávání na Ústavu strojírenské technologie, odboru svařování přišel s rozpadem federace na Českou a Slovenskou republiku. Ve federativní republice zavedený systém vzdělávání svářečského personálu na všech úrovních se rovněž s rozpadem federace rozpadl a přestal být funkční. Bylo zásluhou České svářečské společnosti, že v České republice nastolila nový systém vzdělávání svářečského personálu, také již s ohledem na evropské struktury (po vstupu ČR do EWF a IIW). Takže ještě před vstupem ČR do Evropské unie čeští svářeči jsou již organizačně začleněni v EWF a IIW.

To má velký význam pro jednotné vzdělávání a certifikaci v celém světě a především v celé Evropě, které se odehrává prostřednictvím výuky v ATB (Autorizing Teaching Body) a ANB (Autorizing National Body) jednotně v celé Evropě [12]. V každé zájmové zemi Evropy je jedno ANB, které dohlíží na jednotnost a regulérnost výuky. V ČR jsou 4 ATB (na Fakultě strojního inženýrství VUT je ATB č. 2). Každé ATB může být certifikované pro různé kurzy, pro které získá akreditaci. Naše ATB č. 2 (Fakulta strojního inženýrství) má akreditaci pro provádění následujících kurzů:

- pro kurzy vyššího svářečského personálu (EWE, EWT, EWS),
- pro kurzy stříkání ES (evropský stříkač), ESS (evropský stříkač specialista).

A. „KURZY VYŠŠÍHO SVÁŘEČSKÉHO PERSONÁLU“

Kurzy EWE, EWT a EWS jsou v technické veřejnosti dostatečně známy a běží již několik roků [11].

B. „KURZY ŽÁROVÉHO STŘÍKÁNÍ“ [12]

Kurzy žárového stříkání je však třeba představit, protože zatím se od každého kurzu uskutečnil pouze jeden pilotní kurz. Žárové nástřiky a jejich aplikace, zejména žárový nástřik plazmou, patří mezi high-tech technologie a jako významný proces jsou zahrnuty do nomenklatury Evropské svářečské federace (EOTC Agreement Group for Welding, Joining, Cutting and Surfacing). Pro výuku, zkoušení a certifikaci žárového stříkání byly dosud přijaty dva dokumenty:

- Doc. EWF 459 – 01 Evropský specialista pro žárové nástřiky (ETSS – European Thermal Spraying Specialist)
- Doc. EWF 507 – 01 Evropský žárový stříkač (ETS – European Thermal Sprayer)

Zatímco v kurzech ETSS, jejichž platnost je od 1. 6. 1995 a jejichž cílem je připravit technický personál pro funkce mistrů, technologů, instruktorů a odborného dozoru na pracovištích žárových nástřiků, je v kurzech ETS, jejichž platnost je od 1. 1. 1998, cílem příprava pracovníků v manuálních profesích. Teoretická výuka v těchto kurzech je doplněna širokou přípravou praktickou.

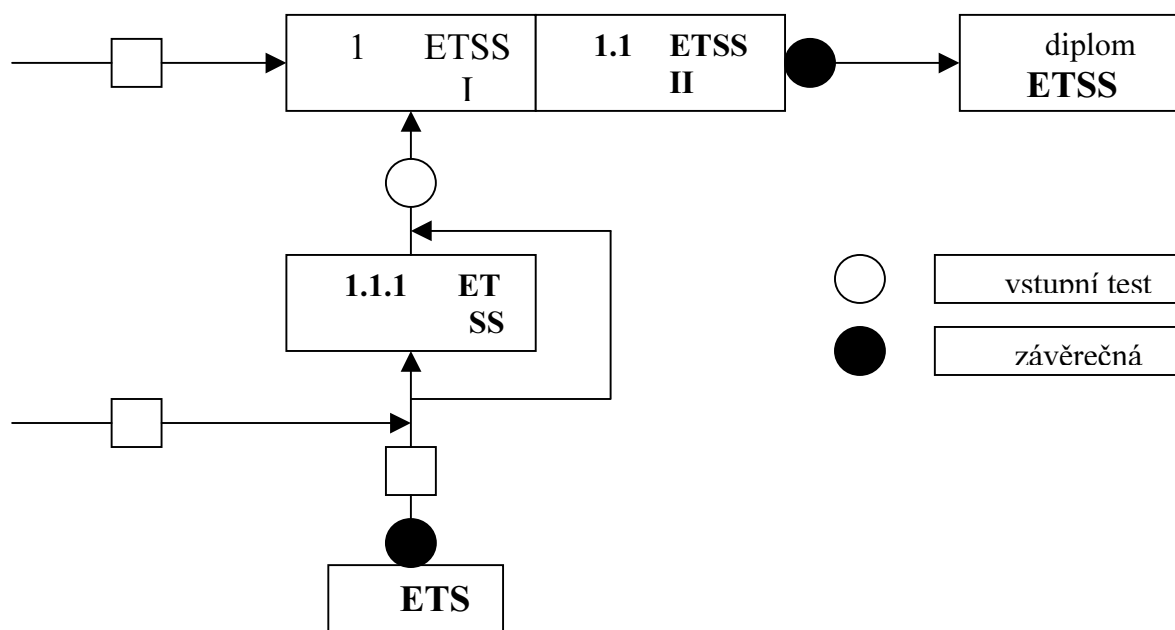
Jednou z prvních zemí, kde se začal kurz „Evropský specialista pro žárové nástřiky“ vyučovat, je Německo (SLV – v Mnichově).

Obsah studia k získání diplomu ETSS je ukázán na následujícím schématu:

		Počet hodin
ETSS 0	Přípravná část (pro vstup 2, 3)	40
ETSS I	Teoretická výuka	
	1. Procesy žárových nástřiků a jejich vliv na životní prostředí	26
	2. Výběr přídavného materiálu a mechanismus vazby	19
	3. Proces nástřiku povlaku a ochrana zdraví při práci	19
	4. Měření vlastností povlaků a dokumentace	19
	5. Využití ve strojírenství a management kvality	25
	celkem	108
ETSS II	Praktický výcvik	
	6. Praktický výcvik a demonstrace jednotlivých procesů	28
	7. Zkoušky	4
	Celkem modul I a II	140

Vstupní podmínky do kurzů: Kurzy jsou chápány jako postgraduální s internátní formou výuky. Do kurzu se může přihlásit uchazeč jednou ze tří cest, jejíž kritéria si každá z členských zemí EWF určuje sama, obr. 1.

Struktura kurzu



Obr. 1 Schéma přístupu do kurzů ETSS

3 VYUŽITÍ NÍZKOTEPLNÍ PLAZMY PŘI VYTVÁŘENÍ POVLAKŮ ŽÁROVÉHO NÁSTRÍKU

3.1 ÚVOD

Intenzivní rozvoj strojírenského, chemického, textilního průmyslu, přístrojové a raketové techniky, rozvoj klasické i jaderné energetiky vedou k používání stále kvalitnějších a různorodějších materiálů. Klasické materiály i přes hledání cest a možností zvyšování jejich technologických možností jsou v některých případech na hranici jejich použitelnosti [13]. V drtivé většině případů se vždy se jedná o povrchové vlastnosti těchto materiálů.

Metod pro vytváření vrstev a povlaků je celá řada, ne všechny jsou však vyhovující danému účelu. V posledním desetiletí prodělala prudký vývoj technologická metoda vytváření povlaků žárovým nástřikem plazmou. Ať se jedná o jakékoliv poškození součástí, můžeme téměř vždy toto poškození hodnotit jako poškození povrchové, které tak dalo vzniknout novému oboru – povrchovému inženýrství [14]. Jako obor se povrchové inženýrství vyznačuje interdisciplinárním charakterem. Např. přídavné materiály používané pro vytváření povlaků a velikost jejich částic lze stanovit buď na základě zkušeností, nebo výpočtem ze základů znalosti termodynamiky, a to podle vztahu, kdy velikost těchto částic se stanoví z rovnice nestacionární tepelné vodivosti pro tuhou sférickou částici, umožňující vypočítat velikost částic ze vztahu pro d_{\max} částice. Po získání zařízení pro žárový nástřik plazmou jsme považovali za vhodné nejdříve stanovit základní parametry plazmy (plazmového paprsku – jeho teplotu, rychlost, chemickou aktivitu prostředí apod.). Tvarová analýza částic přídavného materiálu (částic prášku) byla např. provedena šetřením pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu, která se ukázala jako nejvýhodnější (EŘM – JSM – U3 při urychlovacím napětí 25 kV) [15]. Dále byla provedena analýza teplotních a rychlostních poměrů v plazmovém paprsku a rychlostních poměrů nanášených částic práškového přídavného materiálu. V tomto případě nás zajímala především teplota plazmového paprsku jeho prostředí a dopadová rychlost nanášených částic [16]. Z literárního průzkumu je zřejmé, že jednoatomové plazmové plyny dávají vyšší teplotu plazmy při jejím menším tepelném obsahu (entalpii). Podle KIRNERA [17] je pořadí použitých plazmových plynů směrem k vyšší teplotě plazmových plynů následující: helium, argon, dusík a vodík. Pro experimentální stanovení teploty plazmového paprsku bylo použito spektrální metody a sice na základě intenzity a rozšíření spektrálních čar určitého plynu nebo kovu. Zvolil jsem pro určování teploty plazmy spektrální metodu využívající jak čárového, tak i spojitého spektra vyzařovaného plazmou [17]. Spektrální metody mají tu výhodu, že neporušují podmínky vytékání plazmy a nezpůsobují deformaci plazmového paprsku během vlastního měření. Pro měření byl použit spektrometr ISP – 22, kterým byla zachycena oblast spektra s jeho délkou 250 až 500 nm. Měření středních teplot plazmy Ar + H₂ bylo provedeno pomocí rozšíření spektrální čáry H_β silným Starcovým jevem. Bylo zjištěno, že u plazmového paprsku stabilizovaného Ar + H₂ byla jeho střední teplota až 21 000 °K. V případě stabilizace plazmového plynu dusíkem pak teplota plazmy kolem 16 000 °K. Pro měření rychlostních poměrů v plazmovém paprsku byla použita metoda dvou rotujících kotoučů a jako kontrolní metoda, metoda pomocí rychlostní kamery typ PENTAZET 16 A [18]. Naměřená rychlost částic molybdenu ve vzdálenosti reálného nástřiku, tj. asi 120 mm, byla asi 170 m.s⁻¹. rychlosti plazmy se v případě plazmového plynu Ar + H₂ dosahují až 2000 m.s⁻¹ a v případě N₂ téměř 1600 m.s⁻¹. Tato druhá metoda ovšem umožňovala měřit pouze rychlost částic nanášeného materiálu a tím byl opět zvolen molybden. Získané výsledky experimentů a zmapování procesu stříkání nám umožnily je lépe využít v jednotlivých strojírenských oblastech.

3.2 APLIKACE PLAZMY VE VYBRANÝCH PRŮMYSLOVÝCH ODVĚTVÍCH

Vlastní využití plazmy ve vybraných průmyslových odvětvích se naskýtal v následujících oblastech:

- žárový nástřik funkčních ploch pístních kroužků plazmou,
- žárový nástřik funkčních ploch synchronizačních kuželů převodovek nákladních automobilů plazmou,
- žárový nástřik funkčních ploch dílů leteckých proudových motorů plazmou kovy a keramikou,
- žárový nástřik kostních implantátů plazmou keramikou.

Každá citovaná oblast nese s sebou celou řadu dalších problémů, které je potřeba řešit pro splnění cílů realizace povrstvování dané součásti. Tyto oblasti budou popsány a diskutovány v jednotlivých oblastech aplikací.

3.3 ŽÁROVÝ NÁSTŘIK PÍSTNÍCH KROUŽKŮ

Žárový nástřik pístních kroužků je prováděn přídavnými materiály převážně na bázi čistého molybdenu, případně jsou tyto přídavné materiály povrchově upravovány jiným způsobem, např. syceny kyslíkem. Teprve v posledním období se používají i jiné práškové přídavné materiály na bázi keramiky, případně cermetů. Cílem pístních kroužků vyráběných s povlaky je zvýšení jejich životnosti a zlepšení jejich tribologických vlastností, zejména v podmínkách mezního tření [8]. Vzhledem k povaze povlaku molybdenu jsou aplikační možnosti nástřiku molybdenu dány především vlastnostmi naneseného povlaku nástřiku. V tomto případě musí povlak molybdenu splňovat následující požadavky:

- relativně vysoké hodnoty tvrdosti povlaku,
- dobré třecí vlastnosti v podmínkách mezního tření,
- nízká oxidace molybdenového povlaku.

Další vlastnosti povlaků molybdenu jsou tedy: drsnost povrchu povlaku molybdenu po nanesení byla $R_a = 0,9$ až $1,19 \mu\text{m}$.

Tvrdost vrstvy tvrdého chromu (pokud je použit): v tloušťce 60 až $150 \mu\text{m}$ je 971 až 1299 jednotek HM20

Mikrotvrdost nástřiku byla 971 HM20, při pórovitosti 9,42 %.

Používají se i pístní kroužky s jinými povlaky, např. s cermetem $\text{Mo} + \text{Cr}_2\text{C}_3$.

Očekávané vlastnosti pístních kroužků s povlaky Mo:

- makrotvrdost povlaku HV1 :394 jednotek
- mikrotvrdost povlaku HM 20 :762jednotek
- pórovitost povlaku Mo : 7,77
- nespojení povlaku s materiálem podložky: 14,6 %
- využití přídavného materiálu: 59,2 %
- součinitel kluzného tření: 0,0968

Přilnavost povlaku molybdenu měřená metodou DIN 50 160, na podložce vyrobené z materiálu 422420 byla $20,6 \pm 3,5 \text{MPa}$.

3.4 ŽÁROVÝ NÁSTŘÍK SYNCHRONIZAČNÍCH KUŽELŮ PŘEVODOVEK NÁKLADNÍCH AUTOMOBILŮ

Další součásti, u kterých se vyžadují specifické (dobré tribologické vlastnosti), jsou synchronizační kužele převodovek nákladních automobilů. Tyto kužele zajišťují synchronizaci řazení a bývají také vyráběny jako povlakované molybdenem [20]. I v tomto případě se používá povlaků žárového nástřiku molybdenem, který stačí nanášet kyslíko–acetylenovým plamenem. Tato technologie je zavedena v TATŘE KOPŘIVNICE a povrstvování se provádí na povrstvovacím automatu právě žárovým nástřikem kyslíko–acetylenovým plamenem.

Než bylo odzkoušeno a zavedeno žárové stříkání funkčních ploch synchronizačních kuželů, bylo nástřikáno více než 4000 kusů těchto kuželů poloprovozně. Po zvládnutí technologie byly tyto dílce stříkány bez opracování – na hotovo. Poslední synchronizační kužele byly vyráběny s drážkami v molybdenovém povlaku (za účelem zlepšení přívodu maziva).

V posledním období byly také povrstvovány i synchronizační kužele pro převodovky osobních automobilů T603 a T613.

3.5 ŽÁROVÝ NÁSTŘÍK DÍLŮ LETECKÝCH PROUDOVÝCH MOTORŮ

Žárový nástřik dílů leteckých proudových motorů patří do poněkud jiné problematiky. Tato problematika je odlišná od předcházející nejméně ve dvou směrech. Za prvé se jedná o velmi tenké plechové součásti (vyrobené z tloušťky plechu přibližně 1,0 mm) a za druhé namáhání těchto součástí je odlišné od namáhání pístních kroužků a nebo synchronizačních kuželů. Také důsledky poškození povlaků na součástech proudových motorů vedou ke zcela jiným závěrům než v předcházejících případech [22].

V tomto případě součástí přistupují ještě k vlastnímu nanášení, které se uskutečňuje kovovými (NiCrAlY) a keramickými ($ZrO_2 + Y_2O_3$) přídatnými materiály specifické podmínky provozu, jako jsou horká koroze povrstvovaných dílů, přilnavost nanesených povlaků a další. Tyto povlaky jsou obvykle nazývány tepelnými bariérami.

3.6 ŽÁROVÝ NÁSTŘÍK BOKERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Žárový nástřik plazmou je prováděn na kovové korpusy z titanové slitiny Ti 6 Al 4 V po jejich přípravě obvyklé pro žárový nástřik [23]. Pro dosažení reprodukovatelných vlastností povlaku žárového nástřiku biokompatibilního keramického materiálu – hydroxyapatitu (dále HAP) a určité minimální mechanizace je povrstvování žárovým nástřikem plazmou mechanizováno. Za tím účelem jsou dentální implantáty nasazeny na čepech, viz obr. 2, a tyto čepy jsou vloženy do válcových držáků a v tomto stavu jsou implantáty na speciálním polohovadle povrstvovány v sadách po 20 kusech implantátů. Žárový nástřik keramiky plazmou je prováděn parametry uvedenými v tabulce 1.

Tabulka 1 Parametry žárového nástřiku HAP plazmou povrstvovaných dentálních implantátů

Parametr žárového nástřiku plazmou HAP	Velikost parametru
Plazmový proud I_p [A]	500
Plazmový plyn Ar Q_p [l/min]	13
Plazmový plyn N_2 Q_p [l/min]	37
Vzdálenost nástřiku l [mm]	50
Dopravní plyn Ar q_d [l/min]	0,8
Stupeň podávání HAP [dítky]	85
Otáčky polohovačla [ot/min]	85

Implantát představuje vlastně umělý kořen. Umělý kořen vrůstá postupně do čelisti a po třech měsících se do spodní a po šesti se do horní čelisti vhojí. Na umělý kořen (nástavec) nasadí pak lékař umělý porcelánový zub, který je nejen uměleckým, ale i výrobně náročným produktem. Jeho životnost je na doživotí. Nitrokostní dentální implantáty jsou tedy umělé kosti, které po vhojení převezmou přes korunkovou náhradu žvýkací funkce ztraceného zubu. Implantologie v zubním lékařství v současné době představuje aktuální a dynamicky se rozvíjející obor. Implantologie znamená pro ošetřujícího lékaře nové pojetí a nové metody v rekonstrukční stomatologii. S nápadem implantace přišel asi před 20 lety Švéd BRENNE-MARK [24]. Zubní protéza dokázala sice vrátit podobu zdravého chrupu i zdravé sebevědomí, ale představovala pouze zdání dokonalosti. Zavedení implantátu znamená zavedení nástavce do čelistní kosti. Nástavec je podobný šroubu a představuje vlastně umělý kořen, což otevírá nové možnosti aplikací.

Popsaný postup se zdá velmi jednoduchý. Představuje však velmi složitý a různorodý komplex řešení medicínských, ale i technických problémů. Implantologický systém IMPLA-DENT [24] vyvinutý společností LASAK spol. s r. o. je rotačně symetrický dvoufázový systém pro pozdní implantaci se svojí vlastní filozofií a navazuje na poznatky v tomto oboru.

Již dříve bylo také uvedeno, žárový nástřik dentálních implantátů plazmou musí probíhat tak, aby nanesený povlak byl velmi čistý nejen po stránce chemického složení, ale také po stránce mechanických nečistot. V praxi to znamená, že žárový nástřik musí probíhat ve velmi



Obr. 2 Pohled na implantáty nasazené na čepech



Obr. 3 Pohled na dva tvary implantátu šroubový a válcový

čistém prostředí, v němž obsah prachových částic se musí pohybovat v počtu několika částic v m^3 . S tímto cílem bylo vybudováno v prostorách Fakulty strojního inženýrství velmi čisté pracoviště splňující tyto požadavky. Zařízení a vybavení tohoto pracoviště si vyžádalo finanční náklady v hodnotě více jak 1 milion Kč, které do akce investovala firma LASAK spol. s r. o. Impladent je vyráběn z biokompatibilní titanové slitiny Ti 6 Al 4 V, jenž je pro uvedenou indikaci osvědčeným materiálem a odpovídá ASTM F 136. Intraosseální část implantátu má buď válcový tvar, který je opatřen bioktivním povlakem hydroxyapatitu s označením (WHA), nebo má tvar šroubový. U šroubového tvaru je možno volit buď tvar povlakovaný hydroxyapatitem (dále HAP) s označením (SHA) nebo typ nepovlakovaný s označením (STI). Implantáty mají průměr 3,6 mm a délky 6, 8, 10, 12 a 14 mm, viz obr. 3. Válcový tvar implantátu zajišťuje dokonalé rozložení mechanických napětí na celém povrchu implantátu i při vysokém provozním namáhání. Šroubový design implantátu zlepšuje zejména primární stabilitu implantátu.

Dva různé povrchy implantátu, válcový a šroubový design umožňují implantologicky činnému lékaři diferencovanou a pro každého pacienta individuálně volenou terapii a dostatečné množství variant při analýze, indikaci a volbě implantátu. Na obr. 3 je vidět dva základní tvary zubních implantátů s různým designem povrchů (šroubový a válcový).

Výsledkem vývojové fáze je implantát ve dvou tvarových obměnách, který je považován za výrobek blízký praxi, vyhovující ve všech technických detailech mezinárodnímu konsensu v požadavcích na materiál a design.

Na pracovišti žárových nástřiků Ústavu strojírenské technologie byl žárový nástřik plazmou realizován po úvodních experimentech a na základě zkušeností již delší dobu a ve spolupráci s firmou LASAK. Při vytváření povlaků žárovým nástřikem plazmou je používán HAP ve formě prášku s velikostí částic v rozmezí 0,056 až 0,162 mm. Tato velikost částic HAP byla volena z důvodu dokonalého prohřátí a protavení částic v plazmovém paprsku.

3.7 VÝHLED A ZÁVĚRY

Uchazeč se zabývá z odborného hlediska dlouhodobě technologií žárových nástřiků plazmou. Je zřejmé, že tato technologie se bude rozvíjet dále a bude zasahovat do stále většího okruhu problematiky a součástí. Bude nacházen stále větší počet součástí, u nichž bude tato technologie využívána a uplatňována.

Škola technologie žárových nástřiků založena na FSI VUT v Brně má své pokračovatele ve studentech bakalářského a magisterského studia a dále ve studentech studia doktorského.

Za období, kdy se uchazeč zabývá žárovými nástřiky, je možno konstatovat, že byl v podstatě přítomen a nebo se sám podílel v jednotlivých časových obdobích na všech významných vývojových etapách. Jmenujme alespoň vývoj povrstvovaných pístních kroužků vznětových motorů, vývoj synchronizačních kuželů převodovek nákladních automobilů a vývoj povrstvovaných dílů proudových leteckých motorů. Pouze v oblasti implantátu bylo uspokojeno na 5 000 žadatelů o dentální implantáty.

4 SHRNU TÍ AUTORO VY KONCEPCE V ĚDECKÉ PRÁCE A V ÝUKY V DAN ĚM V ĚDN ÍM OBORU

Autor staví na vyváženosti vědecké práce založené na výzkumu a vývoji v oblasti žárových nástřiků a aplikaci této technologie v praxi a pedagogické aplikaci této technologie. Je to významné z toho důvodu, že nová krev v aplikaci této technologie (diplomové práce, doktorské) jsou zárukou trvalého pokračování, rozvoje a návaznosti technologie povrstvování technologií žárových nástřiků. Od roku 1974 je systematicky vytvářena a rozvíjena škola technologie žárových nástřiků v Brně a na FSI VUT. K tomu také směřuje instalace akreditovaného pracoviště pro výuku žárových nástřiků.

Je zřejmé, že i běžná technologie svařování nemůže zůstat opomenuta, protože Fakulta strojního inženýrství a studenti této fakulty musí dostat alespoň základní znalosti z technologie, svařovacích a stříkacích zařízení.

V současné době je aktuálním trendem v oblasti žárových nástřiků vedle dosažení nejvyšší reprodukovatelnosti a dosažení řízení stříkacího procesu instalace více pistolí i různých typů (HVOF, plazma) s možností jejich rychlého vzájemného přepínání.

5 SEZNAM V TEXTU CITOVANÝCH PUBLIKACÍ

[1] Ambrož, O.: New quality in testing of adhesivity and porosity of thermal spraying of coating. In. Sborník (Proceedeng of the international conference) „The human factor and its enviroment“, Lisbon, Portugal, 19/20 July, 1999, p. 199.

[2] Ambrož, O., a kol.: Rozvoj progresivních vysoce přesných strojírenských technologií. Výzkum vlastností povlaků žárového nástřiku. Výzkumný záměr UST MSM 2621 00003 (CZ 300003/22011), 24. listopadu 2001.

[3] ČSN EN 582: Žárové stříkání – Stanovení přilnavosti v tahu, ČNI, 1995.

[4] Ambrož, O. a kol.: Výzkum vlastností povlaků žárového nástřiku hydroxyapatitu pro použití na kostní implantáty. Zpráva grantového úkolu č. F – 19 – 85 (dílčí za rok 1995), VUT v Brně, leden 1996.

[5] Ambrož, O., Riedl, I.: Sanitární řád provozu Plazmadent Brno na FSI, Příloha 1 (Pracovní oděvy), Příloha 2 (Čistící a desinfekční prostředky), Příloha 3 (Čištění a desinfekce pracovních oděvů), Příloha 4 (Hygienická opatření odsávání a vzduchotechnika), Praha Lasak – VUT v Brně, 1999.

[6] Lasak Praha: Dokumentace k povrstvování kostních implantátů (číslo dokumentace R 05 99). Praha 1999.

[7] Ambrož, O.: Vzdělávání nových svářečských techniků. In.seminář: Pokyny pro zavedení norem řady ČSN EN 729 1 až 4 a ČSN EN 719, 23. 9. 1996, ČSvSp Praha, Zelený pruh.

[8] Ambrož, O.: Spojení „čisté“ a „špinavé“ plazmy. Úprava pracoviště pro povrstvování kostních implantátů. Ústav strojírenské technologie, odbor svařování a povrchových úprav. FSI VUT, 1999.

[9] Kubíček, J., Ambrož, O.: Vzdělávání odborného personálu pro žárové nástřiky a jejich v oboru ocelových konstrukcí. In: Sborník: Technické požadavky na ocelové konstrukce, Technický dozorcí spolek, Luhačovice, hotel Fontána, 16.–21.březen 2001, s. 80.

[10] Ambrož, O.: Výchova a vzdělávání vyššího svářečského personálu na VUT FSI. In. Sborník: Mezinárodní vědecko–pedagogická konference „Význam a uplatnění progresivních technologií ve strojírenské výrobě“. Brno, FSI VUT, 8.–9. 10. 1996, s. 176.

[11] Ambrož, O., Kubíček, J.: Budování ATB pro vzdělávání personálu v oblasti žárových nástřiků. In. Sborník: „Welding 2000“ BVV Brno, říjen 2000.

[12] Ambrož, O.: Dokument EWF 459 – 01 (Evropský specialista pro žárové nástřiky). Osnovy kurzu ETSS. ČSvSp 1991.

[13] Pilous, V.: Vysokopevné mikrolegované jemnozrné oceli a jejich svařitelnost. Pracovní tým VS, a. s.–strojírenské dílny Plzeň, Plzeň 1999.

[14] Ambrož, O., Kašpar, J.: Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. 1. vydání. SNTL Praha, 1990.

[15] Humár, A., Ambrož, O.: Možnosti soustružení plazmatických nástřiků. Strojírenství 34, 1984, č. 8, s. 423.

[16] Ambrož, O., Kašpar, J.: Stanovení rychlosti plazmy a nanášených částic přídavného materiálu při termickém nástřiku plazmou. Zváranie 29, 1980, č. 5, s. 132.

[17] Kirner, K.: Maschinenmarkt 82, 1976, č. 52, s. 936.

[18] Ambrož, O., Kašpar, J.: Stanovení rychlosti plazmy a nanášených částic přídavného materiálu při termickém nástřiku plazmou. Zváranie 29, 1980, č. 5, s. 132.

[19] Ambrož, O., Kašpar, J., Kovář, V.: Zlepšování parametrů synchronizace vozů TAT-RA pomocí nekonvenčních technologií. Tatra Kopřivnice, únor 1982.

[20] Kašpar, J., Ambrož, O.: Expertíza poškozených, žárově stříkaných pístních kroužků motorů 10 TNB a UDT. 20. květen 1983, ZVS Martin.

[21] Kašpar, J., Ambrož, O.: Využití plazmových nástřiků jako ochranných povlaků a tepelných bariér proti vysokým teplotám. In. Sborník: „Navařování a žárovými nástřiky k úsporám materiálu“, Ostrava 4.–6. 6. 1985, s. 28.

[22] Ambrož, O. a kol.: Výzkum vlastností povlaků žárového nástřiku hydroxyapatitu pro použití na kostní implantáty. Zpráva grantového úkolu č. F – 19 – 85 (dílčí za rok 1995), VUT v Brně, leden 1996.

[23] Ambrož, O., Riedl, I.: Sanitární řád provozu Plazmadent Brno na FSI, Příloha 1 (Pracovní oděvy, Příloha 2 (Čistící a desinfekční prostředky), Příloha 3 (Čištění a desinfekce pracovních oděvů), Příloha 4 (Hygienická opatření – odsávání a vzduchotechnika). Praha Lasak – VUT v Brně, 1999.

[24] Je libo implantát?: Příloha Právo 5. 8. 1995, s. 10.

AUTOROVY PŘEDNÁŠKY NA ZAHRANIČNÍCH INSTITUCÍCH

1. Ambrož, O., Kašpar, J.: Thermal plasma spraying. In. Sborník 17th International school of welding „SURFACING, RENOVATION AND REPAIR BY WELDING AND ALLIED PROCESSES“, Tatranská Lomnica, 7.–18. 10. 1985, s. 191–200.
2. Ambrož, O., Kašpar, J.: Kluzné vlastnosti bronzových vrstev nanesených metodami žárového nástřiku. In: Sborník z V. konference „KOŁOQIUM TRIBOLOGICNE“, Czestochova – Podlesice Polsko, 8.–1. 9. 1986.

3. Ambrož, O., Krejčová, J.: Determination of the adhesive and cohesive fracture modes of the adhesive tensile test. In. Sborník „ITSC 92“. Orlando Florida USA, 28.5.–5. 6. 1992, p. 982.
4. Ambrož, O.: Termický nástřik plazmou v prostředí sníženého tlaku a v ochranné atmosféře. Přednáška na Polytechnice Czestochovské, 30. 9. 1987.
5. Ambrož, O.: New conception to determination of adhesivity and porosity of thermal spraying coatings. In. Sborník přednášek „20. MEZINÁRODNÍ SVÁŘEČSKÝ KONGRES“, Vysoké Tatry – Stará Lesná, hotel Academia, ISBN 80–88734–35–05, 31. 5.–2. 6. 1999, s. 226–234.
6. Ambrož, O.: New quality in testing of adhesivity and porosity of thermal spraying coatings. In. Proceeding of the international conference „THE HUMAN FACTOR AND ITS ENVIROMENT“, Lisbon, Portugal, 19.–20. July 1999, p. 199-211.
7. Ambrož, O., Kašpar, J.: Exploring the friction characteristics of plasma spraying coatings. In. Sborník „1st PLASMA – TECHNIK SYMPOSIUM“, Lucern, Švýcarsko, 18.–20. 5. 1988, 2. díl, p. 37–46.
8. Kašpar, J., Ambrož, O.: Plasma spray coatings as thermal barriers based on zirconium oxide with ittrium oxide. In. Sborník „1st PLASMA – TECHNIK SYMPOSIUM“ Lucern, Švýcarsko, 18.–20. 5. 1988, 2. díl, p. 155–166.
9. Ambrož, O.: Využití optimalizace parametrů v termickém nástřiku plazmou. Koreferát přednesený na 8. Fachtagung „THERMISCHES SPRITZEN“, Lipsko NDR, 5.–6. 12. 1985 (není ve sborníku).
10. Ambrož, O.: Issledovaniye napjaženij i poddžržanija ugleroda v martenzite vysokopročnoj stali. Příspěvek na 7. mezinárodní vědecké technické konferenci „NAUKA O KOVECH A TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ“ Plovdiv, Bulharsko, 28.–30. 5. 1986, předneseno jako diskusní příspěvek.
11. Ambrož, O., Kašpar, J.: Utilization of thermal spray techniques in renovation. In. Sborník 20th International school of welding „REPAIRS AND RENOVATIONS BY WELDING AND ALLIED PROCESSES“, The High Tatras – Tatranská Lomnice, 31. 9.–11. 10. 1989, p. 67–75.
12. Ambrož, O., Kašpar, J.: Some technical and economical aspects of the tensile adhesion tests of the plasma thermal spraying coatings by means of the method „in situ“. In. Sborník „12th ITSC 89“ Londýn, Velká Britanie, 4.–6. 6. 1989, Volume 2, p. 46.
13. Ambrož, O., Kašpar, J.: Physical – chemical changes in the deposit materials during plasma thermal spraying proces. In. Sborník „2ND PLASMA – TECHNIK SYMPOSIUM“, Lucern, Švýcarsko, 5.–7. 6. 1991, II. díl, s. 197.
14. Ambrož, O., Kašpar, J.: Creating of coating by thermal spraying methods and their utilization in production and renovation. In. Sborník „24 th INTERNATIONAL SCHOOL OF WELDING“ (Welding problems todays production), Tatranská Lomnice, 18.–24. 10. 1992, s. 65–73.

15. Ambrož, O., Dobeš, P.: Verschleisswiderstand plasmagespritzten Cr_2O_3 – Schichten. In. Sborník konference „THERMISCHE SPRITZKONFERENZ TS 93“, Aachen, SRN, 3.–5. 3. 1993, s. 222–224.
16. Ambrož, O.: The contribution to determination of the adhesion of the thermally sprayed coatings. In. Sborník „PRE-ASSEMBLY SYMPOSIUM of 47th Annual Assembly of IIW“, 1.–2. September, Dalian, China. příspěvek č. 58, p. 300.

6 ABSTRACT

Oldřich AMBROŽ (born in Říčany u Brna, in the Czech Republic) graduated from the Faculty of Mechanical Engineering of the Technical University of Brno in 1963, specializing in engineering technology and majoring in forming technology. He completed a course of post-graduate studies of welding at the Slovak Technical University in Bratislava and in the Research Institute for Welding in Bratislava under the tutelage of Prof. Čabelka (1964–1965). He was awarded the European Welding Engineer (EWF) certificate in 1999. For 19 years he worked industrial jobs and in research as a welding technologist and welding specialist. Since 1972 he has been involved in problems of thermal spraying, plasma coating in particular. While working in the industry he solved problems of thermal spraying of working surfaces of piston rings for compression-ignition engines, synchronization cones of gear boxes for automobile and aircraft engines. He dealt with problems of thermal spraying also in his dissertation work „Properties of molybdenum coating by plasma spraying“ submitted in 1978. Since 1982 he has been working at the faculty of Mechanical Engineering of Brno University of Technology. Among the appointments he has had are those of Associate Professor, Head of the Department of Forming, and Vice–Dean. Since 1990 he has been in charge of the Welding and Surface Treatment section of the Institute. More recently, his scientific activity has focused on the investigation of the properties of coatings produced by plasma spraying, in particular their adhesion and porosity. This is also reflected in the solution of a research project solved by the Institute of Manufacturing Technology and of problems of applying coatings to bone implants, dental implants in particular, in which field he cooperates with a Czech company.

He held the office of Chairman of the Czech Welding Society (1989–2000). During his tenure of office the Czech welding community became a fully fledged member of the European Welding Federation (EWF) and of the International Institute of Welding (IIW). He is a member of the American Association of the Engineering Societies, of the New York Academy of Sciences USA, and Deputy Chairman of the Editorial Board of the journal *Zváranie – Svařování*. For over 10 years he has been the chairman of the jury for Gold Medal Awards within the International Engineering Trade Fair in Brno. At the Faculty of Mechanical Engineering he teaches in the following subjects of Bachelor and Master Studies: Technological processes, Material weldability, Theory and technology of welding, and Special welding technologies. He is on the Boards of Examiners for State Final Examinations at all the Czech technical universities. He is a supervisor of the doctoral students in the field of manufacturing technology, welding specialization.

The present thesis gives a complex view of the author's work in one area of thermal spraying, namely the production of coated dental implants of titanium.



Doc. Ing. Oldřich Ambrož, CSc., nar. 1939 v Brně, absolvent Fakulty strojní Vysokého učení technického v Brně v roce 1963, oboru „Strojírenská technologie“, zaměření tváření. V posledním ročníku studia na VUT působil jako asistent na katedrách Nauky o materiálu (u Prof. Osiny) a obrábění (u Prof. Horáka). V 5. ročníku studia byl zaměstnán ve Výzkumném ústavu tvářecích strojů (u Prof. Konečného). Po nástupu do praxe (ČKD Blansko, Orličan Choceň) absolvoval postgraduální studium svařování na SVŠT a VÚZ v Bratislavě (1963–1964) u Prof. Čabelky zakončené závěrečnou prací na téma „Prošetření možností svařování elektrodami E558 za studena s následující vhodným tepelným zpracováním“. 19 let pracoval v průmyslové praxi, z toho 10 let ve Výzkumném ústavu VÚ 070 u Prof. Bezděka a Prof. Cenka. Kandidátská disertační práce na téma „Vliv technologických parametrů na vlastnosti plazmaticky nanášených vrstev na bázi molybdenu“ uzavřela jeho studijní období žárových nástřiků. Od té doby se datuje jeho odborný profil – technologie žárových nástřiků.

Je jmenovaným docentem (1982) v oboru strojírenská technologie a habilitoval se úspěšným obhájením habilitační práce (1994) na téma „Tepelně zbarvené reakce probíhající v průběhu žárového nástřiku exotermických přídavných materiálů.“

Několik funkčních období vykonával funkci proděkana fakulty a vedoucího katedry tváření, od roku 1994 působí ve funkci vedoucího odboru svařování a povrchových úprav. Působí jako docent na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Jako předseda České svářečské společnosti je členem European Welding Federation (EWF) a International Institute of Welding (IIW) a tím také zástupcem za Českou republiku v těchto mezinárodních organizacích. Byl jedním ze zakladatelů jednotného systému vzdělávání svářečského personálu všech odborných úrovní a jeho zapojení do evropských a světových struktur.

Je držitelem Českého národního certifikátu svářečského inženýra (WE) č. 7013/98, držitelem Slovenského národního certifikátu svářečského inženýra (WE) č. E-27/97 a držitelem certifikátu Evropského svařovacího inženýra (European Welding Engineer) č. EWE – SK – 97027.

Přednáší předměty: Technologie tváření a svařování, Teorie a technologie svařování a Svařitelnost ve studiu bakalářském a magisterském a je školitelem doktorandů v oboru „Strojírenská technologie“, zaměření svařování.