



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**SYSTÉMY OHŘÍVÁNÍ PRACOVNÍHO PLYNU U
TECHNOLOGIE KINETICKÉHO NANÁŠENÍ**

PROCESS GAS HEATING SYSTEMS IN COLD SPRAYING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Babinský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Čížek, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Tomáš Babinský**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Čížek, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Systémy ohřívání pracovního plynu u technologie kinetického nanášení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie kinetického nanášení je úplnou novinkou ve sféře povrchového zpracování pokročilých materiálů. Jednou z výhod této technologie jsou relativně nízké procesní teploty - vysokotlaký pracovní plyn (helium, dusík, vzduch) je při pokojové či středně zvýšené teplotě (do 1000°C) vháněn do Lavalovy trysky s průtoky až 1500 l/min.

Na rozdíl od generačně starších technologií (plasma spray, HVOF, flame spray) není ohřívání pracovního plynu u této technologie prováděno za účelem roztavení částic nanášeného materiálu, ale vede k dalšímu zvýšení kinetické energie částic díky změnám viskozity a tlaku pracovního plynu.

Cíle bakalářské práce:

- seznámit studenta s technologií kinetického nanášení (cold spray), jejími přednostmi a nevýhodami, komerčními výrobci technologie
- seznámit se s obecnými systémy ohřívání plynů v jiných (industriálních) procesech
- seznámit se se systémy ohřívání plynů u systémů cold spray
- vypracovat literární rešerši shrnující výše uvedené poznatky

Seznam literatury:

Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., Fomin, V. (2006): Cold Spray Technology. Elsevier Science, San Francisco.

Fukanuma, H., Huang, R. (2009): Thermal Spray 2009: Expanding Thermal Spray Performance to New Markets and Applications. Proceedings of the International Thermal Spray Conference, Las Vegas, USA, p.267-272.

Blose, R. E., Roemer, T. J., Mayer, A. J., Beatty, D. E., Papyrin, A. N. (2003): Automated Cold Spray System: Description of Equipment and Performance Data. Proceeding of Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology (ASM International), Orlando, USA, pp.103-111.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je představit systémy ohřívání pracovního plynu u technologie kinetického nanášení. Hlavní částí práce je popis používaných způsobů ohřevu vysokotlakého plynu v současné praxi kinetického nanášení a představení komerčních produktů. Část práce se věnuje vlivu teploty pracovního média na charakteristiky povlakovacího procesu. Závěrečná kapitola shrnuje způsoby ohřevu plynu v jiných průmyslových aplikacích pro jejich potenciální využití u technologie kinetického nanášení.

Klíčová slova

povlakování, kinetické nanášení, cold spray, cold spray systém, teplota plynu, depoziční okno, ohřev plynu, ohřívač plynu

Abstract

The goal of this bachelor's thesis is to present ways of gas heating used in the cold spray technology. Primarily the work is focused on description of currently-used techniques of high-pressure gas heating in cold spray and introduction to commercial products. Part of the work is dedicated to the gas temperature influence on the coating process. Gas heating methods in various industrial applications are summarized in the final chapter for potential use in cold spray technology.

Keywords

deposition, coating process, cold spray, cold gas-dynamic spray, cold spray system, gas temperature, deposition window, gas heating, gas heater

Bibliografická citace

BABINSKÝ, T. *Systémy ohřívání pracovního plynu u technologie kinetického nanášení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Čížek, Ph.D.

Prohlášení o původnosti práce

Čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Systémy ohřívání pracovního plynu u technologie kinetického nanášení* vytvořil samostatně pod vedením Ing. Jana Čížka, Ph.D. s využitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

.....
V Brně dne

.....
Tomáš Babinský

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mne po celou dobu studia materiálně a duševně podporovali v dobrém i zlém a vždy za mnou neochvějně stáli. Můj dík dále patří vedoucímu práce panu Ing. Janu Čížkovi, Ph.D., a to nejen za věcné připomínky a rady, ale především za přátelský a otevřený přístup.

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Kinetické nanášení.....	12
2.1 Obecný popis.....	12
2.1.1 Fyzikální podstata.....	12
2.1.2 Vliv teploty.....	16
2.1.3 Výhody a nevýhody KN ve srovnání s TS, použití KN.....	20
2.2 Povlakovací systémy.....	24
2.2.1 Typy povlakovacích systémů.....	24
2.2.2 Komerční systémy.....	26
2.2.2.1 Řada Kinetiks®2000.....	26
2.2.2.2 Řada Kinetiks®4000.....	26
2.2.2.3 Řada Kinetiks®8000.....	27
2.2.2.4 ASB-2000-2.....	28
2.2.2.5 VRC Gen III Hybrid High-Pressure Hand-Held Cold Spray System.....	28
2.2.2.6 Impact Spray System 5/8.....	29
2.2.2.7 Impact Spray System 5/11.....	30
2.2.2.8 DYMET® model 423.....	30
2.2.2.9 Tryskací zařízení SD-6.....	31
2.2.2.10 Kinetic Metallization™ system.....	32
2.2.2.11 PCS-800.....	32
2.2.2.12 PCS-1000.....	33
2.3 Systémy ohřívání.....	33
2.3.1 Způsoby ohřevu.....	33
2.3.2 Komerční ohříváče.....	39
2.3.2.1 Linspray®.....	39
2.3.2.2 Kinetiks™ HT300/17.....	40
2.3.2.3 Kinetiks™ HT300/30.....	41
2.3.2.4 Ohříváč K-Tech.....	42
3 Ohřev plynu v jiných průmyslových aplikacích.....	43

3.1	Cívkové a kabelové ohřívače.....	43
3.2	Topné patrony.....	44
3.3	Bubnové ohřívače.....	44
3.4	Ponorné ohřívače.....	45
3.5	Trubkové ohřívače.....	45
3.6	Potrubní ohřívače.....	46
3.7	Pásové ohřívače.....	47
3.8	Ohřívače MULTICELL™.....	47
3.9	Cirkulační ohřívače.....	48
4	Závěr.....	49
	Seznam použité literatury.....	50
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	54
	Seznam tabulek.....	58
	Seznam ilustrací.....	59

1 Úvod

Výhody použití nánosu povlaků na tělesech byly objeveny již na počátku 20. století. První vlaštovkou byl patent Schoopovy metalizace, která sloužila k povlakování kovových nádob pro přepravu tekutin zinkem a cínem, což nádobě dodalo protikorozi vlastnosti. V průběhu století byly metody postupně zdokonalovány a rovněž byly vynalézány metody nové, a tak v dnešní době lze pro konkrétní aplikace vybírat z celé škály metod, které se přizpůsobí požadavkům zákazníka.

Kinetické nanášení nebo také cold spray je poměrně novou, progresivně se vyvíjející metodou povrchového zpracování materiálů, resp. nanášení povlaků na substrát. Specifikem odlišujícím ji od termálních metod nanášení jsou relativně nízké procesní teploty – pracovní plyn pod vysokým tlakem (obvykle vzduch, dusík nebo helium) nese prášek materiálu nánosu při teplotách v rozsahu 20–1000 °C. Principem vzniku vazeb mezi povlakem a substrátem je přeměna kinetické energie na energii plastické deformace, která vede k deformaci částic. Případný ohřev plynu, potažmo částic tedy nevede k tavení a změně skupenství materiálu nánosu, ale k dalšímu urychlení částic proti substrátu.

V této práci bude nejprve představena technologie kinetického nanášení, bude popsán vliv teploty pracovního plynu na kvalitu procesu a uvedeny výhody a nevýhody ve srovnání s termálními metodami povlakování. Dále budou představeny typy povlakovacích systémů, včetně představení komerčních produktů. Hlavní částí práce bude popis způsobu ohřevu v ohřívačích pracovního plynu u metody kinetického nanášení a představení dostupných komerčních ohřívačů pro tuto metodu. V poslední části práce budou prezentovány způsoby ohřevu plynu, které se vyskytují v industriálních aplikacích.

Tato práce předpokládá potenciální využití při stavbě povlakovacího systému kinetického nanášení, resp. při volbě a instalaci ohřívače. Zvláštní pozornost si zaslouží kapitoly věnované vlivu teploty na proces povlakování a způsobům ohřívání. K širšímu pochopení použití konkrétních typů ohřívačů poslouží poslední kapitola práce, která se věnuje popisu různých typů ohřívačů, které se používají k ohřevu plynu v průmyslu. Úkolem této kapitoly práce je získání širšího povědomí o typech a aplikaci různých ohřívačů při různých podmínkách. Na základě získaných poznatků bude v závěru provedena diskuze nad volbou ohřívače, resp. kompletního způsobu ohřevu pracovního plynu v budovaném povlakovacím systému.

2 Kinetické nanášení

2.1 Obecný popis

2.1.1 Fyzikální podstata

Technologie kinetického nanášení je dynamicky se rozvíjející technologie nástřiku povlaků. Materiál povlaku je ve formě jemných práškových částic unášen nosným plynem. Tato směs je urychlena v Lavalově trysce proti substrátu a depozicí částic vzniká výsledný nástřík. [1]

Termín „kinetické nanášení“ (dále KN) odkazuje na principiální odlišnost od vysokoteplotních metod nanášení (v zahraniční literatuře souhrnně označovaných jako „thermal spray methods“, dále TS) – KN užívá v kontrastu s těmito metodami takových teplot pracovního plynu, které nevedou k roztavení částic povlaku, nýbrž ke zvýšení jejich kinetické energie. Odkazem na nižší teploty pracovního plynu v porovnání s „thermal spray“ metodami je ve vědecké komunitě rovněž rozšířeno zjednodušené pojmenování „cold spray“. V anglicky psané literatuře se dále užívají názvy „cold gas-dynamic spray“ nebo „kinetic cold spray metallization“. V češtině jsou rozšířena pojmenování jako „nizkoteplotní kinetické naprašování“, „studená kinetizace“, nebo „nizkoteplotní nástřík“.

Technologie byla objevena a poprvé úspěšně testována v polovině 80. let 20. století vědci z Institutu Teoretické a Aplikované Mechaniky Ruské Akademie Věd v Novosibirsku vedeným Dr. Anatolijem Papyrinem. K objevu cold spray došlo náhodou při zkoumání erozivních vlastností objektů vystavených dvoufázovému proudění (použit plyn He + částice Al). Pevné částice byly unášeny nosným plynem, který byl v aerodynamickém tunelu urychlen Lavalovou tryskou na nadzvukovou rychlost za teplot nižších, než je teplota tání pevných částic rozptýlených v plynu. [2]

Bylo zjištěno, že při dosažení konkrétního rozsahu rychlosti proudění se pevné částice k povrchu začínají „přilepovat“; kinetická energie částic umožní rozsáhlou plastickou deformaci částic a jejich mechanické spojení s povrchem ve formě povlaku. Pokud není dosaženo kritické rychlosti dopadu částic, částice se od povrchu substrátu odráží, při těsně podkritické rychlosti dochází na povrchu proudu vystavenému tělesa k erozi.

Po překročení kritické hodnoty nastává ústup podílu eroze ve prospěch plastické deformace a postupné tvorbě nového povrchu na substrátu. Příčinou je přeměna kinetické energie částic na energii plastické deformace; plastická deformace je základním mechanismem procesu. Částice se při střetu s povrchem substrátu plasticky deformují, čímž vzniká lokálně stav smykové nestability, který „upevní“ nanášené částice k substrátu. Přeměna části kinetické energie na energii elastické deformace je nežádoucím, ale nevyhnutelným jevem. Pokud se nepodaří při srážce využít dostatečný podíl energie jako plastickou deformaci, částice se od povrchu (elasticky) odráží. Jinými slovy povlak nevzniká, pokud akumulovaná elastická energie je dostatečně velká k překonání práce sil pojících částice k substrátu. Tuto skutečnost lze vyjádřit rovnicí

$$O_e = U_e - E_{ad}, \quad (2.1)$$

kde O_e je energie odrazu, U_e je energie elastické deformace a E_{ad} je energie adheze v soustavě částice–substrát. Z rovnice vyplývá, že pokud je elastická energie menší než energie adheze, nemůže dojít k uvolnění energie odrazu (byla by záporná). [3]

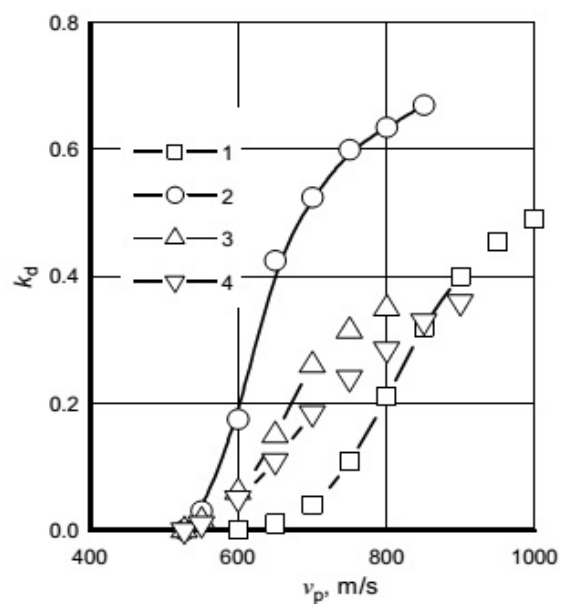
Na styčné ploše částic se substrátem dochází kvůli částečné přeměně kinetické energie na tepelnou k lokálnímu adiabatickému ohřevu částic. Pokud je teplota dostatečně vysoká, částice se mohou vlivem tepla změkčit, resp. natavit, a stejně tak i substrát. Když se ohřátý materiál ochladí a opět tuhne, vznikají vazby mezi částicemi substrátu a prášku a vzniká povlak. Se zvyšováním rychlosti prášek k substrátu lépe přilne, povlak se stává hustějším a proces je celkově efektivnější. Od určitého bodu ale již další zvýšení rychlosti (řádově jde až o násobky 10^3 m/s) substrát opět vystavuje extenzivní erozi. [1][4][5] Různým materiálům povlaků přitom odpovídají různé kritické hodnoty rychlostí a tudíž i různé přechody mezi erozí substrátu a tvorbou povlaku, resp. tvorbou povlaku a opětovnou erozí. To je ovlivněno faktory, mezi něž patří např. hustota, tvar a velikost pevných částic práškového materiálu, teplota, tlak a molární hmotnost pracovního plynu, bow-shock efekt. KN se daří úspěšně aplikovat především na tvárné materiály (prášek i substrát), v dnešní době se rozšiřuje aplikace i pro kovové kompozity, polymery nebo keramiky. [3][6]

Úspěšnou aplikaci KN na povrchy a efektivitu nanášení zaručíme vedle dosažení minimálně hodnoty kritické rychlosti proudění také vhodnou optimalizací parametrů procesu pro danou kombinaci prášek–substrát. Ovlivnitelnými činiteli procesu jsou vzdálenost substrátu od povlakovací zbraně, tlak a teplota nosného plynu, složení nosného plynu, typ a geometrie trysky. Vliv na kvalitu a efektivitu procesu mají také termomechanické a materiálové vlastnosti prášku, resp. nanášeného povlaku – teplota tání, tvrdost, tažnost, hustota, deformační zpevnění, mez pevnosti v tahu/tlaku, zvláštní pozornost je třeba věnovat parametrům velikosti a tvaru částic. [2][5][7] Jako měřítko úspěšnosti nánosu je zavedena veličina k_d , vyjadřující míru efektivitu nánosu (depozice). Určíme ji ze vztahu

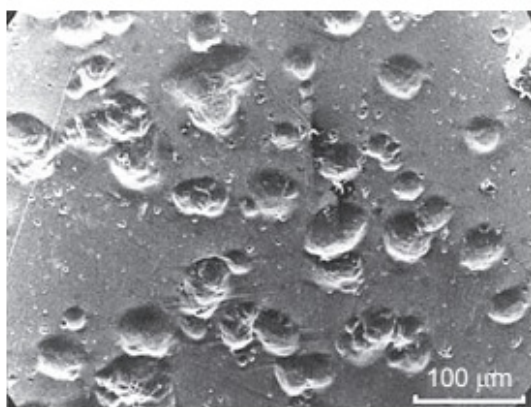
$$k_d = \frac{\Delta m_s}{M_p}, \quad (2.2)$$

kde Δm_s vyjadřuje změnu hmotnosti substrátu a M_p celkovou hmotnost všech částic interagujících se substrátem. Závislost efektivitu k_d na rychlosti prášku při povrchu substrátu v_{pi} pro různé materiály zobrazuje obr. 2.1. Graf slouží spíš pro ilustraci než pro reálné vykreslení účinnosti v dnešních zařízeních; v dnešní době jsou ve světě cold spray hodnoty $k_d < 95$ % považovány za neefektivní.

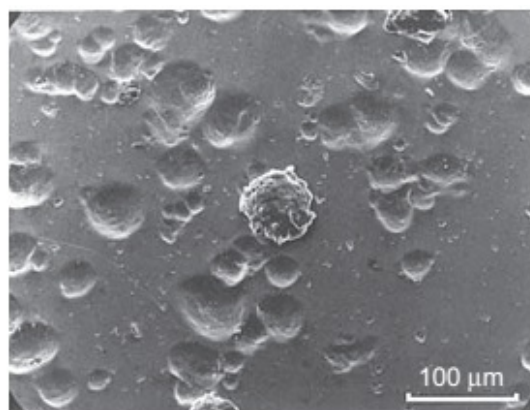
Pokusem bylo jednoznačně dokázáno, že nejdůležitější roli pro výsledné vlastnosti nového povrchu má rychlost dopadu částic na povrch substrátu, která se pohybuje podle materiálu mezi 200–1200 m/s. [1] Vystavíme-li například měděný substrát urychlenému proudu částic hliníku, při různých rychlostech těchto částic můžeme pozorovat různou odrazivost částic, jak můžeme vidět na obr. 2.2. Z SEM snímků je patrné, že nižší rychlosti částic mají za následek odraz částic od substrátu, přičemž za sebou zanechávají malé krátery. S postupně vzrůstající rychlostí částic lze sledovat čím dál tím menší počet kráterů a zároveň větší počet částic, které úspěšně přilnuly k povrchu. Rozhodující je rovněž materiál substrátu. Tyto parametry jsou voleny s ohledem jednak na požadovanou kvalitu a jakost povrchu, jednak na ekonomičnost procesu. [1][8]



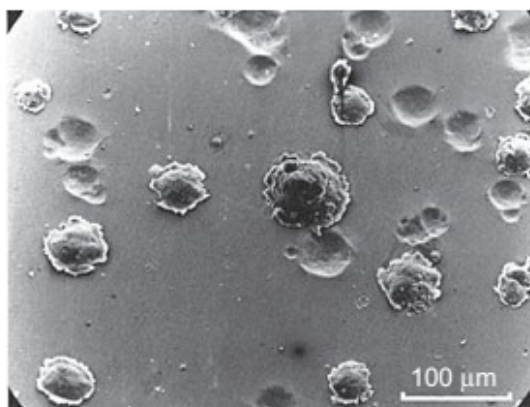
Obr. 2.1. Efektivita povlakování na rychlosti částic prášku pro (1) Al; (2) Co; (3) Ni; a (4) Zn (médium směs vzduch–He za pokojové teploty) [1]



(a)



(b)

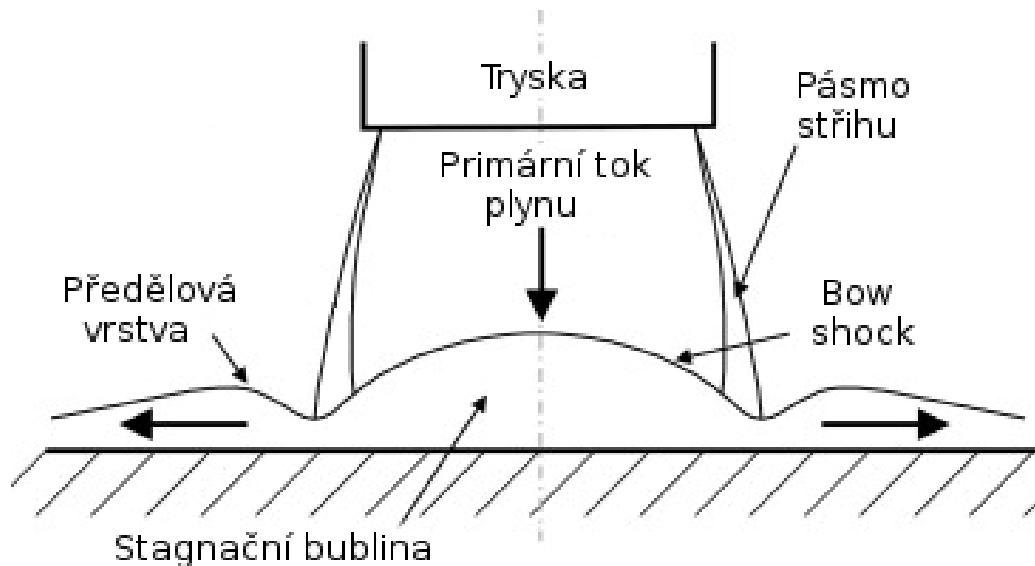


(c)

Obr. 2.2. Vyleštěný měděný substrát po interakci s hliníkovým práškem o průměrné velikosti částic 30,2 μm při rychlostech částic (a) 730 m/s; (b) 780 m/s; a (c) 850 m/s [1]

Odražené částice pevné fáze a plynu jsou příčinou jevu známého jako bow-shock efekt. Jde o rázové vlny, které vznikají jako důsledek nárazu na substrát. Mrak rychle letících částic po odrazu vytváří v závislosti na vlastní rychlosti, vzdálenosti trysky od substrátu, geometrii povlakovaného tělesa a úhlu dopadu částic předělovou plochu různých tvarů, z nichž nejtypičtější je lukovitý tvar (odtud bow-shock efekt), jak je patrné z obr. 2.3. Oblast předělu se vyznačuje skokovou změnou vlastností, zejm. tlaku, a velmi intenzivní interakcí nově dorazivšího proudu s proudem odraženým. Odražený proud (tedy jak plyn, tak i částice) se střetává s proudem přicházejícím od trysky směrem na substrát. V důsledku je odražený proud zabrzděn silnějším protiproudem, ale především ochuzuje tento proud o kinetickou energii, čímž jej zpomaluje v pohybu vůči substrátu. Postupné hromadění částic, jejichž odrazová vzdálenost se zmenšuje, před substrátem vede ke vzniku stagnační bubliny pod rozhraním. Ve stagnační bublině jsou letící částice vystaveny velkému gradientu odporových sil, což v důsledku vede u částic s mírně nadkritickou rychlostí ke snížení pod kritickou hodnotu; tyto částice pak nejsou schopny se dostatečně plasticky deformovat a přilnout k povrchu, namísto toho povrch jen bombardují. Na mocnost bow-shock vrstvy má největší vliv vzdálenost trysky od substrátu; podle vlivu můžeme tyto rozdělit do 3 oblastí: [1][9]

1. oblast – převládá bow-shock efekt, který významně snižuje dopadovou rychlost částic
2. oblast – bow-shock vymizel nebo je nevýznamný, při těchto vzdálenostech dochází k neefektivnějšímu povlakování
3. oblast – zásadní vliv mají odporové síly prostředí, které zpomalují plyn oproti částicím prášku



Obr. 2.3. Schematický popis bow-shock vrstvy (podle [9])

Bow-shock efekt je třeba při optimalizaci procesu brát v potaz. Jev lze minimalizovat významnějším překročením kritické rychlosti, která zaručí účinnější přeměnu kinetické energie v plastickou deformaci, resp. vyšší efektivitu povlakování a tím i menší počet odražených částic. V kapitole 2.1.2 bude ukázáno, že skrze kritickou rychlost se jedná o jev tepelně podmíněný.

S výjimkou velmi tenkých povlaků lze proces nanášení rozdělit do 2 fází:

1. nanášení první vrstvy částic na substrát
2. růst povlaku

V první fázi je povrch omílán proudem částic za vzniku specifického mikoreliéfu; částice prášku a substrát se vzájemně deformují, ale k tvorbě povlaku nedochází, dokud není povrch substrátu deformován natolik, že vyžaduje menší aktivační energii k vytvoření nových vazeb na atomární úrovni. Další odrazy částic zvyšují chemickou aktivitu v povrchové vrstvě substrátu, vznikají zde koncentrace dislokací, které posléze slouží jako nukleační centra pro chemickou interakci částic prášku se substrátem. V druhé fázi již dochází k růstu povlaku vrstvu po vrstvě ve formě splatů. Srážky částic mají v druhé fázi odlišný charakter od první fáze – zatímco v první fázi dopadají částice na nedeformovaný substrát, v druhé fázi částice dopadají na deformovaný mikoreliéf tvořený již úspěšně nanesenými částicemi téhož materiálu. 1. fázi lze obejít překonáním druhé kritické rychlosti v_{cr2} , která zaručuje okamžitou adhezi s žádným, resp. zanedbatelným zdržením. Deformace substrátu první vrstvou je typická pro interval ohraničený oběma kritickými rychlostmi.

Nosný plyn, který strhává a následně „doručí“ pevné částice na substrát, má různé složení. Pro nástřiky lehkých kovů postačuje stlačený vzduch, pro běžné, středně náročné nástřiky se používá dusík, příp. jeho směs se vzduchem či heliem. Pro náročnější aplikace a vyšší požadavky na kvalitu se používá helium, příp. argon; použití inertního plynu sice umožňuje pracovat s nižšími teplotami, což sice rozšiřuje množství materiálů, které lze použít, je ale cenově náročné.

Urychlení částic probíhá vstřikováním prášku částic do procesního plynu, který v Lavalově dýze dosahuje nadzvukových rychlostí. Podle místa vstřiku prášku do trysky rozlišujeme dvě metody KN:

- vysokotlaké KN (z anglického high pressure cold spray, HPCS)
- nízkotlaké KN (low pressure cold spray, LPCS)

V případě vysokotlakého KN je prášek vstříknut přímo do hrdla trysky s přiváděným vysokotlakým plynem, v případě nízkotlakého KN je prášek vstříknut do divergentní části trysky, v níž je plyn vlivem expanze v dýze pod nižším tlakem. HPCS pracuje s tlaky vyššími než 1,5 MPa, průtoky vyššími než 2 m³/min a topným výkonem alespoň 18 kW. Používá se pro nanášení čistých kovových prášků. LPCS pracuje s plynem stlačeným na přibližně 0,5–1 MPa, průtoky 0,5–2 m³/min a výkonem zpravidla 3–5 kW. Využívá se pro nanášení směsí kovových a keramických prášků, je typické pro přenosné povlakovací zbraně. [1][8][10]

2.1.2 Vliv teploty

Podle studie Assadiho *et al.* [8] lze vlastnosti povlaku určit jako funkce bezrozměrného parametru η , který bývá označen jako parametr kvality nanášení nebo také kvocient dopadové rychlosti částic. Parametr je určen podle vztahu

$$\eta = \frac{v_{pi}}{v_{cr}} \quad (2.3)$$

jako poměr rychlosti částic při dopadu v_{pi} ku kritické rychlosti v_{cr} nutné k úspěšnému

vytvoření povlaku. Pokud $v_{pi} > v_{cr}$, tedy $\eta > 1$, dochází ke vzniku vrstvy povlaku. Hodnota η se musí pohybovat v rozmezí $<1;2>$. Je-li hodnota blízká 1, povlak vykazuje špatnou přilnavost k povrchu a malou efektivitu nánosu. Zároveň poskytuje poměrně úzkou šíři velikosti částic, které lze úspěšně nanést; zvýšením teploty se ale tento interval zvyšuje (3,6–50 μm při 25 °C, 1,6–100 μm při 300 °C). Při $\eta > 2$ je rychlost částic již příliš vysoká, dosahuje druhé kritické hodnoty v_{eroze} , a dochází k erozi, jak bylo zmíněno v kapitole 2.1.1. Splnění těchto podmínek, reprezentovaných výběrem η z množiny $<1;2>$, indikuje oblast tzv. depozičního okna, určující oblast vzniku povlaku. Depoziční okno je de facto grafickým vyjádřením parametru η . Poskytuje základní informace o požadovaných parametrech procesu a může být s výhodou použito k optimalizaci těchto parametrů. V tabulce 2.1 je uveden vliv klíčových materiálových a procesních parametrů na rychlost v_{pi} a v_{cr} .

Tabulka 2.1. Vliv materiálových a procesních parametrů na dopadovou a kritickou rychlost. $\uparrow$ značí nárůst, $\downarrow$ značí pokles, $\updownarrow$ značí proměnlivé chování hodnoty rychlosti s růstem dané charakteristiky (podle [8])

Parametr	Vliv na v_{pi}	Vliv na v_{cr}
Částice		
Teplota tání	...	$\uparrow$
Tepelná kapacita	...	$\uparrow$
Tvrdost	...	$\uparrow$
Hustota	$\updownarrow$	$\downarrow$
Velikost	$\updownarrow$	$\downarrow$
Plyn		
Teplota	$\uparrow$	$\downarrow$
Tlak	$\uparrow$	...
Tryska		
Délka	$\uparrow$	...

Ze vztahu (2.3) je patrné, že žádoucí je zvýšení dopadové rychlosti a/nebo snížení rychlosti kritické. Alespoň jednu z těchto podmínek splňuje délka trysky, teplota a tlak pracovního plynu. V případě hustoty a velikosti částic je vliv na v_{pi} proměnlivý – v určitém intervalu hodnot rychlost v_{pi} roste, dále pak klesá. Vliv teploty tání, tepelné kapacity a tvrdosti částic na v_{pi} , stejně jako tlaku plynu a délky trysky na v_{cr} je zanedbatelný. Z tabulky 2.1 vyplývá, že nejlépe „povlakovatelnost“ ovlivňuje teplota pracovního plynu, jež současně zvyšuje v_{pi} a snižuje v_{cr} . Teplota pracovního plynu tedy rozšiřuje depoziční okno, což rozšiřuje i spektrum použitelných materiálů. Základním předpokladem je, že se teplota částic zvyšuje společně s rostoucí teplotou nosného plynu. Pokud nelze tento fakt při daných podmínkách zaručit, či je ohřev částic zanedbatelný, nemá smysl vliv teploty uvažovat. [8][11]

Předpoklad závislosti rychlosti částic na jejich teplotě vychází ze znalostí mikrofyzikálních materiálových vlastností použitého materiálu. Molekuly o vyšší

teplotě jsou termodynamicky méně stabilní, než molekuly o nižší teplotě; kmitají kolem svých rovnovážných poloh rychleji a jsou tak blíže „přeskokům“ do jiných poloh. Dá se tedy čekat, že částice o vyšší teplotě budou dosahovat vyšších rychlostí, potažmo kinetických energií.

Zrychlení, resp. zpomalení částic plynem je omezeno odporovou silou prostředí vůči letící částici povlaku. Podle Wallise lze letovou rychlost částice v_p získat řešením diferenciální rovnice silové rovnováhy [12]

$$v_p \cdot \frac{dv_p}{dz} = \frac{3}{4} \cdot C_d \cdot \frac{\rho \cdot (v - v_p) \cdot |v - v_p|}{\rho_p \cdot d_p}, \quad (2.4)$$

zatímco rychlost proudícího plynu v lze vyjádřit z Bernoulliho rovnice pro nekonzantní hustotu jako funkce rychlosti zvuku v daném plynu a Machova čísla:

$$v = a \cdot M = (\kappa \cdot r \cdot T)^{1/2} \cdot M. \quad (2.5)$$

Z rovnice je patrné, že rychlost nosného plynu je úměrná odmocnině z jeho teploty.

Odvození podle Assadiho *et al.* [8] analyticky ukazuje vliv teploty plynu na dopadovou rychlost. Rovnice

$$v \approx v_1 = \left(c_1 + \frac{D_t - c_1 \cdot D_t}{D_e} \right)^n \cdot a_t \quad (2.6)$$

definuje vztah pro rychlost plynu v , kdy c_1 a n jsou parametry procesního plynu závislé na Poissonově konstantě κ . Vztah platí pro libovolnou teplotu stagnace plynu T_0 , Poissonovu konstantu $\kappa = 1,1 \div 2,1$ a expanzní poměr $3 \div 16$. Rovnice

$$v_p \approx v_2 = f \cdot \left(\frac{1}{v_{max}} + \frac{1}{v_1} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

definuje rychlost částic za letu v_p jako konvoluce maximální dosažitelné rychlosti částic (při dané geometrii, velikosti částic a tlaku) v_{max} a přibližné rychlosti plynu v_1 , kdy f je kalibrační koeficient, uvažovaný jako kompenzační člen analytického řešení vůči reálnému stavu. Kvůli bow-shock efektu nemůže být rychlost v_p považována za totožnou s dopadovou rychlostí částic v_{pi} . Využitím rovnice (2.4) pro zpomalení částic dané bow-shock efektem lze upravit rovnici (2.7) na tvar

$$v_{pi} \approx v_3 = v_2 \cdot \left(1 + \frac{\rho_0 \cdot \delta}{\rho_p \cdot d_p} \right)^{-1}, \quad (2.8)$$

kde δ je charakteristická tloušťka okrajové vrstvy bow-shock efektu. Ze stavové rovnice plyne funkční závislost $p = f(p, T)$, kterou lze do rovnice (2.8) dosadit. Dopadová rychlost částic je fyzikálně důležitá také z toho důvodu, že jejím doprovodným jevem je zvýšená tažnost málo deformovatelných materiálů, což pozitivně ovlivňuje úspěšnost adheze. [11] Kritickou rychlost dopadu částic v_{cr} stanovili Schmidt *et al.* vztahem [13]

$$v_{cr} = k_1 \cdot \left[c_p \cdot (T_m - T_p) + 16 \cdot \frac{\sigma}{\rho_p} \cdot \left(\frac{T_m - T_p}{T_m - 293} \right) \right]^{1/2}, \quad (2.9)$$

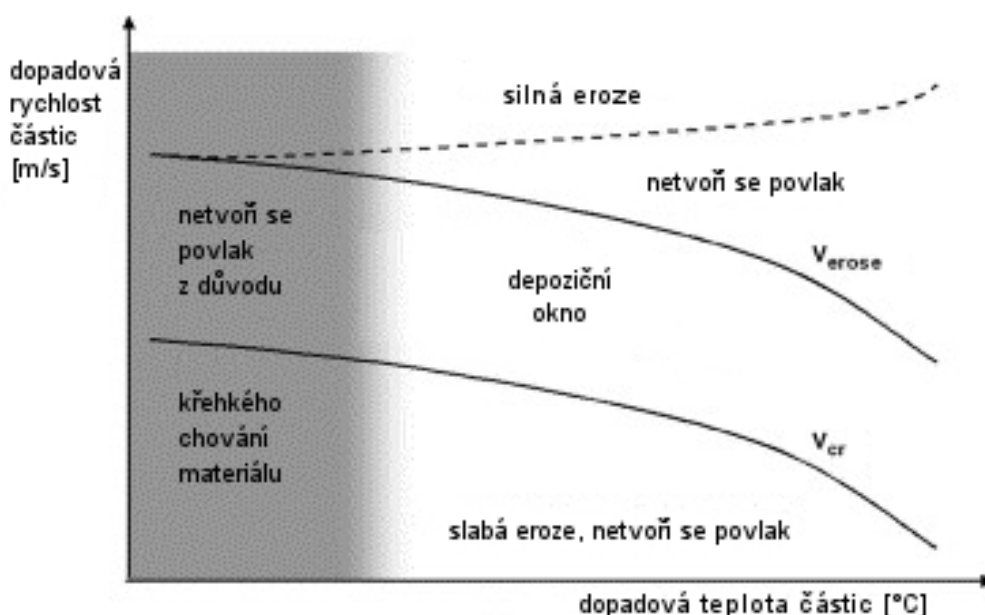
kde k_1 je velikostní faktor částic. Z fyzikálního hlediska dochází k poklesu kritické

rychlosti z důvodu tepelného změkčení částic, které tak k úspěšné fixaci na substrát potřebují nižší energii. Z rovnice je patrné, že vedle teploty má významný vliv také velikost částic. Úpravou rovnice (2.9) a dosazením rovnice (2.8) stanovili Assadi *et al.* [8] rovnici pro parametr kvality nánosu η :

$$\eta \approx \left[\frac{v_{cr}^{ref}}{a_{ref}} \cdot \left(\frac{d_p}{d_p^{ref}} \right)^{-0,18} \cdot \left(1 - \left(\frac{T_{pi}}{T_m} \right) \right)^{1/2} \cdot \left(1 + 0,32 \cdot \left(\frac{C_d \cdot L_d \cdot p_0 \cdot (1+\kappa)}{\rho_p \cdot d_p \cdot \kappa \cdot R \cdot T_0} \right)^{1/2} \right) \cdot \left(1 + \frac{p_0 \cdot \delta}{R \cdot T_0 \cdot d_p} \right) \right]^{-1}, \quad (2.10)$$

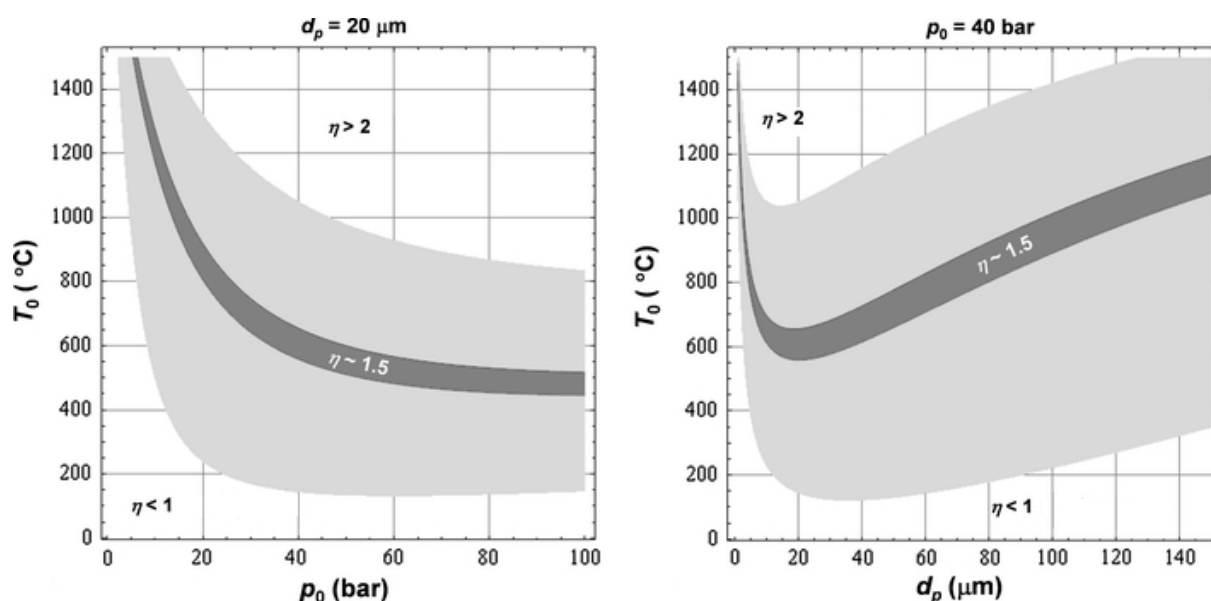
kde referenční hodnoty jsou teoreticky určené hodnoty veličin pro danou kombinaci nosný plyn–prášek–typ trysky, které jsou v rovnici zahrnuty za účelem minimalizace odchylky od reálného stavu.

Přírůstek η je více ovlivněn nárůstem dopadové rychlosti částic než snížením kritické rychlosti dopadu. Rozdíl je tím větší, čím menší jsou částice. Se zvýšením teploty nosného plynu mají rozsah hodnot parametru η i průměru částic d_p vzestupný trend, což značí nárůst hustoty a přilnavosti nánosu, pevnosti povlakované vrstvy a pokles porozity. [8][14]



Obr. 2.4. Depoziční okno v rovině dopadová rychlost–teplota částic (podle [13])

Pro zjednodušení určení a optimalizace parametrů procesu se vytvářejí grafy pro výběr parametrů, tzv. parametrické mapy. Užívají se diagramy v rovinách p_0-T_0 a d_p-T_0 , v nichž jsou vykresleny limitní hodnoty parametru $\eta = 1, 2$, resp. hodnota $\eta = 1,5$, která bývá pro většinu aplikací ideální. Pro účely grafu je nutné přepočítat hodnoty teplot plynu za stagnace T_0 a při dopadu T_{pi} . V případě obr. 2.5 jde o přepočet podle vztahu $T_{pi} = 150 + 0,5 \cdot T_0$. Z map lze získat údaje o příslušných depozičních oknech, ale také parametry pro nástřik související s požadovanou hodnotou η , resp. výslednou kvalitou povrchu v závislosti na volbě parametrů. Aby bylo dosaženo nejlepších vlastností, měl by být rozsah depozičního okna co největší. Výhodou těchto map je skutečnost, že jejich použití nevyžaduje po koncovém uživateli hlubší znalosti dynamiky plynů nebo mechaniky pevných částic, což je činí dobře využitelnými pro průmyslovou přípravu povlaků.



Obr. 2.5. Parametrické mapy pro měď (prášek) a dusík (nosný plyn) [8]

V závislosti na materiálu povlaku se plyn přehřívá běžně na 30–1000 °C, aby se vykompenzovalo adiabatické ochlazení během expanze v dýze, přičemž teplota částic se zpravidla pohybuje maximálně okolo 200 °C. [1] Některé lehčí kovy, např. Zn nebo Al, mají dostatečnou přilnavost k substrátu (i při použití stlačeného vzduchu) za pokojové teploty. Aby byl ohřev částic ještě efektivnější a zamezilo se tepelným ztrátám v moment vstříknutí prášku do pracovního plynu, bývá někdy ohříván i samotný prášek. Ohřev pouze prášku (a pracovního plynu nikoli) není efektivní a nevyužívá se, neboť během expanze v divergentní části Lavalovy dýzy dochází k natolik intenzivní expanzi plynu, že částice snadno ztrácí své teplo ve prospěch pracovního plynu. Ohřev se proto provádí buď jen na pracovním plynu, nebo na plynu i prášku zároveň. Intenzita ohřevu může být ještě umocněna vstříknutím prášku do prodloužené předkomory trysky; částice se efektivněji nahřejí díky delšímu vystavení se teplu pracovního plynu. Zvýšení vzdálenosti od místa vstříku k hrdlu trysky z obvyklých 20 mm na 150 mm zvýší dopadovou teplotu částic T_{pi} až o 150 °C¹. Vede ale také ke snížení tvrdosti, což je dáno tepelným změkčením vlivem delšího působení horkého plynu.

2.1.3 Výhody a nevýhody KN ve srovnání s TS, použití KN

Pro lepší porovnání a pochopení předností cold spray bude zvlášť uveden stručný popis základních metod TS, výhod i nevýhod těchto metod povlakování. [2][15][16]

- Nejstarší metodou zhotovování žárových nástřiků je **nástřik plamenem** (též šopování, flame spray). Využívá se tepla vzniklého spalováním paliva (obvykle acetylen, propan) a kyslíku, které taví povlakovaný materiál. Tavenina (prášek nebo drát) je nahříván a vháněn na podklad, kde tvoří povlak. Výhodou je levná výroba a možná plošná aplikace, nevýhodou je nízká přilnavost a hustota nástřiku. Nános je vysoce porézní, což může být vzhledem k aplikaci výhodné (např. absorpce maziv, což zvyšuje výkon ložisek).
- Nástřik elektrickým obloukem** (arc spray) využívá teplo elektrického oblouku k odtavení elektrod, jež jsou vyrobeny z povlakovacího materiálu. Výhodou je

¹ Významný nárůst dopadové rychlosti byl potvrzen jen u částic s průměrem hrubším než 15 μm

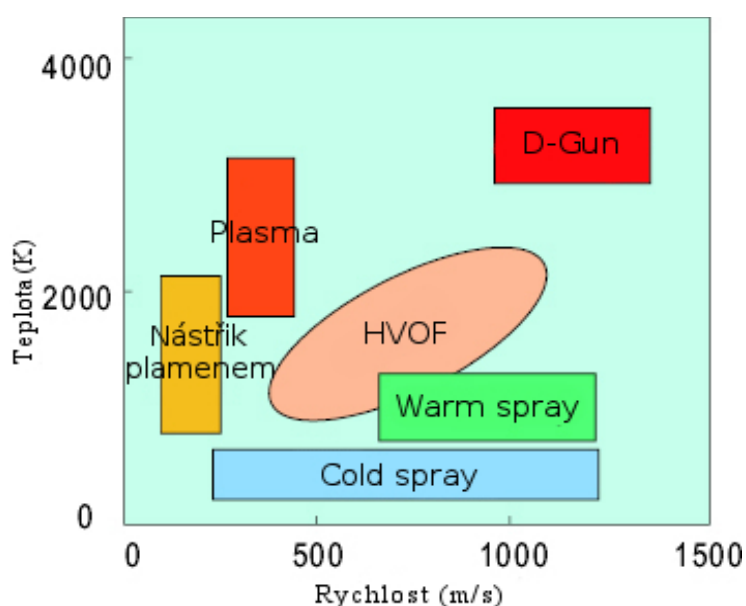
nízká cena a vysoký výkon procesu, nevýhodou je omezení spektra použitelných materiálů na materiály vodivé a výrazná oxidace částic.

- c) **Plazmatický nástřik** (plasma spray) využívá k nanesení povlaku plasmatu, které prášek taví a urychluje proti substrátu. Vysoká teplota média (až 20000 °C) umožňuje užít široké spektrum materiálů, včetně materiálů s vysokou teplotou tavení. Povlak se vyznačuje vysokou hustotou (stále ale nižší než KN) a vysokou afinitou k podkladu, vysoká teplota ale může způsobovat lokální změny chemického složení. Metoda je poměrně drahá.
- d) Vysokorychlostní nástřik plamenem (high velocity oxy-fuel, **HVOF**) pracuje s roztavenými nebo napůl roztavenými prášky, které jsou nástřikávány na substrát pomocí velmi rychlého proudu horkého plynu. Výsledkem je nízce porézní ale vysoce přilnavý povlak. Nižší teploty oproti ostatním TS omezují použití pro keramické povlaky. Modifikací HVOF je **warm spray**, který pracuje s nižšími teplotami oproti HVOF, čímž se blíží KN. Snížení teploty je dosahováno smícháním paliva s dusíkem. Důsledkem je omezení tavení a chemických reakcí prášku, což umožňuje nanášet materiály náchylné k oxidaci, resp. jiné degradaci vlivem vysokých teplot (např. titan, některé plasty, kovová skla).
- e) **Detonation gun** (D-Gun) dává povlaku vysokou přilnavost a nízkou porozitu. Práškový materiál je dodáván do spalovací komory, kde je jiskrou zažehnuto palivo. Spalování paliva vyvolává tlakové vlny, které ženou plyn s částicemi vysokou rychlostí vůči substrátu. Nástřik může být proto nespojitý nebo nerovnoměrně široký, pokud není vliv vln kompenzován pohybem robota.

Shrneme-li uvedené, TS metody umožňují nástřik takřka každého materiálu, který má rovnovážný stav taveniny. Odpad při výrobě lze snadno kontrolovat filtračním zařízením a následně jej recyklovat za účelem dalšího využití. Omezující pro použití TS je vysoká porozita a obsah oxidů na depozitech. V povlaku zůstávají nezanedbatelná zbytková napětí, která jsou způsobena teplotní roztažností částic pod vlivem ochlazení z roztaveného stavu až na pevný stav při pokojové teplotě. S tloušťkou povlaku napětí rostou, což může vést až k lomu nebo separaci povlaku od substrátu. [17]

Mezi zásadní výhody metody KN patří zachování počátečních chemických vlastností prášku, velikosti zrn i jeho krystalové struktury, a to při velmi vysoké výsledné hustotě, nízké porositě (nižší než 1%) povlaku a možnosti nánosu velmi silných vrstev. Právě tyto atributy dávají cold spray výhodu před běžnými metodami povlakování, jako např. galvanické pokovování, PVD nebo CVD. [2] K mírné degradaci materiálových charakteristik sice dochází, pokles ale není zdaleka tak významný, jako u konvenčních technologií TS. KN pracuje, jak ukazuje obr. 2.6, oproti TS s nižšími teplotami, ohřev částic totiž neslouží k jejich roztavení, ale ke zvýšení kinetické energie. Během procesu zůstávají částice v pevném stavu, takže jsou uchráněny nežádoucích efektů typických pro fázové přeměny, jako jsou rekrystalizace, oxidace za vysokých teplot a zbytková tahová napětí. Důsledkem je možnost tvorby povlaků, které se vyznačují vysokou odolností povlaku vůči korozi, pevností a tvrdostí ve srovnání s většinou TS metod. Výjimkou je v tomto případě HVOF metoda, která vykazuje vyšší tvrdosti nástřiků, nejspíš vlivem oxidických obálek splatů. KN přitom umožňuje nanášet kovy s vysokou afinitou ke kyslíku, což je u metod vyžadujících intenzivní ohřev vyloučeno. [18] Zbytková napětí sice

v povlakovaném tělese vlivem postupné deformace od proudících částic zůstávají, nicméně jde o zbytková napětí tlaková, která svým působením uzavírají póry a drobné praskliny v tělese; jde proto o žádoucí jev. Výsledný povlak se vyznačuje vysokou vodivostí (pro srovnání, plasmou nanášená měď dosahuje 15% vodivosti bezkyslíkaté vysokovodivostní mědi, zatímco využitím KN dosahuje až 85% této hodnoty). Tažnost povlakované vrstvy je nižší než tažnost základní suroviny, nicméně vhodným tepelným zpracováním, které lze vzhledem k nízkému obsahu oxidů a nízké porozitě v kontrastu s TS metodami použít, lze tuto charakteristiku zvýšit. Cenově výhodnou se jeví možná recyklace částic, které se od substrátu odrazily. Častý je výskyt deformačního zpevnění, což vyplývá z plastické podstaty procesu. [15][17]



Obr. 2.6. Srovnání metod TS a KN na základě rychlosti a teploty částic (podle [2])

Skutečnost, že nanášené pevné částice musí na povrchu projít plastickou deformací, aby došlo k úspěšnému spojení se substrátem, je do značné míry omezující, pokud jde o výběr použitelných materiálů. Částice prášku potřebují k plastické deformaci a tečení dostatečnou tažnost, což je důvodem pro obtížnou použitelnost křehkých materiálů pro technologii cold spray. Problém nastává i u tvárných materiálů, jelikož během procesu může dojít k postupnému vyčerpání plasticity, což má za následek křehké chování depozitů. V porovnání s TS metodami využívá KN mnohem větší objemy procesního plynu (od 0,5 m³/min), což při použití stlačeného vzduchu nebo dusíku jako nosného plynu není problém, nicméně použitím helia jako nosného plynu dochází ke značnému zvýšení celkové ceny procesu. Vzhledem k charakteru technologie, kdy povlakovací zbraň míří na malou oblast substrátu, kterou je nutno povlakovat, není časově ani ekonomicky vhodné použití KN na větší plochy. V neposlední řadě je problémem zanášení a eroze trysky zevnitř. [15][17]

Celkové náklady na provoz cold spray zařízení jsou součtem dílčích nákladů na vybavení systému, nosný plyn, práškové materiály a elektrickou energii. U běžného cold spray systému jsou náklady na hardware ovlivněny především cenami trysky, zásobníku a ohřívače plynu, dále dávkovače prášku a kontrolního panelu. Souhrnně je cena těchto součástí cenově porovnatelná s laserem, potažmo

laserovým nanášením. Ceny komponent systému výrazně navyšuje skutečnost, že komponenty musí odolávat vysokým tlakům plynu. Úspory lze dosáhnout instalací filtrů zachytávajících částice prášku odražené od substrátu. Výrazný vliv na celkovou cenu provozu má také druh použitého nosného plynu – zatímco použití stlačeného vzduchu, dusíku, příp. jejich směsi je poměrně levné, v případě helia se výroba natně prodraží. Vysoké pořizovací náklady helia vedou k užití směsi helia s dusíkem. Opomenout nelze ani náklady na energii, kterou spotřebuje zejména vysoce výkonný (zpravidla okolo 25 kW) ohříváč. Přesto může být výroba pomocí KN ekonomicky výhodná, zvolí-li se vhodné parametry a v neposlední řadě také díky úspoře elektrické energie oproti TS metodám. [19]

Vzhledem ke svým unikátním vlastnostem má technologie KN široké možnosti uplatnění. Možnosti KN pokrývají celou řadu aplikací od biomedicínských potřeb po opravy částí letadel. Uvedme alespoň tyto příklady využití: [10][20][21][22]

- biokompatibilní kompozitní nánosy na kostních náhradách – nános hydroxyapatitu $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ s titanovým práškem
- výroba antimikrobiálních povrchů – nánosy mědi různými technikami povlakování ukázaly nejlepší vlastnosti užitím KN; vysoká dopadová rychlost částic vede ke vzniku měděné mikrostruktury, která zlepšuje iontovou difuzi, což dodatečně podporuje antimikrobiální aktivitu
- ochrana před korozí – využití např. u hořčíku a jeho slitin, neboť hořčík jako velmi elektrochemicky aktivní prvek snadno podléhá galvanické korozi, ale pro jeho vhodné pevnostně-hmotnostní vlastnosti je často využíván při výrobě komponent letadel a vrtulníků
- elektronika – nános mědi odstraňuje oxidický film a odvádí přebytečné teplo z cínových a měděných elektronických součástek
- mikroobvody – pomocí KN lze vytvářet různé 3D tvary různých geometrií, povlakovat nanostruktury bez ovlivnění jejich vlastností
- fotovoltaika – zhotovení vodivých struktur na solárních článcích
- elektromagnetické stínění – nánosy na stínících krytech, které chrání před rušivým elektromagnetickým vyzařováním
- opravy narušených povlaků – opravy částí strojů, leteckých motorů, lopatek turbín, pístů, ložiskových komponent, hřídelů, plomb



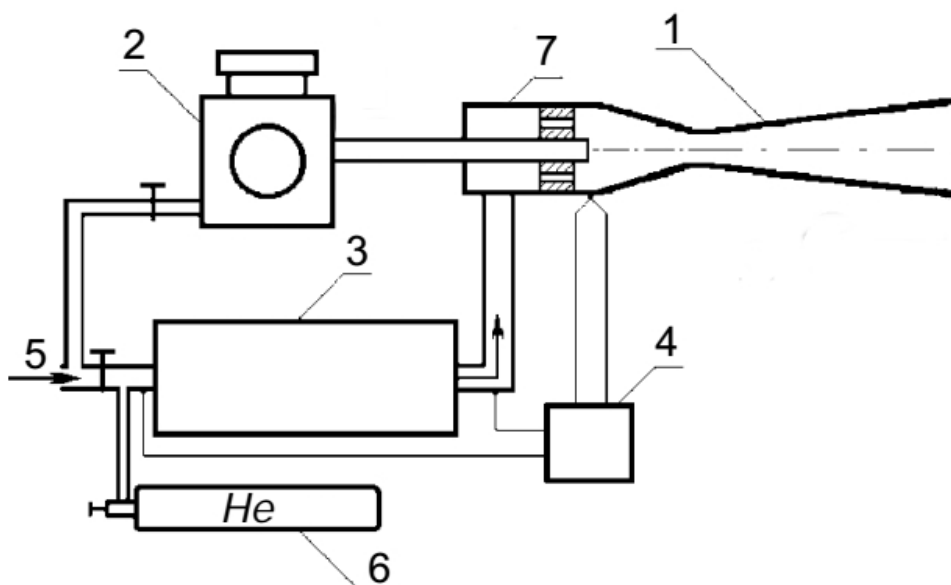
Obr. 2.7. Měděné antimikrobiální prkénko (produkt LuminOre CopperTouch) [22]

2.2 Povlakovací systémy

2.2.1 Typy povlakovacích systémů

K nanesení povlaku slouží přístroj pro svůj tvar obecně označovaný jako povlakovací zbraň. Zpravidla se skládá z těchto elementů:

- modul regulace plynu,
- zásobník plynu,
- ohřívač plynu,
- zásobník prášku,
- ohřívač prášku,
- dávkovač prášku,
- předkomora trysky,
- Lavalova tryska.

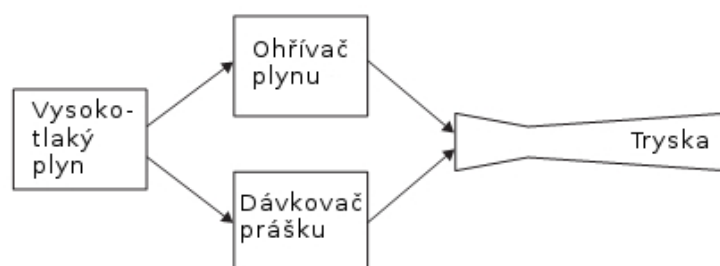


Obr. 2.8. Příklad sestavení zbraně. 1 – Lavalova tryska; 2 – dávkovač prášku; 3 – ohřívač plynu; 4 – kontrolní modul plynu; 5 – přívod stlačeného vzduchu; 6 – zásobník plynu; 7 – předkomora (podle [1])

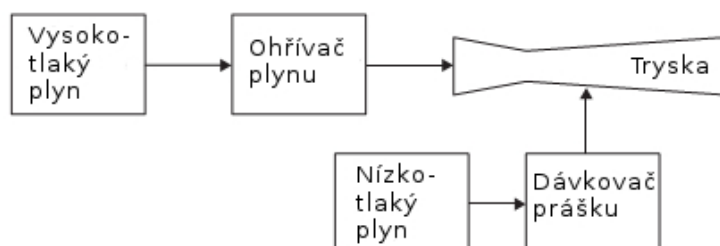
Procesní plyn je obvykle před modul regulace vháněn do dvou větví potrubí; v první větvi je plyn ohřát ohřívačem na požadovanou teplotu a poté vháněn do Lavalovy trysky, kde dosahuje nadzvukových rychlostí ($M = 2-4$), ve druhé větvi je plyn dávkovačem obohacen o práškový materiál budoucího povlaku. V sestavě podle obr. 2.8 není pracovní plyn sám primárně stlačován, ale mísen s již stlačeným vzduchem. Vstřík nosného plynu s práškem do ohřátého plynu probíhá v různých místech Lavalovy trysky, příp. v předkomoře podle požadovaného efektu. V závislosti na požadované kvalitě povlakování, použitém materiálu a typu nosného plynu se ve výsledné konfiguraci mohou objevit ohřívače plynu a prášku a externí chlazení. Systém bývá vybaven pohyblivým zařízením, alternativou je fixace zařízení a pohyb

povlakovaným tělesem. Předkomora trysky, někdy vybavená vlastním ohřívačem, a tryska samotná bývají často konstrukčně odděleny v samostatnou zbraň.

Statický cold spray systém



Přenosný cold spray systém



Obr. 2.9. Schéma typické pro statický a přenosný cold spray systém [23]

Zbraň se vyrábí ve statickém a přenosném provedení. Ve statickém zařízení je vysokotlaký plyn proháněn ohřivačem i dávkořačem prášku, který strhává a nese. Tato konfigurace vyžaduje, aby dávkořač snesl vysoké tlaky plynu. Statické zařízení se používá pro sériovou aplikaci, na akademických pracovištích a pro depozici přesných rozměrů (s CNC strojem). V přenosném systému je pracovní plyn ohříván a vháněn do trysky, kdežto prášek je nesen nízkotlakým plynem. Ke smísení nosného a pracovního plynu dochází buď v předkomoře nebo různých místech trysky. Toto zapojení lze využít i pro statický systém pro nástřik lehkých materiálů. Schémata typická pro oba systémy jsou ukázána na obr. 2.9, v tabulce 2.2 jsou uvedeny obvyklé rozsahy provozních parametrů. [1][23]

Tabulka 2.2. Rozsahy provozních parametrů pro statický a přenosný systém cold spray [23]

	Statický systém	Přenosný systém
Pracovní plyn	N ₂ , He, vzduch	Vzduch
Tlak plynu (MPa)	2–7	0,6–2
Ohřev plynu (°C)	20–1100	20–550
Průtok plynu (m ³ /hod)	50–150	15–30
Machovo číslo na výstupu trysky	2–4	2–3
Hmotnostní tok prášku (g/s)	0,1–1	0,06–0,1
Velikost částic (μm)	5–100	10–50

2.2.2 Komerční systémy

Uvolnění hranic v 90. letech umožnilo expanzi technologie do západních zemí; v polovině 90. let tak mohl Dr. Papyrin KN poprvé prezentovat v USA a ve spolupráci s předními americkými firmami, jako např. General Motors, Ford Motor Company nebo General Electric, zde pokračovat ve zkoumání jevu. V dnešní době výzkum KN probíhá na akademických, vojenských, ale i komerčních pracovištích po celém světě. Komerčním využitím cold spray se v dnešní době zabývá několik firem, z nichž mezi nejvýznamnější se řadí Linde AG (Wiesbaden, Německo), Cold Gas Technology GmbH (Mnichov, Německo), K-Tech (Albuquerque, Nové Mexiko, USA), ASB Industries (Barberton, Ohio, USA), Impact Innovations (Rattenkirchen, Německo), Inovati (Goleta, Kalifornie, USA) a Plasma Giken (Imaichi, Japonsko).

2.2.2.1 Řada Kinetiks®2000

Jde o přenosný systém společnosti Cold Gas Technology GmbH, který může být ovládán rukou. Je vhodný k opravám strojních součástí a pro potřeby údržby, ochrany proti korozi. Používá se pro nástřik lehčích kovů (např. Al, Zn, Sn). [24]

- Maximální teplota plynu 400 °C
- Maximální tlak plynu 2 MPa

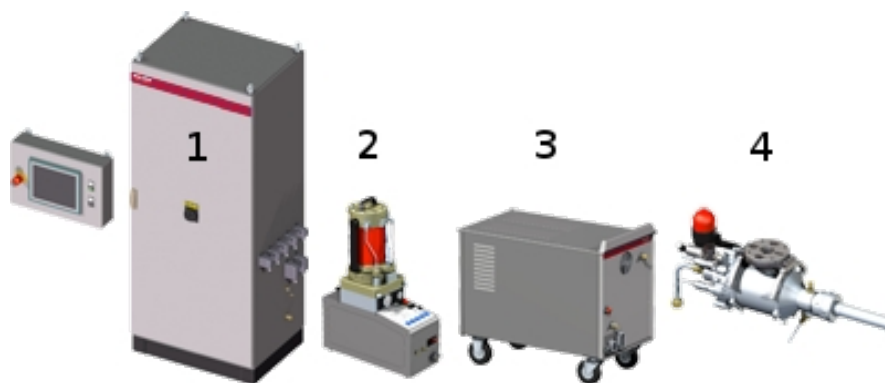


Obr. 2.10. Přenosná zbraň Kinetiks 2000 společnosti Cold Gas Technology GmbH [24]

2.2.2.2 Řada Kinetiks®4000

Statické systémy Kinetiks 4000 společnosti Cold Gas Technology GmbH se vyrábějí v několika verzích s různými typy ohřevů. Všechny systémy jsou vybaveny vlastním vlákenným ohřevem integrovaným do předkomory Lavalovy trysky. [24]

- Maximální teplota plynu 800 °C
- Maximální tlak plynu 4 MPa
- Rychlost depozice (Cu) až 10 kg/hod
- Efektivita depozice (Cu) až 95%
- Průtok (N₂) až 1500 l/min
- Integrovaný ohřev 17 kW
- Výkon s externím ohřevem HT300/17 47 kW

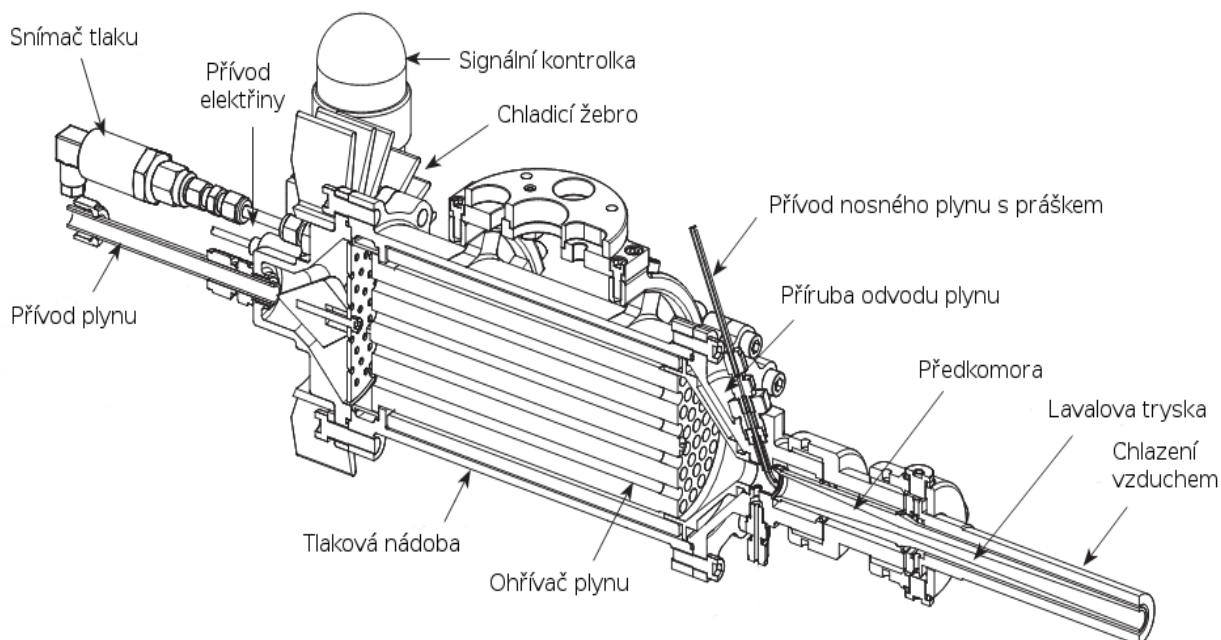


Obr. 2.11. Systém Kinetiks 4000/47 s externím ohřívačem (30 kW). 1 – modul regulace plynu; 2 – dávkovač prášku; 3 – ohřívač 30 kW; 4 – zbraň Kinetiks 4000 [24]

2.2.2.3 Řada Kinetiks®8000

Systémy této řady (společnosti Cold Gas Technology GmbH) jsou určeny pro náročné aplikace s minimálními nároky na čas. Zbraň je vybavena vlastním vlákným ohřívačem integrovaným v předkomoře Lavalovy trysky. [24]

- Maximální teplota plynu 1000 °C
- Maximální tlak plynu 4 MPa
- Rychlost depozice (Cu) až 14 kg/hod
- Efektivita depozice (Cu) minimálně 95%
- Průtok (N_2) až 2700 l/min
- Integrovaný ohřívač 25 kW
- Výkon s 2 externími ohřívači HT300/17 85 kW



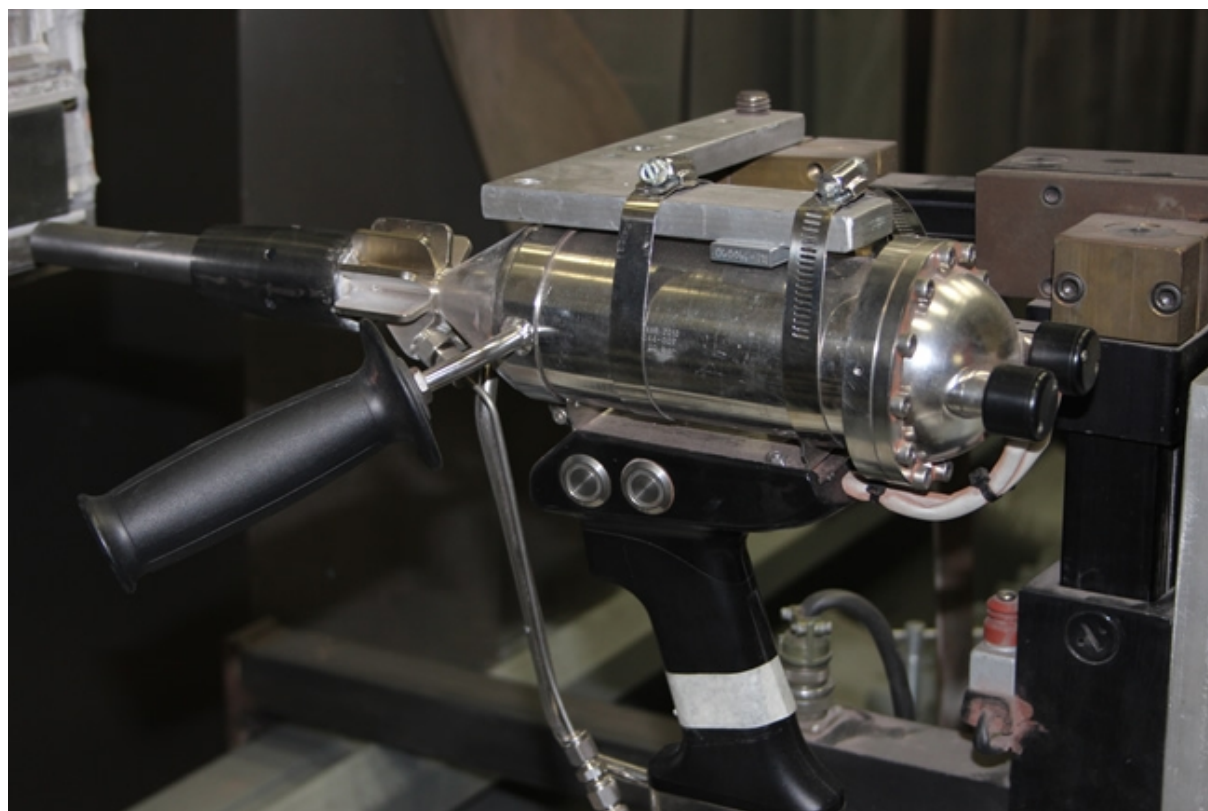
Obr. 2.12. Schematický popis řezem systému Kinetiks 8000 od firmy Oerlikon Metco (podle [24])

Kolem systémů Kinetiks je v současné době řada dohadů ohledně duševního vlastnictví. Zařízení se prodávají v různých modifikacích různých výrobců a distributorů – projekt Kinetiks byl podle webových stránek Cold Gas Technology GmbH [24] ke konci roku ukončen. Vývoj a prodej je zajištěn společnostmi Linde AG, Oerlikon Metco a ASB Industries.

2.2.2.4 ASB-2000-2

ASB-2000-2 je přenosný systém společnosti ASB Industries. Je modifikací systému Kinetiks 2000 od Cold Gas Technology GmbH, vývoj ASN-2000-2 je výsledkem vzájemné spolupráce. Systém je vhodný pro manuální opravy součástí, potřeby údržby. Zbraň se dá upevnit na robotickou ruku. Prášek je vstřikován přímo do Lavalovy trysky. [25]

- Maximální teplota plynu 400 °C
- Maximální tlak plynu 2 MPa
- Rychlost depozice až 1,2 kg/hod
- Efektivita depozice až 90%



Obr. 2.13. Zbraň a kontrolní jednotka systému ASB-2000-2 od ASB Industries [25]

2.2.2.5 VRC Gen III Hybrid High-Pressure Hand-Held Cold Spray System

Jde o statický systém společnosti VRC Metal Systems. Zbraň je umístěna na pohyblivém rameni, které lze polohovat ručně i pomocí robotické ruky. Celá jednotka je umístěna na kolečkách a tedy snadno přemístitelná. Proces je automatizován a počítačově monitorován. Lze použít vícero ohřivačů. [26]

- Maximální teplota plynu 900 °C
- Maximální tlak plynu 7 MPa
- Rychlost depozice až 10 kg/hod
- Průtok až 2500 l/min
- Výkon ohřívače 15–45 kW



Obr. 2.14. Mobilní jednotka VRC Gen 3 Hybrid High-Pressure Hand-Held CS System [26]

2.2.2.6 *Impact Spray System 5/8*

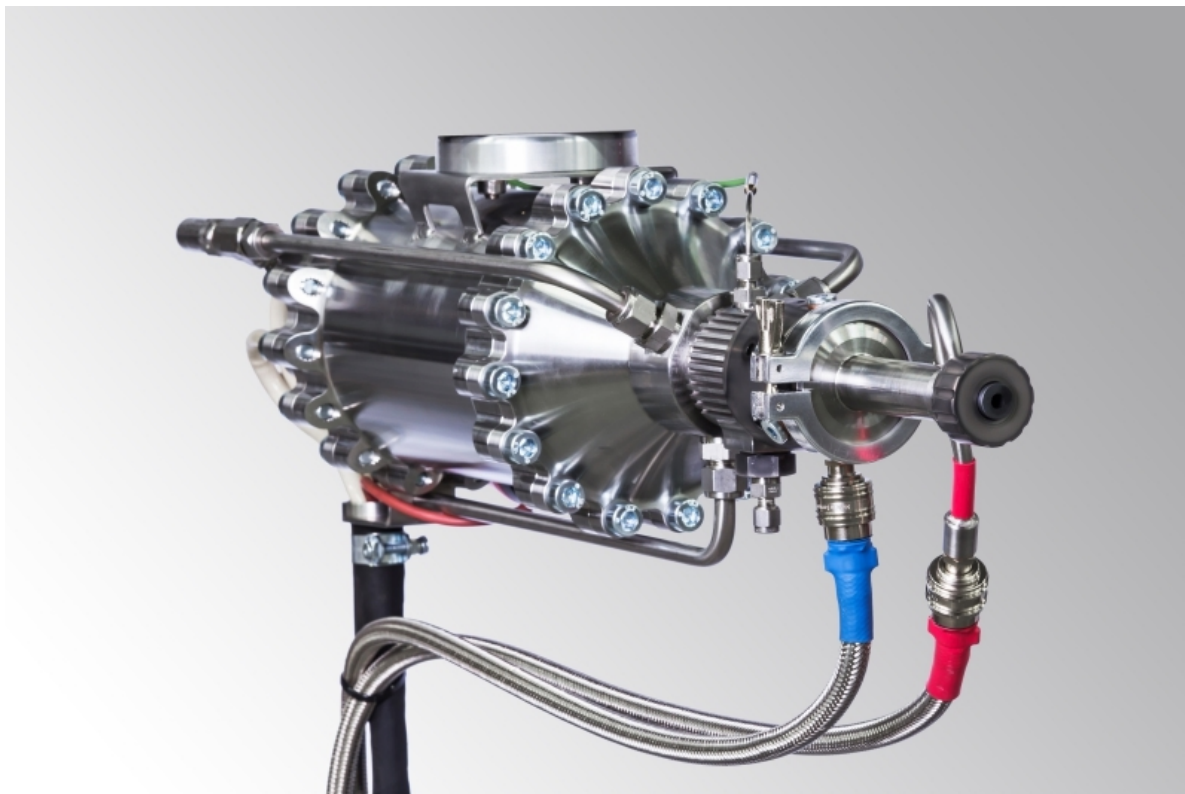
Systém 5/8 společnosti Impact Innovations je modulární statický systém s volným uložením jednotlivých částí; zbraň, displej kontrolní jednotky a dávkovač prášku jsou umístěny na kovovém rameni, umožňujícím vertikální pohyb, zasazeném ve skeletu. Kontrolní jednotka je umístěna mimo skelet, celý systém je tedy prostorově přizpůsobitelný. Toto řešení umožňuje upravit jednotku podle požadavku zákazníka. Systém je možno dovybavit externím vodním chlazením trysky. [27]

- Maximální teplota plynu 800 °C
- Maximální tlak plynu 5 MPa
- Výkon ohřívače 34 kW

2.2.2.7 Impact Spray System 5/11

Systém 5/11 je výkonnějším bratrem systému 5/8 společnosti Impact Innovations. Zahrnuje tytéž atributy, avšak s vyšším výkonem a dosažitelnými teplotami. [27]

- Maximální teplota plynu 1100 °C
- Maximální tlak plynu 5 MPa
- Výkon ohřívače 40 kW



Obr. 2.15. Zbraň pro systém 5/11 (tryska, předkomora s ohřívačem) [27]

2.2.2.8 DYMET® model 423

DYMET 423 je přenosný systém LPCS ruské provenience (vyvinuto pracovníky Obninského Centra pro Depozici Prášků). Zařízení využívá stlačeného vzduchu a pracuje s malým příkonem, je proto cenově dostupnou variantou pro depozici lehkých materiálů, jako jsou hliník, měď, zinek a jejich slitiny. Výhodou je krátký náběh zařízení do plného chodu (10 s) a relativně nízká hmotnost (20 kg). Zbraň lze ovládat manuálně i automaticky. Používá se např. k opravám strojních součástí, tlakových nádob, nánosu korozivzdorných povlaků, ale i k dekorativním účelům (restaurování soch, umělecký nános kovů na skla). [28]

- Maximální teplota plynu 600 °C
- Maximální tlak plynu 1,2 MPa
- Průtok až 400 l/min
- Příkon až 3,3 kW



Obr. 2.16. Přenosné zařízení DYMET model 423 [28]

2.2.2.9 Tryskací zařízení SD-6

SD-6 je abrazivní zařízení fungující na principu podobném KN od ruského Obninského Centra pro Depozici prášků. Přístroj slouží k čištění, broušení nebo odmaštění povrchů těles, přípravě pro budoucí povlakování, odstranění koroze a nečistot. Abrazivní částice nesené plynem jsou v Lavalově trysce urychlovány proti substrátu, který bombardují a ze kterého „odstřelují“ nežádoucí částice pryč. Oproti běžnému tryskání a pískování je tento způsob efektivnější, protože pracuje s vyšší rychlostí a nižší spotřebou abraziva a redukcí času procesu. [28]

- Maximální tlak plynu 0,8 MPa
- Průtok až 200 l/min
- Tok abrazivních částic až 1 g/s
- Spotřeba prášku až 150 g/dm²
- Výkon na plochu až 0,5 dm²/min



Obr. 2.17. Zařízení SD-6 k tryskání povrchů na bázi KN [28]

2.2.2.10 Kinetic Metallization™ system

Kinetic Metallization systems je souhrnné označení pro systémy nabízené společností Inovati. Systémy pracují při nízkém tlaku (0,3–1 MPa), což snižuje spotřebu plynu a tím i nároky na rozměry zbraně a celkovou cenu. Částice prášku jsou nanášeny v tuhém stavu, před nanesením jsou ale termálně změkčeny. Systémy jsou dodávány ve dvou balících:

- Production Coating System – jednotky určené pro konkrétní aplikace, plná automatizace, vhodné do výroby
- Coating Development System – jednotky bez konkrétního určení, vhodné pro výzkumné účely

Obě jednotky se dodávají se stejným hardware. Komponenty včetně robota ovládajícího zbraň jsou zasazeny v prosklené skříni, takže proces je bezpečný. Součástí výbavy je i sběrač prachu, který zachycuje částice odražené od povrchu povlakovaného tělesa. Výrobce nabízí 3 druhy zbraní:

- a) Raster Gun – standardní roboticky ovládaná zbraň pro většinu aplikací
- b) Internal Diameter Gun – roboticky ovládaná zbraň speciálně upravená k povlakování vnitřních průměrů
- c) Handheld Gun – manuálně ovládaná zbraň, může pracovat samostatně i jako součást systému, vhodná pro opravy a údržbu přímo na místě

Všechny typy pracují se zabudovaným ohřívačem o výkonu 3,8 kW. Pracovní plyn pracuje s tlaky 0,3–1 MPa při teplotách 0–1000 °C. [29]



Obr. 2.18. Manuálně ovládaná Handheld Gun systému Kinetic Metallization od Inovati [29]

2.2.2.11 PCS-800

PCS-800 je povlakovací systém společnosti Plasma Giken Co., Ltd. Výhodou systému je integrovaný ohřívač, čímž dochází k minimálním ztrátám. Pracuje s dusíkem nebo heliem jako pracovním plynem. Zařízení je velmi těžké, používá se jako statický systém. Používá se např. k opravám převodovek vrtulníků, nástřikům plynových turbín, povlakování kuchyňského náčiní. Systém je řízen automaticky. [30]

- Maximální teplota plynu 800 °C
- Maximální tlak plynu 5 MPa

- Efektivita povlakování minimálně 95%
- Výkon ohřivače 35 kW

2.2.2.12 PCS-1000

PCS-1000 je nástupce staršího a méně výkonného typu PCS-800 firmy Plasma Giken Co., Ltd. Pro systém je typické využití vysokých teplot, díky čemuž je možný nános i jinak obtížně nanositelných slitin jako je Inconel, MCrAlY nebo nerezová ocel. Ohřivač je stejně jako u PCS-800 integrován do zbraně. Důležitým atributem systému je odstranění problému zanášení trysky. Systém je řízen automaticky. [30]

- Maximální teplota plynu 1000 °C
- Maximální tlak plynu 5 MPa
- Efektivita povlakování až 98%
- Výkon ohřivače 70 kW



Obr. 2.19. Jednotka PCS-1000 společnosti Plasma Giken Co., Ltd. [30]

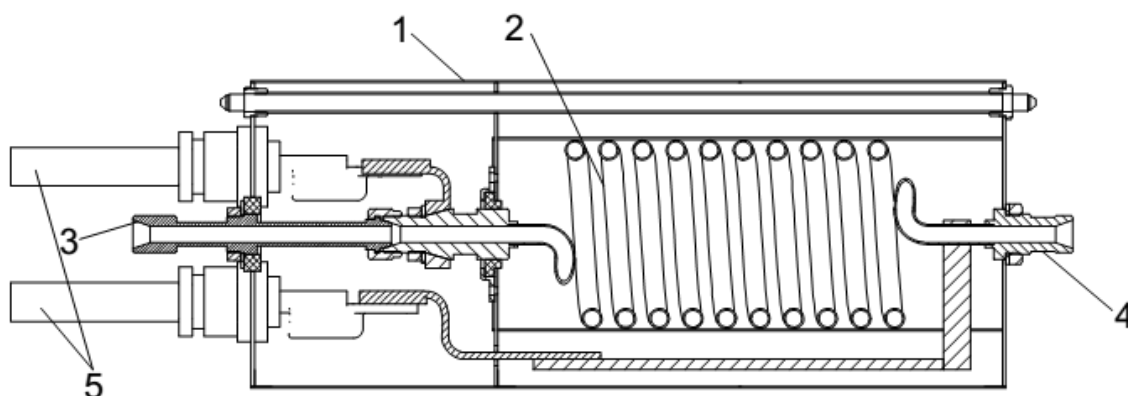
2.3 Systémy ohřívání

2.3.1 Způsoby ohřevu

Jak bylo popsáno v kapitole 2.1.2, teplota plynu má vliv na depoziční okno, potažmo kvalitu vytvářeného povlaku. Mnohé materiály (zejm. mají-li vysokou teplotu tavení) nelze kvůli jejich charakteristikám za pokojových teplot nanášet. Tehdy se ohřev používá nejen k urychlení, ale také sekundárně k termálnímu změkčení prášků. Ohřev plynu probíhá v ohřivači, který by měl splňovat následující požadavky: [1]

- schopnost ohřevu velkého množství proudícího plynu na danou teplotu
- výrazně nepřispívat hydrodynamickému odporu v potrubí
- snadná manipulace, co nejmenší rozměry a počet topných prvků

V praxi KN se většinou setkáváme se dvěma typy ohřivačů, resp. ohřevu plynu; jde o ohřev odporovým vinutím a ohřev odporovým vláknem.



Obr. 2.20. Schéma ohřivače s vinutím. 1 – kryt; 2 – vinutí cívky; 3 – přívod plynu; 4 – odvod plynu; 5 – zdroj energie (podle [1])

Častější z obou typů je ohřev vinutím. Jde o jeden z typů nepřímého odporového ohřevu, který využívá odpor topného článku, v tomto případě drátu namotaného na trubce ve spirálu (cívku), příp. smotaného bez trubkového jádra, ke vzniku a přenosu tepla. Nejedná se přímo o indukční ohřev, protože k ohřátí plynu dochází zejm. prouděním a sáláním z vinutí na podobném principu, jako u běžných přímotopů nebo elektrického topení, nikoli díky odporu ohřívaného materiálu (plynu) vůči indukovanému proudu. Pro účely KN se obvykle jako materiál topných článků volí chromniklové slitiny (např. superslitiny typu Inconel), protože vykazují dobré žáruvzdorné vlastnosti, vysokou rezistivitu vůči vedení proudu a nestárnou. V nejjednodušší a zároveň nejspolehlivější konfiguraci prochází plyn přes trubkovitý elektrický ohřivač. Trubky jsou vedle sebe zasazeny ve skeletu a sériově zapojeny do sítě. Chladný plyn na vstupu nejprve vstupuje do primárního okruhu tvořeným skeletem a vnějším obalem ohřivače, než vstoupí do sekundárního okruhu, který tvoří jednotlivé trubky. Toto zapojení umožňuje dosáhnout nezbytného ohmického odporu na ohřivači a dostatečný pokles hydrodynamického odporu v soustavě. Dalším možným řešením je ohřivač s pouze jednou zapojenou trubkou. Uvedený způsob je tepelně nejefektivnější, protože k přenosu tepla na plyn dochází uvnitř trubek, což do jisté míry eliminuje ztráty ohřivače. [1][5][31]

Ohřev vláknem je ohřevu odporovým vinutím principiálně podobný. Vlákno je ve skutečnosti tenký drát z vysoce rezistivního materiálu s vysokou teplotou tání, např. z wolframu. Při průchodu proudu se vlákno, podobně jako topný článek v předcházejícím případě, rozžhaví a sálá teplo do okolí; totožný jev se uplatňuje při žhavení žárovky. Oproti vinutí vykazuje vlákno kratší dobu nahřívání.

Pro konkrétní zadání nosného plynu a požadovaného průtoku ohřivačem lze odvodit potřebný výkon ohřivače, zvolit materiál odporového tělesa a jeho velikost, příp. počet topných prvků. V následující části bude nejprve jako první iterace uveden obecný návrh topného tělesa ze základních znalostí termodynamických zákonů, načež bude představen i komplexní návrh ohřivače podle Papyrina *et al.* [1]

K ohřevu musí ohřivač vynaložit užitečnou práci W_U , která je rovna teplu Q_{wg} předanému plynu ohřivačem podle kalorimetrické rovnice

$$W_U = Q_{wg} = c_{pg} \cdot m_g \cdot \Delta T_g, \quad (2.11)$$

kde c_{pg} je měrná tepelná kapacita plynu při stálém tlaku, m_g je hmotnost plynu

a rozdíl ΔT_g je hodnota ohřevu plynu (rozdíl na výstupu a vstupu do ohříváče). Odtud lze odvodit vztah pro užitečný výkon P_U jako funkci (objemového) průtoku G_V

$$P_U = \frac{W_U}{t_0} = \frac{c_{pg} \cdot m_g \cdot \Delta T_g}{t_0} = \rho \cdot G_V \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_g, \quad (2.12)$$

kde t_0 je doba ohřevu a ρ je hustota plynu. Příkon ohříváče P_P se stanoví zohledněním bezpečnostního koeficientu k_b a ztrátovým výkonem P_Z , který je dán jako součet ztrátového výkonu naprázdno (nezávisí na chodu přístroje, jsou rovny příkonu dodávanému při chodu naprázdno, patří zde zejm. ztráty v činném odporu vinutí, dále ztráty stěnami a v železe) a ztrát závislých na chodu ohříváče (manipulace s ohříváčem apod.), jako

$$P_P = k_b \cdot (P_U + P_Z). \quad (2.13)$$

Příkon lze také stanovit z dodávaného napětí U a proudu I , z čehož lze pomocí Ohmova zákona odvodit závislost na rezistivitě materiálu ρ_w , délce l_w a průřezu S_w vlákna, resp. drátu

$$P_P = U \cdot I = R_t \cdot I^2 = \frac{\rho_w \cdot l_w}{S_w} \cdot I^2. \quad (2.14)$$

Dosazením rovnic (2.12), (2.14) do (2.13) lze získat poměr určující pro volbu materiálu a charakteristické rozměry vinutí. Rozměry topného tělesa lze také určit z rovnice pro přestup tepla

$$P_U = \alpha \cdot S \cdot (T_w - T_g), \quad (2.15)$$

kde α je součinitel přestupu tepla, T_w je teplota ohříváče a T_g teplota plynu. Z rovnice (2.15) lze již snadno vyjádřit velikost plochy topného tělesa S . [32]

Komplexnější návrh pro optimalizaci nabízí Papyrin *et al.* [1] Řešení platí pro ohřev stlačeného vzduchu ohříváčem s cívkovým vinutím. Vychází z těchto premis:

1. Zvolena maximální teplota ohřevu plynu ΔT_g (zvoleno 250 °C)
2. Teplota povrchu trubky by neměla dosáhnout hodnot, které by ohrozily pevnost materiálu – určeno rozdílem teplot povrchu stěny trubky a již ohřátého plynu $T_w - T_g$ (zvoleno 450 °C)
3. K zajištění intenzivního přenosu tepla ze stěn trubky na plyn je nutné zajistit dostatečně turbulentní tok plynu, který stanovíme podmínkou

$$Re_h = \frac{\rho \cdot v_g \cdot d_t}{\eta_g} = \frac{4 \cdot G_m}{\pi \cdot N_h \cdot d_h \cdot \eta_g} \geq 10^4, \quad (2.16)$$

kde Re_h je Reynoldsovo číslo pro tok plynu uvnitř trubky, v_g , η_g a G_m jsou rychlost, dynamická viskozita a hmotnostní tok plynu, d_t je hydraulický průměr trubky, d_h je vnitřní průměr topného členu a konečně N_h je počet topných členů (trubek).

4. Hydrodynamický odpor ohříváče (ztráty tlaku) by měl být nízký (zvoleno $\Delta p_h \leq 0,1$ MPa)
5. Celkový průřez topného členu by měl být alespoň dvakrát větší než průměr hrdla trysky

Ze zákona zachování energie plyne rovnost výkonů daných přenosem a tokem tepla

$$\alpha \cdot \pi \cdot d_h \cdot L_h \cdot N_h (T_w - T_g) = G_m \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_g, \quad (2.17)$$

kde L_h je délka topného prvku. Součinitel přestupu tepla α je určen rovností

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d_h}, \quad (2.18)$$

kde λ je tepelná vodivost plynu a Nu Nusseltovo číslo. Hodnoty těchto fyzikálních parametrů jsou specifické pro vzduch a pro jiné médium je nutno je přepočítat.

$$Nu \approx 0,018 \cdot Re_h^{0,8}, \quad (2.19)$$

$$\lambda \approx 1,425 \cdot 10^3 \cdot \eta_g. \quad (2.20)$$

Závislost dynamické viskozity na teplotě lze stanovit ze Sutherlandova vzorce

$$\eta_g = \eta_{0g} \cdot \left[\left(\frac{T_g}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_0 + T_s}{T_g + T_s} \right]. \quad (2.21)$$

Po dosazení vztahů (2.16), (2.18), (2.19), (2.20) a (2.21) do (2.17) lze vyjádřit rozdíl teplot na ohříváči a plynu jako

$$T_w - T_g = \left(\frac{G_m}{N_h \cdot \eta_{0g}} \right)^{0,2} \cdot \frac{c_{pg} \cdot \Delta T_g \cdot d_h^{0,8}}{96,7 \cdot L_h} \cdot \left[\left(\frac{T_g}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_0 + T_s}{T_g + T_s} \right]^{0,8}, \quad (2.22)$$

kde pro vzduch $T_0 = 273 \text{ K}$, $T_s = 124 \text{ K}$, $\eta_{0g} = 17,08 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ a $c_{pg} = 1,05 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$. Pro danou volbu podmínek a po číselném dosazení lze potom vyjádřit počet topných těles v závislosti na rozměrech tělesa

$$N_h \geq \frac{3,125 \cdot 10^8 \cdot G_m \cdot d_h^4}{L_h^5} \text{ pro 2. podmínku} \quad (2.23)$$

$$N_h \leq \frac{7,45 \cdot G_m}{d_h} \text{ pro 3. podmínku} \quad (2.24)$$

$$N_h \geq \frac{4,04 \cdot 10^{-5} \cdot G_m \cdot L_h^{5/9}}{d_h^{8/3}} \text{ pro 4. podmínku} \quad (2.25)$$

$$N_h \geq \frac{200 \cdot G_m \cdot T_g^{1/2}}{\pi \cdot p_0 \cdot d_h^2} \text{ pro 5. podmínku} \quad (2.26)$$

Pro zvolené hodnoty G_m a L_h lze potom sestavit v rovině N_h – d_h uvedené závislosti. Oblast optimálních rozměrů je těmito 4 závislostmi ohraničena, jak ukazuje obr. 2.21.

Je-li znám materiál topného článku a napětí v síti, lze určit parametry článku z rovnosti výkonů daných přenosem tepla a odporem článku

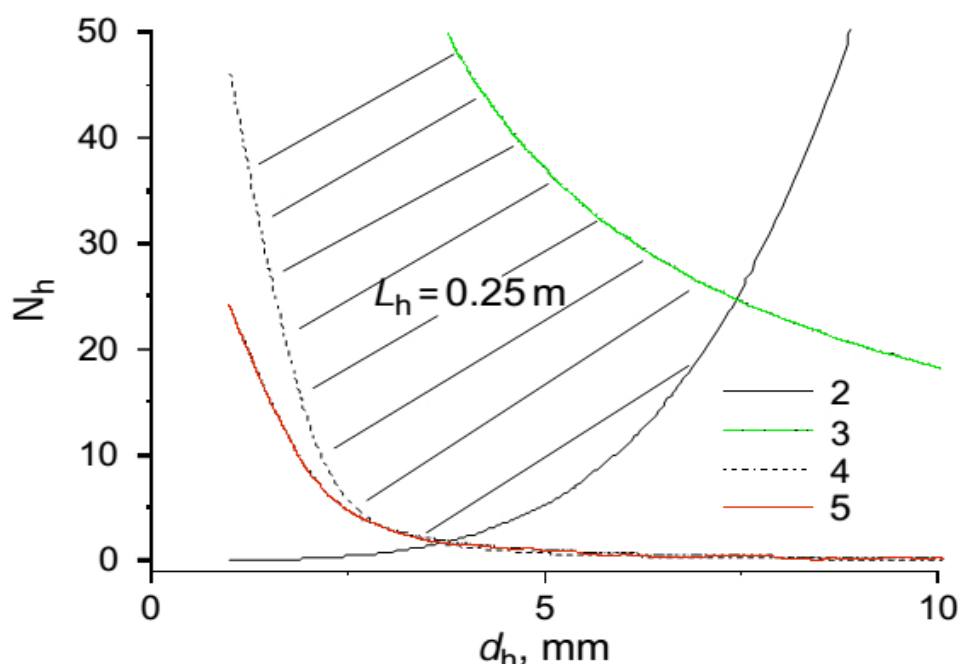
$$\frac{U^2}{R_t} = G_m \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_g. \quad (2.27)$$

Odpor topného elementu zapojeného v sérii je dán vztahem

$$R_t = \frac{\rho_w \cdot N_h \cdot L_h}{\pi \cdot \delta_h \cdot (d_h + \delta_h)}, \quad (2.28)$$

Ze vztahů (2.27) a (2.28) plyne vztah pro počet topných článků ve tvaru

$$N_h = \frac{\pi \cdot \delta_h \cdot (d_h + \delta_h) \cdot U^2}{\rho_w \cdot L_h \cdot G_m \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_g} \quad (2.29)$$

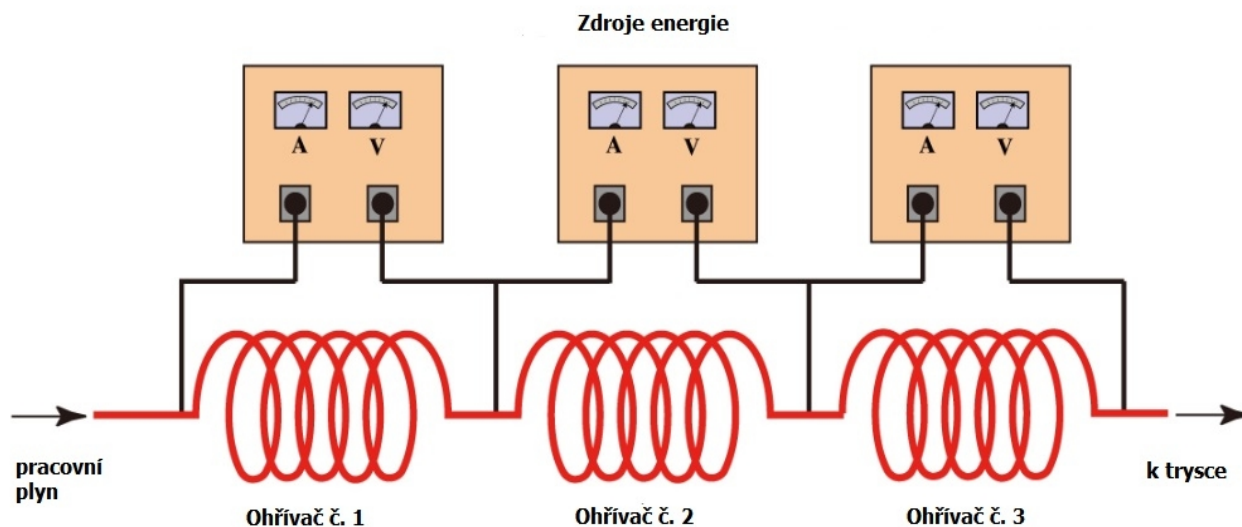


Obr. 2.21. Oblast optimálních hodnot průměru a počtu topných článků. $G = 0,0245 \text{ kg/s}$, $L_h = 0,25 \text{ m}$. Křivky 2, 3, 4 a 5 odkazují 2., 3., 4. a 5. podmínku (podle [1])

Jednoduchý způsob, jak dosáhnout ohřevem efektivněji vyšších teplot, představil Fukanuma *et al.* [33] K demonstraci byl použit komerční systém (typ neuveden) společnosti Cold Gas Technology GmbH schopný dosáhnout teplot 800°C při tlaku pracovního plynu (N_2 i He) 4 MPa a dodanému příkonu 47 kW . Systém pracuje pouze s jednou ohřívací jednotkou, což při ohřevu klade nároky na ohřívač – při teplotě na povrchu topného tělesa 1200°C dosahuje teplota plynu na výstupu pouze 700°C , dochází tedy k významnému tepelnému zatížení materiálu ohřívače a zvýšení dodávaného příkonu, což při pozvolnějším růstu výkonu znamená pokles účinnosti. Uvedené řešení je principiálně velmi jednoduché – zapojení tří ohřívačů v sérii za sebou, kdy každý má vlastní zdroj energie. Tento způsob rozkládá zátěž z jednoho ohřívače na tři, nevyžaduje zahřátí topného tělesa na zbytečně vysoké teploty, což umožňuje ušetřit na celkovém příkonu a také případně slevit na materiálu ohřívače.

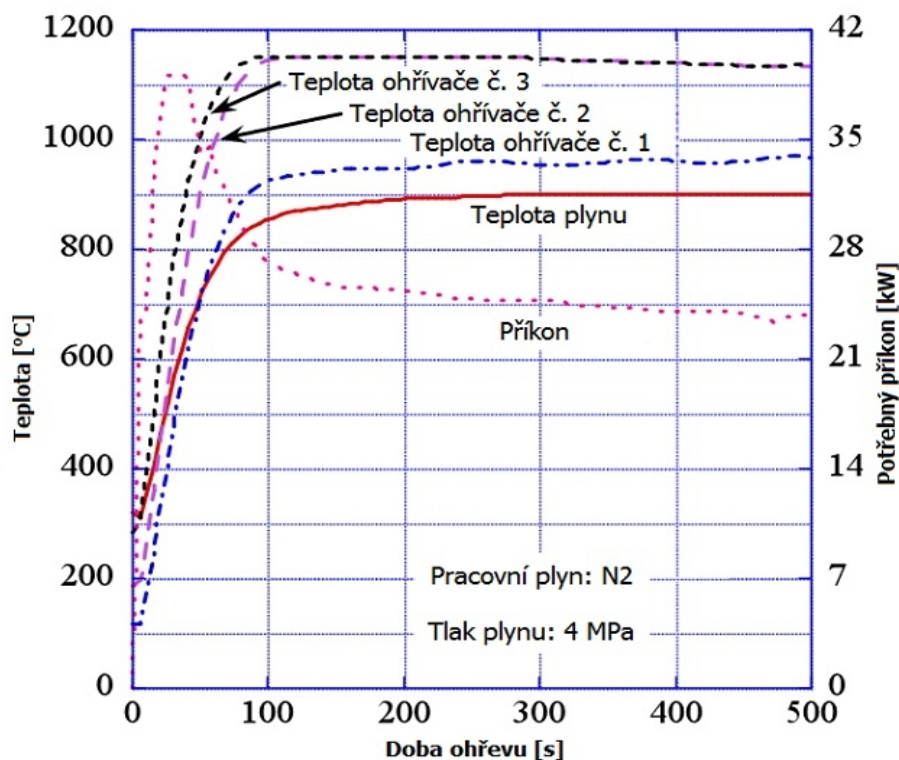
Topné těleso bylo vyrobeno z chromniklové slitiny Inconel 600. Průměr trubky se pohyboval mezi $8\text{--}12 \text{ mm}$ a tloušťka stěny $1\text{--}3 \text{ mm}$. Z grafu v obr. 2.23 je patrné, jak systém funguje. Rozložení potřebného teplotního gradientu mezi tři ohřívače předurčuje první ohřívač k funkci „předehřevu“. Nejvyšších teplot dosahuje třetí ohřívač, který „dohřívá“ plyn vystupující z druhého ohřívače. Plyn lze tímto způsobem ohřát na 900°C , přičemž nedochází k přehnanému zvýšení teploty ohřívače. Potřebný příkon je pouze 25 kW , což znamená rapidní pokles oproti původnímu zařízení. Při ohřevu na takto vysoké teploty je nutno užít chlazení. Výše uvedené platí pro dusík jako pracovní plyn. Použití helia je mírně problematické kvůli jeho tepelné kapacitě, způsobuje fluktuace teplot na ohřívačích, nicméně stále vykazuje

pokles příkonu (40 kW) oproti původnímu zapojení s jedním ohřivačem. [33]



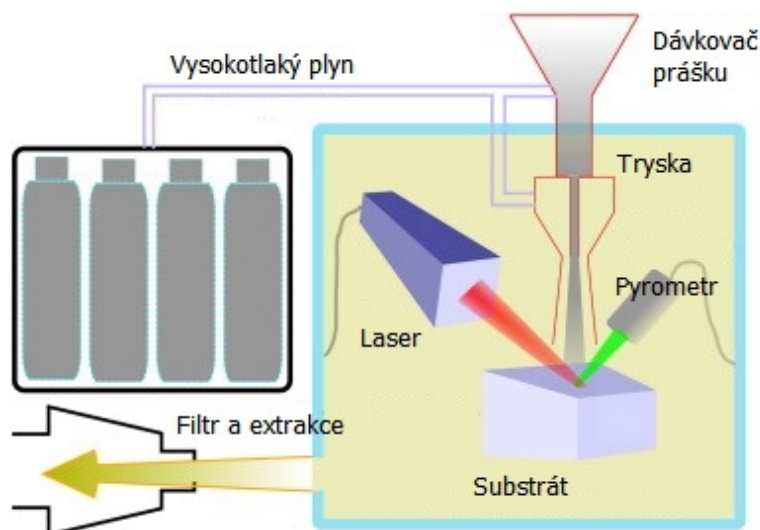
Obr. 2.22. Schéma ohřevu pracovního plynu (podle [33])

Zajímavou alternativou k ohřevu plynu pomocí ohřivačů je metoda laserové asistence KN (laser-assisted cold spray, LACS). Tato metoda nevyužívá standardní ohřivač, nýbrž ohřívá prášek a substrát externě diodovým laserem až při dopadu na substrát. Obchází se tak (v mnohých případech) nutnost ohřevu pracovního plynu a použití helia pro obtížně nanositelné materiály, jako jsou např. titanové slitiny. Zachovávají se přitom základní výhody dané „studeným“ charakterem KN: vysoce hustý povlak, nízká porozita a obsah oxidů, depozice pevných částic (a tedy omezení fázových přeměn). Nanášení lze přitom velmi snadno ukončit; pokud je laser vypnut,



Obr. 2.23. Teplota a příkon na ohřivačích pro ohřev N₂ na 900 °C při 4 MPa (podle [33])

rychlost částic je podkritická a k tvorbě povlaku nedochází. Stačí tedy pouze vypnout laser. Plyn lze metodou zahřát až na teploty kolem 1000 °C, což vzhledem ke snížení potřebné dopadové rychlosti vlivem teplotní závislosti této rychlosti a tím i nároků na proces snižuje cenu a rozšiřuje portfolio k povlakování použitelných materiálů. V systému se zpravidla objevuje pyrometr, kterým se odměřuje teplota na povrchu substrátu. [34]



Obr. 2.24. Zjednodušené schéma LCS (podle [34])

Ohřivač bývá vůči zbrani polohován různými způsoby. Pro statické systémy je typické externí umístění, pro systémy přenosné pak integrovaný ohřivač (přípevněný k prodloužené předkomoře). Výhodou externího umístění je vyšší výkon ohřevu a tedy možnost dosažení vyšších teplot plynu a kvalitnějších nástřiků, zatímco výhodou integrovaného ohřivače je minimalizace ztrát, které u externích ohřivačů dosahují v závislosti na použité izolaci 10–15%. Existují i další možnosti, které uvedené způsoby kombinují; pracovníci z Helmut Schmidt Universitāt v Hamburku modifikovali externí ohřivač systému Kinetiks 3000 tak, že připevnili topné těleso k předkomoře. U některých CNC řízených systémů bývá ohřivač připevněn na pohyblivé rameno, ohřev je tedy externí, ale vzhledem k malé vzdálenosti od dýzy nedochází k citelným ztrátám tepla. U mnoha systémů, jak zmiňuje kapitola 2.2.2, je využit ohřev jak externím, tak i integrovaným ohřivačem.

2.3.2 Komerční ohřivače

2.3.2.1 Linspray®

Ohřivač Linspray® je produktem firem Linde AG a Cold Gas Technology GmbH. Je určen pro statické jednotky, využívá ohřev odporovým vinutím. Teplota materiálu ohřivače a plynu je monitorována a výsledky užity k prevenci přehřátí ohřivače. Podle testů nejeví materiál známky únavy ani po 1000 hodinách v provozu. [1][35]

- Maximální teplota plynu 800 °C/3,5 MPa, 650° C/4,5 MPa
- Maximální tlak pracovního plynu 4,5 MPa
- Maximální výkon 30 kW



Obr. 2.25. Ohřívač Linspray pro systém Kinetiks 4000 [36]



Obr. 2.26. Řez ohřívačem Linspray [35]

2.3.2.2 *Kinetiks™ HT300/17*

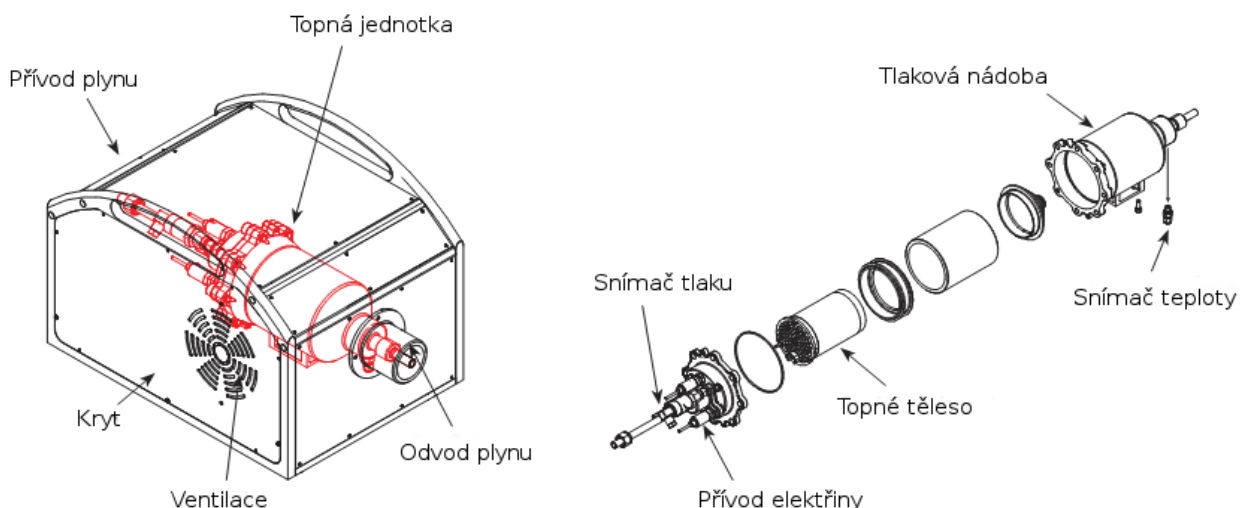
Ohřívač HT300/17 firmy Cold Gas Technology GmbH využívá ohřev žhaveným vláknem. Používá se pro statické systémy KN. Oproti Linspray je výhodou kratší doba ohřevu, naopak nevýhodou nižší maximální výkon. [24][36]

- Maximální teplota plynu 600 °C
 - maximální ohřev při průtoku 1000 l/min (N₂) 600 °C
 - maximální ohřev při průtoku 2500 l/min (He) 350 °C

- Maximální tlak plynu 4 MPa
- Maximální výkon 17 kW
- Napětí zdroje 400/440~ V



Obr. 2.27. Ohřívač Kinetiks HT300/17 pro systém Kinetiks 4000 [36]

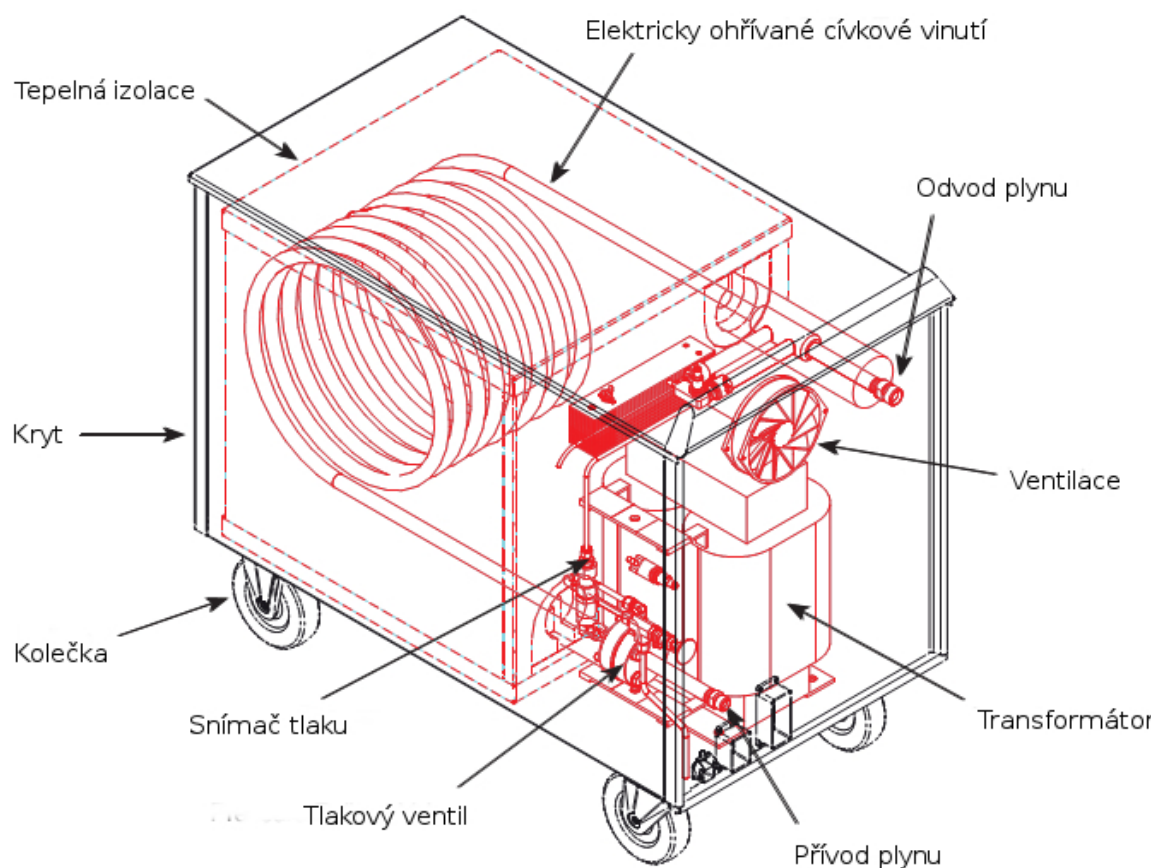


Obr. 2.28. Řez ohřívačem Kinetiks 300/17 od Cold Gas Technology GmbH (podle [24])

2.3.2.3 Kinetiks™ HT300/30

Jde o výkonnější ohřívač stejné firmy jako HT300/17. Používá se pro statické systémy KN, využívá ohřev vinutím. Oproti HT300/17 sice dodává vyšší výkon, ale má mnohem robustnější konstrukci (až o 200 kg těžší). [24]

- Maximální teplota plynu 850 °C
 - maximální ohřev při průtoku 1000 l/min (N₂) 850 °C
 - maximální ohřev při průtoku 2500 l/min (He) 850 °C
- Maximální tlak plynu 4 MPa
- Maximální výkon 30 kW
- Napětí zdroje 400/440~ V



Obr. 2.29. Řez ohříváčem Kinetiks 300/30 od Cold Gas Technology GmbH (podle [24])

2.3.2.4 Ohříváč K-Tech

Korporace K-Tech užívá trubkovitý ohříváč z nerezové oceli. Výhodou je nízká hmotnost, nevýhodou dlouhý ohřev (až 160 s při ohřevu na 500 °C) [1]

- Maximální teplota plynu 500 °C
- Maximální tlak plynu 3,4 MPa
- Průtok až 7000 l/min
- Maximální výkon 25 kW



Obr. 2.30. Topné těleso o výkonu 25 kW ohříváče K-Tech Corporation [1]

3 Ohřev plynu v jiných průmyslových aplikacích

K průmyslovému ohřevu plynu se využívají elektrické ohřívače různých tvarů a s různým principem ohřevu. Výhodou elektrických ohřívačů je kontrola nad ohřevem, snadná přizpůsobivost požadavkům na teplotu, výkon a prostor. Elektrický ohřev se vyznačuje čistým a tichým provozem a nízkými ztrátami tepla. Obecně se dají rozdělit do dvou podskupin:

1. radiační (sálavý) ohřev,
2. konvekční ohřev.

Radiační ohřívače jsou postaveny na principu emise a přenosu tepla jako infračerveného záření z topného tělesa, které je uloženo ve schránce. Záření je usměrněno k objektu směrem od ohřívače odrazovým zrcadlem. Konvekční ohřívače ohřívají plyn v okolí topného prvku, k přenosu tepla v plynu dochází konvekcí (prouděním). Pro ohřev proudícího plynu se, jak už z povahy názvu vyplývá, více hodí konvekční ohřev. Radiační ohřívače jsou vhodné pro ohřev konkrétních objektů např. obědu v mikrovlnné troubě, přenos tepla sáláním z ohřívače na plyn není efektivní. Dále budou vzhledem k potenciální aplikaci pro KN uvedeny výhradně konvekční ohřívače.

3.1 Cívkové a kabelové ohřívače

Ohřev plynu v cívkových a kabelových ohřívačích probíhá na principu nepřímého odporového ohřevu vinutím elektricky rezistivního materiálu, jak popisuje kapitola 2.3.1. Vinutí může být smotáno ve spirálu (cívku) samostatně, na trubce nebo uvnitř kovové trubky, může být také vedeno bez smotání jako topný kabel. Topné těleso je tvořeno jádrem (z páru odporových obvykle chromniklových drátů) uzavřeným v silné kovové (např. z nerezové oceli) trubce v lázni MgO. Prostor uvnitř cívky může být vyplněn zhutněným plynem (např. CO). Celé těleso je zpravidla tvořeno několika tyčemi spojenými přírubou. Cívkové vinutí je voleno tehdy, kdy je zapotřebí vyššího výkonu ohřevu. Různé aplikace vyžadují různé konstrukční metody, vyrábějí se ohřívače s jedním, dvěma nebo čtyřmi odporovými dráty různých průřezů, paralelní cívky nebo přímý zesílený drát. Drát může být zesílen točeným vláknem, čímž je ještě zvětšena plocha přenosu a zesílen a hustota topného výkonu. Výhodou tohoto způsobu ohřevu je okamžitá odezva ohřívače, možný vysoký výkon při malých rozměrech, schopnost operovat i v extrémních podmínkách (nízké či vysoké teploty, tlak). Používá se např. pro nahřívání trysek vstřikovací soustavy plastů, medicínské vybavení, vytápění místností, tepelné balení potravin, ohřev lázní pro odmašťování, technologický ohřev plynů, kabelové ohřívače se používají zejm. jako ochrana potrubí proti zamrznutí, příp. podlahové vytápění. [37][38]



Obr. 3.1. Vinutí cívkového ohřívače z nerezové oceli [37]

3.2 Topné patrony

Topné patrony jsou tělesa drobných (standardizovaných) rozměrů schopné generovat velkou hustotu výkonu (až 50 W/cm^2). Principiálně se ohřev neliší od cívkových ohříváčů. Základem je topná spirála (zpravidla z chromniklové slitiny) omotaná kolem keramického jádra, která předává odporové teplo plášti. Mezi plášť a vinutí je vsunuta izolace, která brání uzemnění elektrického obvodu. Volný prostor je vyplněn CO a celé těleso je utěsněno. Plášť potom předává teplo koncovému tělesu. Topné těleso se umísťuje co nejbližší ohřívanému objektu. Patrony vydrží teploty až kolem $800 \text{ }^\circ\text{C}$, doporučené provozní teploty jsou ale nižší. Nejčastěji se topné patrony používají pro ohřev kovových součástí, dále např. pro lokální ohřev v úzkých dírách, k tavení granulovaných plastů před lisováním, nahřívání před protlačováním, při výrobě balicích výrobků, ohřev tekutin v nádobách. [37][39]



Obr. 3.2. Topná patrona s vnitřním napojením vývodů pro teploty do $450 \text{ }^\circ\text{C}$ společnosti Backer Elektro CZ [39]

3.3 Bubnové ohříváče

Jak název napovídá, jde o ohříváče ve tvaru bubnu. Topné těleso může být provedeno několika způsoby:

- a) celý obvod bubnu, k zamezení úniku tepla bývá buben zvnějšku obklopen izolací (keramickou, oxidickou, minerálovou),
- b) odporové vinutí cívkové vedené zvlášť uprostřed válce bubnu, potom se jedná o cívkový ohříváč s bubnovou izolací,
- c) odporové dráty zasazené v drážkách bubnové izolace, typické pro keramické pece.

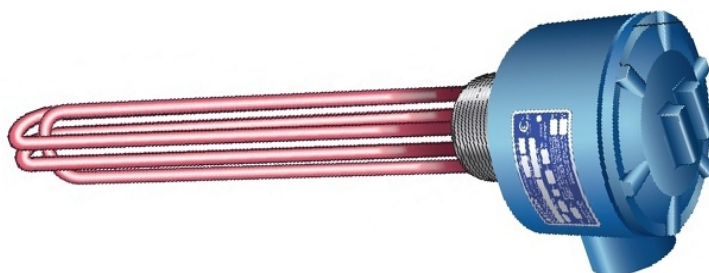
Způsoby a) a c) jsou typické pro ohřev konkrétního množství stojaté tekutiny, např. dehtu, oleje, čokolády. Ohřev je nepřímý a probíhá zvnějšku, teplo je předáváno nejprve formě (potrubí, barel apod.) a až sekundárně tekutině. Způsob b) i způsob a) se dají využít pro průtokový ohřev, ohříváč je zároveň formou a teplo je předáváno tekutině přímo. Primární způsob ohřevu je prostřednictvím odporu vinutí, pro elektricky vodivá tělesa se dá použít indukční ohřev. Ohříváč by měl být instalován vespod nádoby, teplo tekutinou stoupá vzhůru. Výhodou bubnových ohříváčů je nízká cena, nevýhodou je dosažitelný ohřev, který u přímého ohřevu (způsob b) dosahuje maximálně $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Uplatnění nachází v potravinářství, při foukání plastů, zpracování ropy nebo pro ohřev v tryskách. [37][40]



Obr. 3.3. Bubnový ohříváč pro ohřev barelů od společnosti Friedr. Freek GmbH [40]

3.4 Ponorné ohříváče

Ponorné ohříváče se skládají ze samostatného, příp. celého setu odporových trubkovitých prvků, které jsou formovány do sponky, jak je patrné z obr. 3.4, a přivařeny, resp. připájeny do šroubovací zátky. Ohříváče tohoto typu disponují výkonem do 24 kW (ohřev až na 870 °C, je-li těleso vyrobeno z Inconelu), slouží spíše pro drobné aplikace. Vysokých výkonů (až 2 MW) dosahují ohříváče uzavřené přírubou, které se používají pro ohřev velkých objemů. Topné těleso pro ohřev plynu je vyrobeno nejčastěji ze slitiny Incoloy. Ponorné ohříváče lze použít např. pro ohřev vody, olejů a ropných derivátů, plynů v tlakových nádobách, alkalických roztoků, kyselin, hořlavých tekutin. Výhodou je snadné ovládání ohřevu, které lze ukončit prostým vyjmutím ohříváče. Nevýhodou je vysoká spotřeba elektrické energie a nutnost instalace termostatu k prevenci přehřátí. [37]

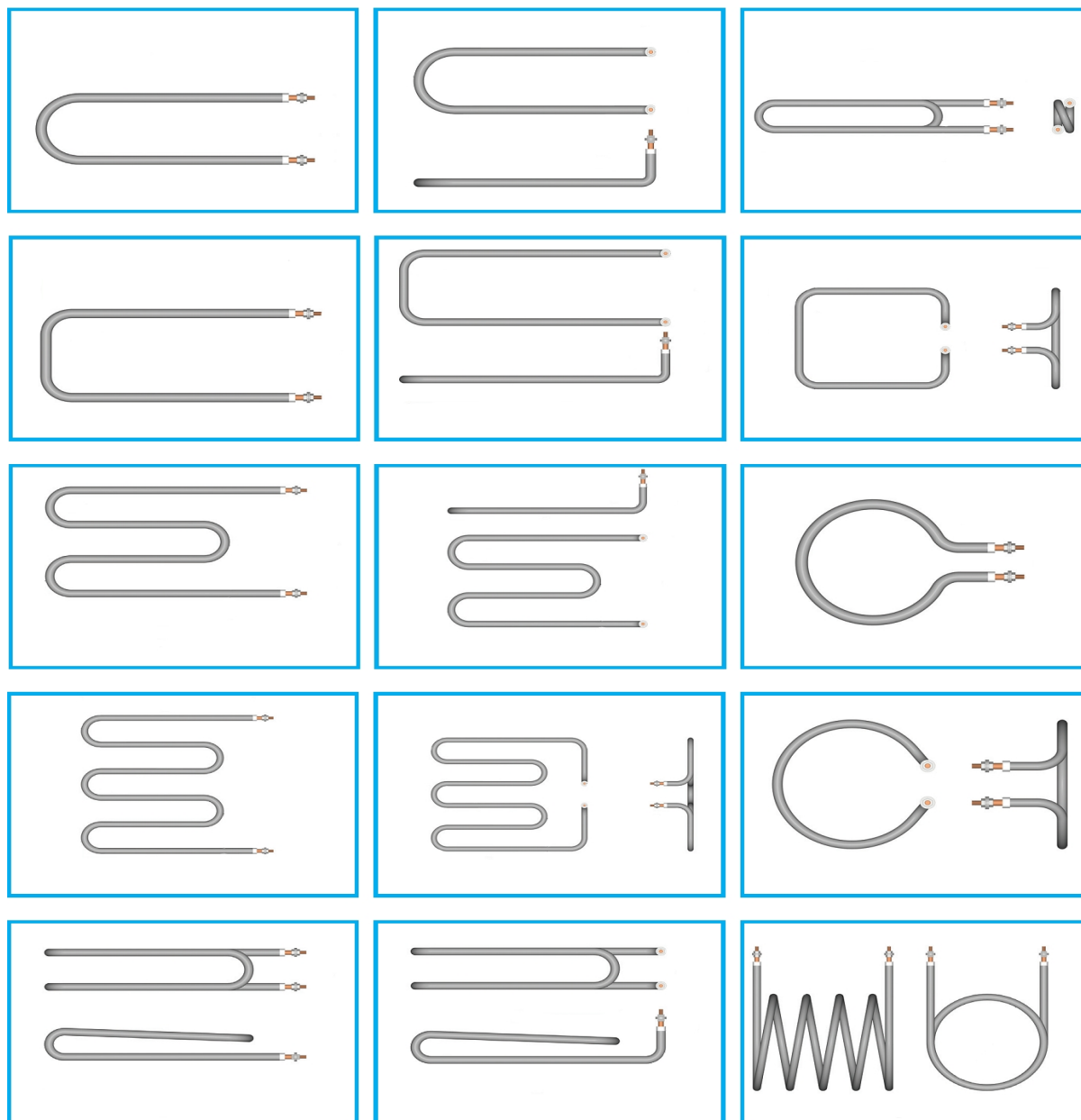


Obr. 3.4. Ponorný ohříváč se šroubovací zátkou od firmy Bucan [37]

3.5 Trubkové ohříváče

Topné těleso u tohoto typu ohříváče je trubka z odporového materiálu tvářená do různých tvarů, může být kruhového i nekruhového průřezu. Jádrem je většinou tvořeno odporovým drátem smotaným ve spirálu z chromniklové slitiny. Drát bývá svařen na obou koncích ke kolíkům. Jádru s kolíky je uloženo v masivní kovové trubce ve vysoce čisté lázni MgO (až 96%). Celé těleso je tvářeno a žíháno a získává

finální rozměry. Trubkové ohřívače se používají pro ohřev vody v bojlerech, ohřev v klimatizacích aut, ve spotřebičích pro domácnost, průmyslový ohřev vzduchu a lázní, olejů ve fritézách, zpracování potravin. V aplikacích, kde je ohřívač vystaven nucenému proudění, bývá navíc topné těleso vybaveno žebry, které zvětšují jeho plochu a tím zlepšují kapacitu přenosu. Oproti běžným trubkovým ohřívačům pracují žebrované trubkové ohřívače s nižšími teplotami povrchu při stejné hustotě výkonu. Obvykle se nedoporučují pro ohřev nad 750 °C. Využívají se např. pro vysoušení, při nízkoteplotním tepelném zpracování nebo pro průtočný ohřev plynů. [37][39]



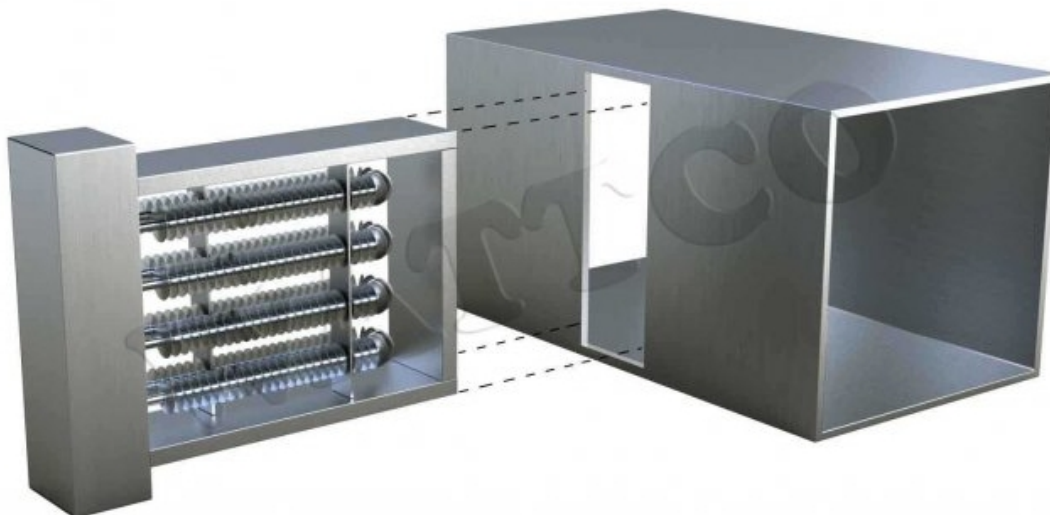
Obr. 3.5. Různé typy trubkových ohřívačů od firmy Bucan [37]

3.6 Potrubní ohřívače

Tento typ ohřívačů slouží k ohřevu proudících tekutin (typicky v potrubí). Obvykle jsou součástí HVAC systému (heating, ventilating, air conditioning; vytápění, ventilace, klimatizace). Vyrábí se ve třech provedení:

- a) s otevřeným cívkovým vinutím
- b) s trubkovým topným tělesem
- c) s žebrovaným trubkovým topným tělesem

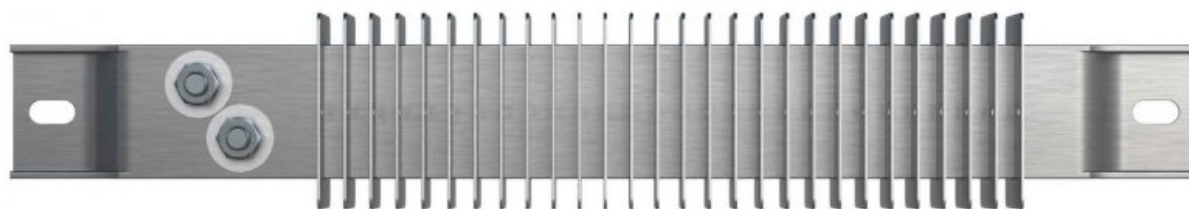
Těleso je přírubou připevněno nebo přímo vloženo do ohřívaného objektu. Ohřivače jsou schopny dosáhnout teplot až 600 °C. Potrubní ohřivače se často používají v domácnostech ve ventilačních systémech, v průmyslu k ohřevu cirkulujícího plynu v pecích. Také se používají jako přídatné ohřivače k jinému druhu vytápění. [37][41]



Obr. 3.6. Nástin principu fungování potrubních ohřivačů [41]

3.7 Pásové ohřivače

Z několika typů pásových ohřivačů se k ohřevu plynu používají žebrované pásové ohřivače. Topným prvkem je pás plechu, na němž jsou nasazeny malé plechové panely, které zvětšují topnou plochu, přenos tepla je tím intenzivnější. Ohřivač je vhodný k použití ve stojatém i proudícím plynu, dá se použít i jako sálavý zdroj. Maximální teploty se mohou vyšplhat až k 870 °C podle použitého materiálu. Využití je např. ve vytápění prostor, předehřev plynů, elektrické trouby, vulkanizačním procesu, odvlhčení prostor nebo vytápění aut. [37][41]

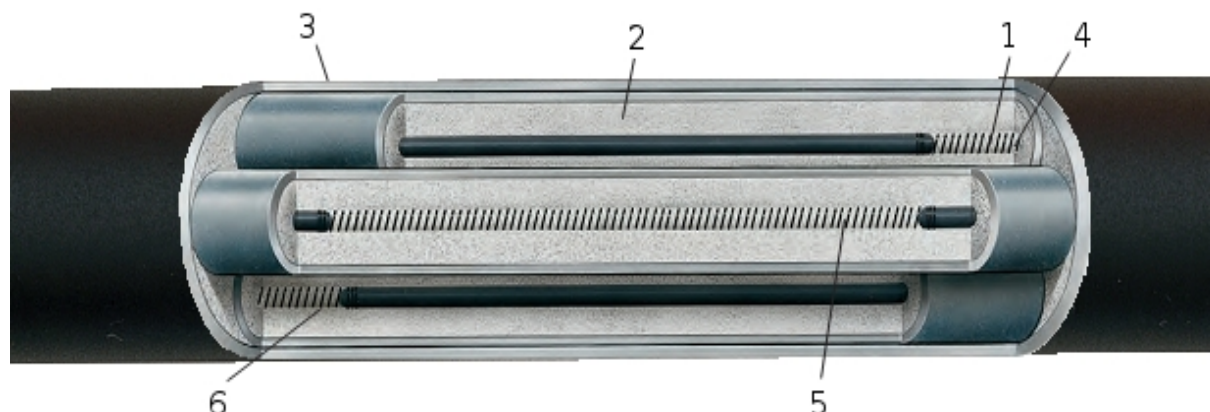


Obr. 3.7. Žebrovaný pásový ohřivač výrobce Wattco [41]

3.8 Ohřivače MULTICELL™

MULTICELL je licencovaný zásuvný ohřivač firmy Watlow. Používá se v aplikacích náročných na dosaženou teplotu ohřívaného média (až 1120 °C) a výkon ohřevu. Topný prvek se skládá až z 6 kovem potáhnutých odporových drátů uložených v kovovém obalu. Dvojité obal slouží jako prevence proti oxidaci a únavě materiálu.

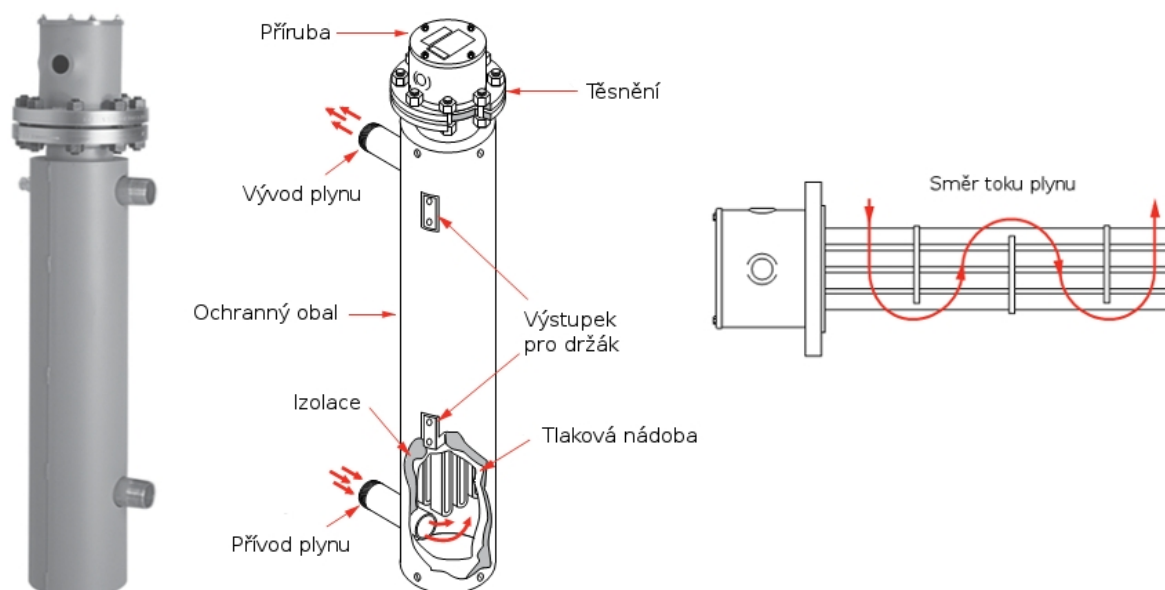
Další výhodou je snadné ovládání ohřevu, topné vlákno stačí po dokončení ohřevu vyjmout. Míru ohřevu lze regulovat pro každé vlákno zvlášť. Jde o vhodnou alternativu ohřevu v trubkách a dírách s extrémními podmínkami prostředí. [38]



Obr. 3.8. Průřez topným vláknem MULTICELL. 1 – odporový (chromniklový) drát; 2 – izolace (MgO); 3 – teplotně odolná slitina vnějšího obalu; 4, 5, 6 – samostatně ovladatelné topné zóny [38]

3.9 Cirkulační ohřivače

Cirkulační ohřivače jsou řešením pro ohřev vzduchu i jiných plynů, např. Ar, He, N a jejich směsí. Ohřivač ohřívá proudící tekutinu, když protéká jeho tělem. Jádrem topného tělesa je cívkový nebo ponorný ohřivač s přírubou, příp. zátkou instalovaný do trubkovité tlakové nádoby, kterou prochází ohřívané médium. Nádoba je tepelně izolovaná, aby se předešlo zbytečným ztrátám. Doporučuje se mezi nádobu a ohřivač vsadit panely, jak naznačuje obr. 3.9, které tvoří překážku proudícímu plynu a déle jej tak „zdrží“ v nádobě s ohřivačem. Nejvýkonnější cirkulační ohřivače (až 3 MW) jsou schopné ohřevu až na 1000 °C. Tento typ ohřevu se používá např. při zpracování ropy a zemního plynu, v HVAC systémech, v chemických závodech, při vysoušení textilu nebo v kontrolních systémech emisí. [37][38]



Obr. 3.9. Cirkulační ohřivač WATROD od firmy Watlow (podle [38])

4 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo seznámení se se způsoby ohřevu pracovního plynu u technologie kinetického nanášení. Postupně byla představena podstata metody jako takové, popsán vliv teploty pracovního plynu na kvalitu procesu, prezentovány výhody a nevýhody ve srovnání s termálními metodami povlakování. Další část práce se zabývala typy povlakovacích systémů pro KN včetně představení komerčních systémů, na což navazoval popis ohřevu pracovního plynu používaný při technologii KN. V poslední kapitole byla rozebrána problematika ohřevu plynu z pohledu typů použitých ohříváčů u jiných průmyslových procesů.

Z dostupných zdrojů bylo zjištěno, že v současnosti pracují ohříváče u systémů cold spray dvěma způsoby:

1. ohřev (cívkovým) vinutím,
2. ohřev vláknem,

přičemž oba způsoby poskytují odlišné výhody. Obě metody pracují na principu nepřímého odporového ohřevu, kdy je tepelná energie přeměňována z energie elektrické materiálem o vysoké rezistivitě vůči procházejícímu proudu. Používanější je ohřev vinutím, kdy je odporový drát namotán na trubce, příp. samostatně ve spirálu (cívku) a proudící plyn je ohříván při průchodu jeho vnitřním průměrem. Výhodou tohoto způsobu ohřevu je vysoký maximální výkon (až 40 kW u externího ohříváče, při speciální konstrukci integrovaného ohříváče až 70 kW), spolehlivost ohřevu a vysoký ohřev i při velkých průtocích plynu. Ohřev vláknem funguje na podobném principu jako žárovka; rozžhavené vlákno v tomto případě emituje primárně teplo, nikoli světlo. Výhodou ohřevu vláknem je rychlý náběh ohřevu, limituje jej ale nižší maximální výkon (do 17 kW) a pokles výkonu ohřevu při vyšších průtocích plynu.

V komerčních systémech se často vyskytuje ohřev „nadvakrát“; jednak plyn prochází přes externí ohříváč, jednak přes ohříváč integrovaný do předkomory Lavalovy trysky. Integrovaný ohříváč umožňuje regulaci teploty přímo před Lavalovou tryskou, tuto konfiguraci lze tedy jedině doporučit. Z průmyslových způsobů ohřevu se použitelnou alternativou k cívkovým ohříváčům jeví potrubní a cirkulační ohříváče, které jsou konstruovány a priori pro průtočný ohřev tekutin. Ostatní představené průmyslové způsoby ohřevu slouží spíše k ohřevu stojatých tekutin, jejich použití v průtočném stavu by bylo potřebné nejprve experimentálně vyzkoušet. Ohřev vláknem se v průmyslu používá nejčastěji ve spojení s tzv. teplou katodou, která ohřívá objekty díky termoemisi. Pro ohřev plynu není termoemise vhodná. V jiných aplikacích se tento způsob ohřevu sám o sobě kvůli nízkému maximálnímu výkonu neobjevuje. Výjimkou je zařazení točeného vlákna např. do cívkového ohříváče, čímž je topný výkon ještě zesílen.

Seznam použité literatury

- [1] PAPYRIN, A. – KOSAREV, V. – KLINKOV, S. – ALKHIMOV, A. – FOMIN, V. *Cold Spray Technology*. 1. vydání. Oxford: Elsevier. 2007. 328 s. ISBN 978-0-08-045155-8.
- [2] KURODA, S. – KAWAKITA, J. – WATANABE, M. – KATANODA, H. Warm spraying—a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles [online]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2008, vol. 9, no. 3, IOP Publishing. [cit. 2016-03-25]. URL: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1468-6996/9/3/033002>>. ISSN 1878-5514.
- [3] VAN STEENKISTE, T. The role of particle temperature and velocity in cold spray formation. In *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*. 1. vydání. Editoval Champagne, V. K. Cambridge: Woodhead Publishing. 2007. s. 127–147. ISBN 978-1-84569-181-3
- [4] LIANG-SHIH, F. – CHAO, Z. *Principles of Gas-Solid Flows*. 1. vydání. New York: Cambridge University Press. 1998. 558 s. ISBN 978-0-52-102116-6.
- [5] CRAWMER, D. E. Cold Spray Process. In *ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology*. vol. 5. Editoval Tucker Jr., R. C. Materials Park, Ohio: ASM International. 2013. s. 54–59. ISBN 978-1-61503-996-8
- [6] MORIDI, A. – HASSANI-GANGARAJ, S. M. – GUAGLIANO, M. – DAO, M. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives [online]. *Surface Engineering*, 2014, vol. 30, no. 6, s. 369–395. Taylor & Francis Ltd. [cit. 2016-03-27]. URL: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743294414Y.0000000270>>. ISSN 1743-2944.
- [7] ZAHIRI, S. H. – ANTONIO, CH. I. – JAHEDI, M. Elimination of porosity in directly fabricated titanium via cold gas dynamic spraying [online]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 2, s. 922–929. Elsevier. [cit. 2016-03-26]. URL: <<https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/elimination-of-porosity-in-directly-fabricated-titanium-via-cold-gas-wJp2VZY6R5?key=elsevier>>. ISSN 1873-4774.
- [8] ASSADI, H. – SCHMIDT, T. – RICHTER, H. – KLIEMANN, J.-O. – BINDER, K. – GÄRTNER, F. – KLASSEN, T. – KREYE, H. On Parameter Selection in Cold Spraying [online]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, no. 6, s. 1161–1176. Springer US. [cit. 2016-04-02]. URL: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11666-011-9662-9>>. ISSN 1544-1016.
- [9] PATTISON, J. – CELOTTO, S. – KHAN, A. – O'NEILL, W. Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process [online]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, no. 8, s. 1443–1454. Elsevier. [cit. 2016-04-15]. URL: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897207006950>. ISSN 1879-3347.
- [10] VILLAFUERTE, J. Recent trends in cold spray technology: looking at the future [online]. *Surface Engineering*, 2010, vol. 26, no. 6, s. 393–394. Maney Publishing. [cit. 2016-04-02]. URL: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1179/026708410X12687356948715>>. ISSN 1743-2944.
- [11] SCHMIDT, T. – GAERTNER, F. – KREYE, H. New Developments in Cold Spray Based on Higher Gas and Particle Temperatures. In *Thermal Spray 2006: Building on 100 Years of Success, Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference (Seattle, WA), May*

15–18, 2006. Materials Park, Ohio: ASM International. 2006. s. 488–194

[12] WALLIS, G. B. *One-dimensional two-phase flow*. 1. vydání New York: McGraw-Hill. 1969. 408 s. ISBN 978-0070679429.

[13] SCHMIDT, T. – GÄRTNER, F. – ASSADI, H. – KREYE, H. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition [online]. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, no. 3, s. 729–742. Elsevier. [cit. 2016-04-11]. URL: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645405005975>>. ISSN 1359-6454.

[14] YIN, S. – SUO, X. – LIAO, H. – GUO, Z. – WANG, X. Significant influence of carrier gas temperature during the cold spray process [online]. *Surface Engineering*, 2014, vol. 30, no. 6, s. 443–450. Maney Publishing. [cit. 2016-04-10]. URL: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1743294414Y.00000000276>>. ISSN 1743-2944.

[15] PIŇOS, J. *Studium vlastností kovových materiálů připravených technologií nízkoteplotního kinetického naprašování* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2013. 92 s. [cit. 2016-04-05]. URL: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=70445>. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Čížek, Ph.D.

[16] INVESTIS LIMITED. *Povrchové úpravy* [online]. Bodycote plc. ©2012–2014 [cit. 2016-04-12]. URL: <<http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/surface-technology.aspx>>

[17] SMITH, M. F. Comparing cold spray with thermal spray coating technologies. In *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*. 1. vydání. Editoval Champagne, V. K. Cambridge: Woodhead Publishing. 2007. s. 43–61. ISBN 978-1-84569-181-3

[18] KARTHIKEYAN, J. The advantages and disadvantages of the cold spray coating process. In *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*. 1. vydání. Editoval Champagne, V. K. Cambridge: Woodhead Publishing. 2007. s. 62–71. ISBN 978-1-84569-181-3

[19] CELOTTO, S. – PATTISON, J. – HO, J. S. – JOHNSON, A. N. – O'NEILL, W. The economics of the cold spray process. In *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*. 1. vydání. Editoval Champagne, V. K. Cambridge: Woodhead Publishing. 2007. s. 72–104. ISBN 978-1-84569-181-3

[20] CHAMPAGNE V. K. – HELFRITCH D. J. Mainstreaming cold spray – push for applications [online]. *Surface Engineering*, 2014, vol. 30, no. 6, s. 396–403. Taylor & Francis Ltd. [cit. 2016-04-02]. URL: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743294414Y.00000000277>>. ISSN 1743-2944.

[21] MCFARLAND, M. Repairing an airplane engine on a tight budget might become a lot easier [online]. *The Washington Post*. 22. listopadu 2013 [cit. 2016-04-11]. URL: <<https://www.washingtonpost.com/news/innovations/wp/2013/11/22/repairing-an-airplane-engine-on-a-tight-budget-might-become-a-lot-easier/>>. ISSN 0190-8286.

[22] LUMINORE COPPERTOUCH. *LuminOre CopperTouch - Antimicrobial copper* [online]. LuminOre CopperTouch. ©2016 [cit. 2016-04-21]. URL: <<http://www.luminorect.com/>>

- [23] CHAMPAGNE, V. K. *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*. 1. vydání Cambridge: Woodhead Publishing. 2007. 353 s. ISBN 978-1-84569-181-3.
- [24] HEINRICH, P. *Cold Spray Technology* [online]. Cold Spray Competence Group. ©2010–2015 [cit. 2016-05-01]. URL: <http://www.coldspraying.info/index_en.htm>
- [25] ASB INDUSTRIES, INC. *Cold Spray Equipment* [online]. ASB Industries, Inc. ©2015 [cit. 2016-05-01]. URL: <<http://www.asbindustries.com/cold-spray-equipment>>
- [26] VRC METAL SYSTEMS, LLC. *Products* [online]. VRC Metal Systems. ©2016 [cit. 2016-05-01]. URL: <<http://www.vrcmetalsystems.com/products.html>>
- [27] IMPACT INNOVATIONS. *Cold Spray Systems* [online]. Impact Innovations. ©2016 [cit. 2016-05-01]. URL: <http://www.impact-innovations.com/en/coldgas/cg_index_en.html>
- [28] ОБНИНСКИЙ ЦЕНТР ПОРОШКОВОГО НАПЫЛЕНИЯ. *Оборудование для холодного газодинамического напыления металлов ДИМЕТ* [online]. Обнинский центр порошкового напыления. ©2016 [cit. 2016-05-13]. URL: <<http://www.dymet-rus.ru/>>
- [29] INOVATI. *Kinetic Metallization: Equipment* [online]. Inovati. ©1999–2016 [cit. 2016-05-02]. URL: <<http://www.inovati.com/KMequipment/KM%20systems/KM-Equipment-new.php>>
- [30] PLASMA GIKEN CO., LTD. *Cold Spray System PCS-1000* [online]. Plasma Giken Co., Ltd. ©2016 [cit. 2016-05-02]. URL: <<http://www.plasma.co.jp/en/products/coldspray.html>>
- [31] HALUZA, Z. *Nepřímý odporový ohřev* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2013. 64 s. [cit. 2016-04-22]. URL: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67903>. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.
- [32] PAVELEK, M. – JANOTKOVÁ, E. – KAVIČKA, F. – JÍCHA, M. *Termomechanika*. 1. vydání Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2011. 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [33] FUKANUMA, H. – HUANG, R. Development of High Temperature Gas Heater in the Cold Spray Coating System. In *Thermal Spray 2009: Proceedings of the International Thermal Spray Conference* [online]. ASM International. 2009. s. 267–272. [cit. 2016-04-10]. URL: <<http://www.plasma.co.jp/about/pdf/2009-4.pdf>>.
- [34] BRAY, M. – COCKBURN, A. – O'NEILL, W. The Laser-assisted Cold Spray process and deposit characterisation [online]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 203, no. 19, s. 2851–2857. Elsevier. [cit. 2016-04-24]. URL: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897209002308>>. ISSN 1879-3347.
- [35] HÖLL, H. Stationary cold spray systems for industrial applications. In *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*. 1. vydání. Editoval Champagne, V. K. Cambridge: Woodhead Publishing. 2007. s. 232–244. ISBN 978-1-84569-181-3
- [36] *The new Generation of Cold Spray System KINETIKS 4000* [online]. [cit. 2016-04-11]. URL: <<http://tecnospray.net/download/polvereColdSpray.pdf>>

- [37] BUCAN ELECTRIC HEATING DEVICES INC. *Electric Heating Devices - Technical Information* [online]. Bucan Electric Heating Devices Inc. ©2016 [cit. 2016-05-03]. URL: <http://www.bucan.com/en/technical_information>
- [38] WATLOW ELECTRIC MANUFACTURING COMPANY. *Heating Gases* [online]. Watlow Electric Manufacturing Company. ©2016 [cit. 2016-05-03]. URL: <<http://www.watlow.com/Products/Heaters/Heater-Selection-Guide/Heating-Gases>>
- [39] BACKER ELEKTRO CZ. *Produkty* [online]. Backer Elektro CZ, a.s. ©2002–2014 [cit. 2016-05-03]. URL: <<http://www.backer-elektro.cz/produkty>>
- [40] FRIEDR. FREEK GMBH. *Products - Electric Heating Elements* [online]. Friedr. Freek GmbH. ©2016 [cit. 2016-05-03]. URL: <<http://freek-heaters.com/products/products/>>
- [41] CONDEX WATTCO INC. *Our Products* [online]. Condex Wattco Inc. ©2016 [cit. 2016-05-05]. URL: <<http://www.wattco.com/products.html>>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Rozměr	Veličina
a	[m/s]	Rychlost zvuku v nosném plynu
a_{ref}	[m/s]	Referenční rychlost zvuku v nosném plynu
a_t	[m/s]	Rychlost zvuku v hrdle trysky
c_1	[–]	Parametr procesního plynu
C_d	[–]	Koeficient odporu prostředí
c_{pg}	[J/kg·K]	Měrná tepelná kapacita při stálém tlaku
D_e	[m]	Průměr trysky na výstupu
d_h	[m]	Vnitřní průměr topného členu
d_p	[m]	Průměr částice
d_p^{ref}	[m]	Referenční průměr částice
d_t	[m]	Hydraulický průměr trubky
D_t	[m]	Průměr hrdla trysky
E_{ad}	[J]	Energie adheze
f	[–]	Kalibrační koeficient
G_m	[kg/s]	Hmotnostní tok
G_V	[m ³ /s]	Objemový průtok
I	[A]	Proud dodaný ohřívači
k_1	[–]	Velikostní faktor částice
k_b	[–]	Bezpečnostní koeficient
k_d	[–]	Efektivita povlakování
L_d	[m]	Délka divergentní části Lavalovy trysky
L_h	[m]	Délka topného prvku
l_w	[m]	Délka vodiče ve vinutí
M	[–]	Machovo číslo
m_g	[kg]	Hmotnost plynu
M_p	[kg]	Celková hmotnost částic prášku
Δm_s	[kg]	Změna hmotnosti substrátu

Symbol	Rozměr	Veličina
n	$[-]$	Parametr procesního plynu
N_h	$[-]$	Počet topných těles
Nu	$[-]$	Nusseltovo číslo
O_e	$[J]$	Energie odrazu částic od substrátu
p_0	$[Pa]$	Stagnační tlak plynu
P_p	$[W]$	Příkon ohříváče
P_U	$[W]$	Užitečný výkon topného prvku
P_Z	$[W]$	Ztrátový výkon
Δp_h	$[Pa]$	Hydrodynamický odpor ohříváče
Q_{wg}	$[J]$	Teplo odevzdané ohříváčem plynu
rr	$[J/kg \cdot K]$	Měrná plynová konstanta
R	$[J/mol \cdot K]$	Univerzální plynová konstanta
R_t	$[\Omega]$	Odpor topného článku
Re_h	$[-]$	Reynoldsovo číslo
S	$[m^2]$	Plocha topného tělesa (ohříváč–plyn)
S_w	$[m^2]$	Obsah průřezu vodiče ve vinutí
T	$[K]$	Teplota plynu
t_0	$[s]$	Doba ohřevu
T_0	$[Pa]$	Stagnační teplota plynu
T_g	$[K]$	Teplota plynu v ohříváči
T_m	$[K]$	Teplota tání částic prášku
T_p	$[K]$	Teplota částic prášku
T_{pi}	$[K]$	Teplota částic prášku při dopadu
T_s	$[K]$	Sutherlandova teplota
T_w	$[K]$	Teplota topného tělesa
ΔT_g	$[K]$	Velikost ohřevu plynu v ohříváči
U	$[V]$	Napětí na ohříváči
U_e	$[J]$	Energie elastické deformace
v	$[m/s]$	Rychlost plynu

Symbol	Rozměr	Veličina
v_1	[m/s]	Odhadovaná rychlost plynu
v_2	[m/s]	Odhadovaná rychlost částic na výstupu trysky
v_3	[m/s]	Odhadovaná rychlost částic při dopadu
v_{cr}	[m/s]	Kritická rychlost částic zaručující povlakování
v_{cr2}	[m/s]	Druhá kritická rychlost zaručující povlakování bez časového zdržení
v_{cr}^{ref}	[m/s]	Referenční kritická rychlost
v_{eroze}	[m/s]	Dopadová kritická rychlost způsobující změnu charakteru chování částic (adheze → eroze)
v_g	[m/s]	Rychlost plynu na výstupu z ohřívače
v_{max}	[m/s]	Maximální dosažitelná rychlost pro konečné p_0
v_p	[m/s]	Rychlost částic za letu
v_{pi}	[m/s]	Dopadová rychlost částic
W_U	[J]	Užitečná práce ohřívače
z	[m]	Osová vzdálenost od hrdla trysky
α	[W/m ² ·K]	Součinitel přestupu tepla
δ	[m]	Charakteristická tloušťka okrajové vrstvy bow-shock
δ_h	[m]	Tloušťka stěny topného elementu
η	[–]	Parametr kvality nanášení; kvocient dopadové rychlosti
η_g	[Pa·s]	Dynamická viskozita plynu
η_{0g}	[Pa·s]	Dynamická viskozita plynu při teplotě $T = 273\text{ K}$
κ	[–]	Poissonova konstanta
λ	[W/m·K]	Tepelná vodivost plynu
ρ	[kg/m ³]	Hustota plynu
ρ_0	[kg/m ³]	Stagnační hustota plynu
ρ_p	[kg/m ³]	Hustota částic prášku
ρ_w	[Ω·m]	Rezistivita materiálu topného článku

Zkratka	Význam
CVD	Chemicky řízená depozice
HPCS	Vysokotlaký cold spray
HVAC	Heating, ventilating, air conditioning system (systém vytápění, ventilace a klimatizace)
HVOF	High velocity oxy-fuel
KN	Kinetické nanášení
LACS	Laser-assisted cold spray
LPCS	Nízkotlaký cold spray
PVD	Fyzikální napařování
TS	Thermal Spray; vysokoteplotní metody

Seznam tabulek

Tabulka 2.1. Vliv materiálových a procesních parametrů na dopadovou a kritickou rychlost. ↑ značí nárůst, ↓ značí pokles, ↑↓ značí proměnlivé chování hodnoty rychlosti s růstem dané charakteristiky.....	17
Tabulka 2.2. Rozsahy provozních parametrů pro statický a přenosný systém cold spray.....	25

Seznam ilustrací

Obr. 2.1. Efektivita povlakování na rychlosti částic prášku pro (1) Al; (2) Co; (3) Ni; a (4) Zn (médium směs vzduch–He za pokojové teploty).....	14
Obr. 2.2. Vyleštěný měděný substrát po interakci s hliníkovým práškem o průměrné velikosti částic 30,2 μm při rychlostech částic (a) 730 m/s; (b) 780 m/s; a (c) 850 m/s.....	14
Obr. 2.3. Schematický popis bow-shock vrstvy.....	15
Obr. 2.4. Depoziční okno v rovině dopadová rychlost–teplota částic.....	19
Obr. 2.5. Parametrické mapy pro měď (prášek) a dusík (nosný plyn).....	20
Obr. 2.6. Srovnání metod TS a KN na základě rychlosti a teploty částic.....	22
Obr. 2.7. Měděné antimikrobiální prkénko (produkt LuminOre CopperTouch).....	23
Obr. 2.8. Příklad sestavení zbraně. 1 – Lavalova tryska; 2 – dávkovač prášku; 3 – ohřívač plynu; 4 – kontrolní modul plynu; 5 – přívod stlačeného vzduchu; 6 – zásobník plynu; 7 – předkomora.....	24
Obr. 2.9. Schéma typické pro statický a přenosný cold spray systém.....	25
Obr. 2.10. Přenosná zbraň Kinetiks 2000 společnosti Cold Gas Technology GmbH.....	26
Obr. 2.11. Systém Kinetiks 4000/47 s externím ohřívačem (30 kW). 1 – modul regulace plynu; 2 – dávkovač prášku; 3 – ohřívač 30 kW; 4 – zbraň Kinetiks 4000.....	27
Obr. 2.12. Schematický popis řezem systému Kinetiks 8000 od firmy Oerlikon Metco	27
Obr. 2.13. Zbraň a kontrolní jednotka systému ASB-2000-2 od ASB Industries.....	28
Obr. 2.14. Mobilní jednotka VRC Gen 3 Hybrid High-Pressure Hand-Held CS System.....	29
Obr. 2.15. Zbraň pro systém 5/11 (tryska, předkomora s ohřívačem).....	30
Obr. 2.16. Přenosné zařízení DYMET model 423.....	31
Obr. 2.17. Zařízení SD-6 k tryskání povrchů na bázi KN.....	31
Obr. 2.18. Manuálně ovládaná Handheld Gun systému Kinetic Metallization od Inovati.....	32
Obr. 2.19. Jednotka PCS-1000 společnosti Plasma Giken Co., Ltd.....	33
Obr. 2.20. Schéma ohřívače s vinutím. 1 – kryt; 2 – vinutí cívky; 3 – přívod plynu; 4 – odvod plynu; 5 – zdroj energie.....	34
Obr. 2.21. Oblast optimálních hodnot průměru a počtu topných článků. $G = 0,0245 \text{ kg/s}$, $L_h = 0,25 \text{ m}$. Křivky 2, 3, 4 a 5 odkazují 2., 3., 4. a 5. podmínku.....	37
Obr. 2.22. Schéma ohřevu pracovního plynu.....	38
Obr. 2.23. Teplota a příkon na ohřívačích pro ohřev N_2 na 900°C při 4 MPa.....	38
Obr. 2.24. Zjednodušené schéma LCS.....	39

Obr. 2.25. Ohřívač Linspray pro systém Kinetiks 4000.....	40
Obr. 2.26. Řez ohřívačem Linspray.....	40
Obr. 2.27. Ohřívač Kinetiks HT300/17 pro systém Kinetiks 4000.....	41
Obr. 2.28. Řez ohřívačem Kinetiks 300/17 od Cold Gas Technology GmbH.....	41
Obr. 2.29. Řez ohřívačem Kinetiks 300/30 od Cold Gas Technology GmbH.....	42
Obr. 2.30. Topné těleso o výkonu 25 kW ohřívače K-Tech Corporation.....	42
Obr. 3.1. Vinutí cívkového ohřívače z nerezové oceli.....	43
Obr. 3.2. Topná patrona s vnitřním napojením vývodů pro teploty do 450 °C společnosti Backer Elektro CZ.....	44
Obr. 3.3. Bubnový ohřívač pro ohřev barelů od společnosti Friedr. Freek GmbH.....	45
Obr. 3.4. Ponorný ohřívač se šroubovací zátkou od firmy Bucan.....	45
Obr. 3.5. Různé typy trubkových ohřívačů od firmy Bucan.....	46
Obr. 3.6. Nástin principu fungování potrubních ohřívač.....	47
Obr. 3.7. Žebrovaný pásový ohřívač výrobce Wattco.....	47
Obr. 3.8. Průřez topným vláknem MULTICELL. 1 – odporový (chromniklový) drát; 2 – izolace (MgO); 3 – teplotně odolná slitina vnějšího obalu; 4, 5, 6 – samostatně ovladatelné topné zóny.....	48
Obr. 3.9. Cirkulační ohřívač WATROD od firmy Watlow.....	48