



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

MECHANICKÉ VLASTNOSTI A JEJICH STANOVENÍ U MATERIÁLŮ PŘIPRAVENÝCH STUDENOU DEPOZICÍ

MECHANICAL PROPERTIES AND THEIR DETERMINATION IN MATERIALS PREPARED BY COLD
DEPOSITION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Hamr

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Zapletal, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: Ondřej Hamr
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Josef Zapletal, Ph.D.
Akademický rok: 2023/24

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:

Mechanické vlastnosti a jejich stanovení u materiálů připravených studenou depozicí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat rešeršní činností s úvodem k metodice přípravy vrstev či bulk materiálů metodou ColdSpray s následným popisem plejády možných metod testování mech. vlastností homogeních materiálů (malá a miniaturní tahová tělesa, tělesa typu Small Punch Test (SPT), metody testování přilnavosti povlaků a gradientních materiálů připravených metodou ColdSpray (adhezní, ohybové, odlupovací zkoušky atd.).

Cíle bakalářské práce:

1. Úvod do problematiky určování základních mechanických vlastností konstrukčních materiálů
2. Rešerše možností konvenčního stanovení mechanických vlastností materiálů
3. Rešerše problematiky malých a miniaturních těles pro tahové, ohybové a SPT testy
4. Experimentální stanovení mechanických vlastností na povlaku připraveného metodou ColdSpray vybrané konstrukční slitiny.

Seznam doporučené literatury:

[1] Li, W., Yang, K., Yin, S., Yang, X., Xu, Y., Lupoi, R.

Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review,

Journal of Materials Science & Technology, Volume 34, Issue 3, 2018, Pages 440-457, ISSN 1005-0302,

<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.09.015>.

[2] Raelison, R. N., Xie, Y., Sapanathan, T., Planche, M. P., Kromer, R., Costil, S., Langlade, C.

Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date, Additive Manufacturing, Volume 19, 2018, Pages 134-159, ISSN 2214-8604,

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.001>.

[3] LUCAS. G. E. The development of small specimen mechanical test techniques. Journal of Nuclear Materials, 1983.

[4] MATOCHA, K. Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů. VŠB, 2010. ISBN 978-80-248-2223-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konvenčními mechanickými vlastnostmi a jejich stanovením. Dále se bakalářská práce zabývá určením mechanických vlastností na malých a miniaturních zkušebních tělesech se zaměřením na tahové a ohybové zkoušky miniaturních rozměrů a zkoušku small punch testu. V závěru práce byly provedeny experimenty, kde na materiálu pevnostní slitiny AA 7075 nanesené kinetickou studenou depozicí byly zkoumány mechanické vlastnosti malých a miniaturních rozměrů. Experiment byl zaměřen na tahovou a ohybovou zkoušku malých těles a poté na small punch test a následnou korelaci výsledků.

Klíčová slova

Small punch test, malá a mikro zkušební tělesa, Cold Spray, slitina AA 7057

ABSTRACT

The bachelor thesis focuses on conventional mechanical properties and their determination. Additionally, this work contains the methods of determination of mechanical properties using small and miniature test specimens with a focus on tensile and bending tests of miniature size and small punch test. In the conclusion of this work, experiments were carried out, where the mechanical properties of small and miniature dimensions were investigated on the AA 7075 strength alloy, which was applied by kinetic cold deposition. The focus of the experiment on the tensile and bending tests of small specimens followed by the small punch test and the subsequent correlation of the observed results.

Key words

Small punch test, small and mikro test specimens, Cold Spray, alloy AA 7057

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAMR, Ondřej. Mechanické vlastnosti a jejich stanovení u materiálů připravených studenou depozicí [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157545>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Josef Zapletal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Mechanické vlastnosti a jejich stanovení u materiálů připravenou studenou depozicí* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doktoru Josefu Zapletalovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Také děkuji panu inženýru Jakobovi Judasovi rovněž za cenné rady, věcné připomínky a pomoc s prováděním experimentů této závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD	1
1 Cíle práce	2
2 Aditivní technologie – metoda kinetické studené depozice Cold Spray	3
2.1 Základní rozdělení aditivních materiálů	3
2.2 Cold Spray – historie metody kinetické studené depozice	3
2.3 Princip studené depozice – Cold Spray	4
2.4 Dělení studené depozice – Cold Spray	5
Nízkotlaká studená depozice – LPCS (Low Pressure Cold Spray).....	6
Vysokotlaká studená depozice – HPCS (High Pressure Cold Spray).....	6
Parametry ovlivňující kinetickou studenou depozici	7
3 Základní mechanické vlastnosti.....	9
Pevnost	9
Pružnost.....	9
Tvárnost.....	9
Houževnatost.....	9
4 Konvenční postupy stanovení mechanických vlastností	10
4.1 Zkouška tahem.....	10
4.2 Zkouška ohybem.....	13
5 Měření deformace na malých a miniaturních vzorcích	15
5.1 Kontaktní měření deformace malých a miniaturních vzorků	15
Kontaktní extenzometry	15
5.2 Bezkontaktní měření deformace malých a miniaturních vzorků.....	16
Laserové extenzometry	16
Video extenzometry	17
Digitální korelace obrazu – DIC (Digital Image Correlation)	17
6 Zkoušení malých a miniaturních zkušebních vzorků	19
6.1 Zkouška tahem na malých a miniaturních vzorcích	19
6.2 Vlivy ovlivňující vyhodnocování zkoušek na miniaturních vzorcích	22
Velikost a počet zrn v miniaturních vzorcích	22
Drsnost povrchu miniaturních vzorků.....	23
Chemická heterogenita miniaturních vzorků	24
6.3 Mechanické zkoušky těles mikro rozměrů	24
7 Small punch test – SPT.....	27
7.1 Zkušební těleso	27
7.2 Odběr materiálu vzorku	28

7.3	Tvar razníku a matrice	29
7.4	SPT penetrační zkouška	31
	Zkušební postup.....	31
	Charakteristické naměřené křivky pro SPT – penetrační zkoušku.....	31
7.5	SPT creepová penetrační zkouška.....	33
	Charakteristické parametry křivky deflexe – čas	34
	Teploty a jejich odchylky při SPT creepové penetrační zkoušce.....	35
7.6	Odhad meze pevnosti v tahu R_m a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na základě penetračního zkoušení.....	35
7.7	Odhad lomové houževnatosti na základě penetračního zkoušení.....	37
8	Experimentální část.....	38
8.1	Popis experimentální materiál AA 7075 pro studenou kinetickou depozici....	38
8.2	Parametry nástřiku prášku – Cold Spray.....	41
8.3	Zkouška tahem – AA 7075 Cold Spray	42
	Geometrie zkušební vzorku – zkouška tahem	42
	Výsledky tahových zkoušek	43
8.4	Zkouška ohybem – AA 7075 Cold Spray	44
	Geometrie zkušební vzorku – zkouška ohybem	44
	Výsledky ohybových zkoušek	44
8.5	Small punch test – AA 7075 Cold Spray	45
	Geometrie zkušební vzorku – zkouška SPT	46
	Výsledky zkoušek SPT	46
	Fraktografie – zkouška SPT	47
	Korelace výsledků – zkouška SPT	49
	DISKUSE	50
	ZÁVĚR.....	52
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	60
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	63
	SEZNAM OBRÁZKŮ	64
	SEZNAM TABULEK	66

ÚVOD

Požadavky dnešní doby směřují k neustálému snižování nákladů spjatých s vyhodnocováním mechanických vlastností materiálů, tudíž zvyšování rychlosti vyhodnocení mechanických zkoušek a snížení množství odebíraného materiálu, na kterém se mechanické zkoušky vyhodnocují. Spolu se snižováním množství potřebného materiálu pro vyhodnocení mechanických zkoušek se zároveň zvyšuje ekologičnost celého procesu. V případech konvenčního stanovení mechanických vlastností, např. za pomoci tahové zkoušky, potřebujeme normalizované zkušební těleso. Pokud odběr materiálu provádíme přímo z funkční části zařízení, pak je potřeba jej nahradit, a to bývá v běžné praxi obtížně proveditelné. Odebraná funkční část se často pak v praxi navaňuje. Vzniká teplotně ovlivněná oblast, popřípadě nastává jiná technologická či konstrukční úprava pro obnovení funkčnosti součástí či zařízení, která může být vznikem následných defektů v průběhu degračních procesů nebo opotřebení.

Pro materiály připravené studenou depozicí často nemáme možnosti odebrat materiál na přípravu zkušebního tělesa v takovém rozsahu, abychom jej vyrobili, tudíž se musíme uchýlit ke zmenšení zkušebního tělesa a vyhodnocovat mechanické vlastnosti v rámci malých, případně miniaturních rozměrů. Práce dále vyhodnocuje výsledky mechanických vlastností stanovených metodou small punch test, která se rovněž drží trendu minimalizovat odběr potřebného materiálu k jeho vyhodnocení.

1 Cíle práce

- a) Úvod do problematiky určování základních mechanických vlastností konstrukčních materiálů**
- b) Rešerše možností konvenčního stanovení mechanických vlastností materiálů**
- c) Rešerše problematiky malých a miniaturních těles pro tahové, ohybové a SPT testy**
- d) Experimentální stanovení mechanických vlastností na povlaku připraveného metodou Cold Spray vybrané konstrukční slitiny**

2 Aditivní technologie – metoda kinetické studené depozice Cold Spray

Aditivní technologie spadají do nekonvenční výroby strojních součástí. Jedná se o relativně nové, moderní metody, které nacházejí velká uplatnění v technicky nejnáročnějších odvětvích, jako je automobilové, letecké a kosmické inženýrství. Materiály v těchto odvětvích převážně musí odolávat velmi náročným podmínkám. Především se jedná o extrémní tlaky a teploty.

Už z názvu aditivní technologie fungují na základě nanášení přídatného materiálu. Objem materiálu tedy roste kontinuálně, což je značnou výhodou oproti konvenčnímu obrábění, kde se objem naopak zmenšuje a odpadá ve formě třísek. Spojnicí všech aditivních technologií je tvorba tenkých vrstev, které se mezi sebou spojují a vzniká tak tuhé těleso. [1, 2]

2.1 Základní rozdělení aditivních materiálů

Kvůli krátké době na trhu se aditivní technologie neustále vyvíjejí a inovují. Mezi hlavními představiteli aditivních technologií patří:

FDM – Fused Deposition Modeling, což je protlačovací metoda hojně používaná pro výrobu součástí z termoplastových a kompozitních materiálů.

Material Jetting – Jedná se o tryskání nataveného materiálu na podložku. Takto tryskat se dají kovy, popřípadě polymery. Metoda se vyznačuje značnou přesností.

Binder Jetting – Metoda založená na nástřiku prášku s pojivem. Tvoří se tenké vrstvy, které se navzájem propojí a vznikne tuhé těleso. Binder Jetting je aplikovatelný pro řadu materiálů od kovů, přes keramiky, až po plasty.

Power Bed Fusion – Materiál ve formě prášku je spojován koncentrovaným paprskem energie, například laserem nebo elektronovým paprskem. Pod tuto metodu spadá i známá technologie SLM – Selective Laser Melting.

DED – Directed Energy Deposition je metoda nanášení a spojování buď prášku nebo drátu. Zařízení je ovládáno nejčastěji na pěti – osém stroji, za jeho pomoci je užití této technologie vhodné pro přímé opravy strojních součástí bez potřeby demontáží.

HP Jet Fusion – Metoda spočívající v nánosu tenké černé vrstvy barvy do tvaru budoucí součásti. Barva je nanášená na bílý prášek vyrobený v zásadě z plastu, který se teplotně udržuje těsně pod bodem tavení. Následně se prášek spolu s nánosem osvítlí. Černá natištěná část absorbuje větší množství tepla, nataví se a spojí s plastovým práškem pod ním. Obrovskou předností této technologie je rychlost výroby součástí. [2]

V neposlední řadě do aditivních technologií patří i metoda kinetické studené depozice neboli Cold Spray. V mé experimentální části této bakalářské práce se zabývám mechanickými vlastnostmi materiálů nanášených studenou depozicí, tudíž se v následujících kapitolách na tento druh aditivní technologie podíváme trochu detailněji.

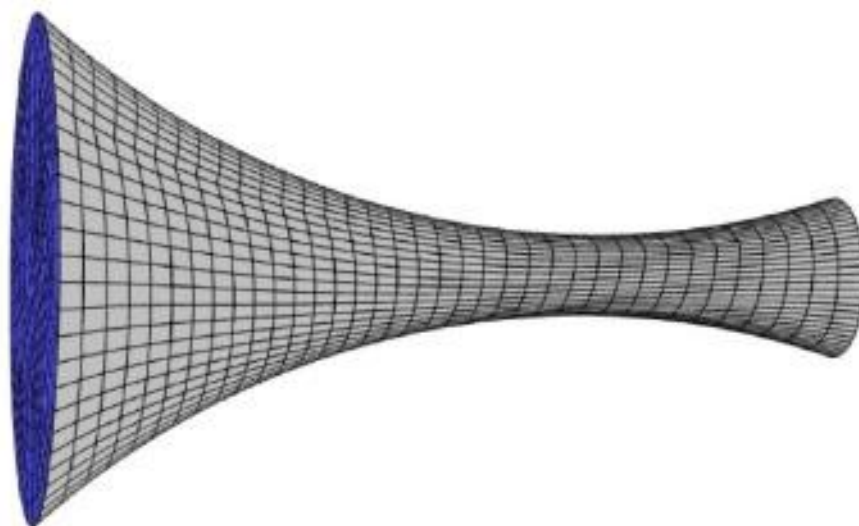
2.2 Cold Spray – historie metody kinetické studené depozice

Prvopočátky nanášení povlaku za studena se datují už do počátku 20. století, kde se objevil první patent – Method of impacting one metal upon another (patent no. 706,701) pro nanášení více vrstev kovů na sebe od Thurstona. Patent pojednává o doslovném nástřelu

relativně velkých částic kovů na terč z vyrobený rovněž z kovu. Spojení probíhá na základě vtlačení částice do terče za přítomnosti velké kinetické energie nastřelované částice. [3]

O několik let později ve druhé polovině 20. století se projevila znalost Lavalovy trysky, známou také jako Lavalova dýza, což je konvergentně – divergentní zařízení, které svou geometrií urychluje proudění v ní, viz **Obrázek 2-1**. Využívá Venturiho efektu (znám také jako aerodynamický nebo hydrodynamický paradox), který uvádí ve skutečnost, že tlak proudící kapaliny je přímo úměrný její rychlosti. Tento efekt lze odvodit z Bernulliho rovnice a rovnice kontinuity. [4]

Tohoto poznatku využil pan C. F. Rochevillem, který si nechal patentovat relativně podobnou metodu jako pan Thurston, ovšem za použití právě zmíněné Lavalovy trysky. V této době se vžily nánosy o velmi malých tloušťkách, které se do následných výzkumů obtiskly. [3]



Obrázek 2-1 - Geometrický model Lavalovy dýzy [5]

Posledním článkem řetězce vývoje Cold Spray (dále jen CS) se stal v Rusku na konci osmdesátých let 20. století. Průkopníci se staly členové Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ITAM of RAS), kteří jako první, při zkoumání vysoce urychlených erozních částic dopadajících na povrch součásti v aerodynamickém tunelu, zjistili schopnost práškových částic se nedeponovat na povrch základního („otryskávaného“) materiálu. Jednalo se tedy o dvoufázový proud (plyn + práškové částice). V důsledku tohoto objevu nastal následný vývoj a výzkum nízkoteplotních nástřiků. Z počátku se především zaměřovali na úpravu integrálních parametrů, jimž byl například odpor nebo tepelný tok. Po úpravách všech parametrů a vývoji nanášecího stroje se metoda nazvala studená kinetická depozice aneb Cold Gas Dynamic Spray. Tento název se vžil a používá se dodnes. [3]

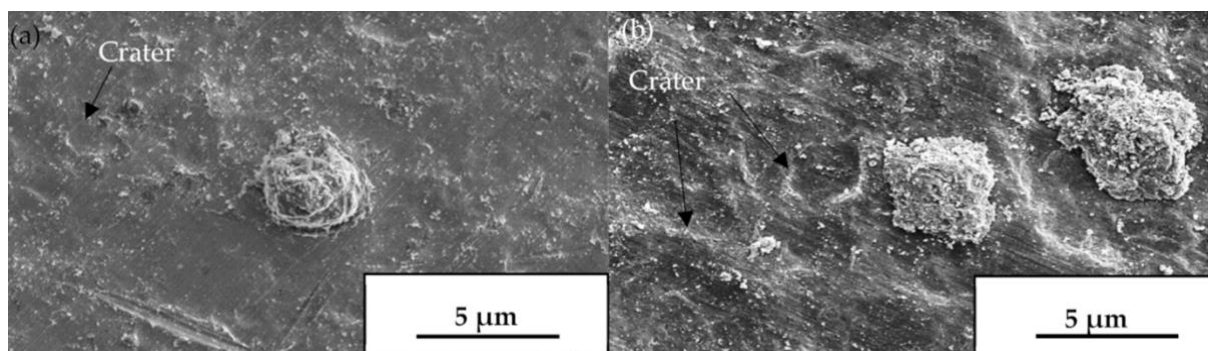
2.3 Princip studené depozice – Cold Spray

Jedná se o vysokorychlostní nanášení práškových částic na základní materiál. Charakteristikou, nesoucí v samotném názvu této metody, je nízká teplota nanášení, která se pohybuje značně pod bodem tání daného materiálu. V Lavalově trysce se urychluje nosné médium, kterým je zpravidla inertní plyn. Nejčastěji se jedná o dusík – N_2 , nebo hélium – He.

Do takto urychleného nosného média se přidávají práškové částice, které jsou unášeny a urychlovány směrem k základnímu materiálu. Ke spojení částic se základním materiálem, popřípadě s již nanesenou vrstvou, nedochází v důsledku natavení částic, ale nárazu částic, které mají vysokou kinetickou energii. Částice se rozměry pohybují maximálně v řádech desítek mikrometrů. [3]

Spojení nanášeného prášku se základním materiálem neboli substrátem uplatňuje řada komplexních mechanismů interakcí mezi částicemi a substrátem a mezi samotnými částicemi. Mechanismus samotné kinetické studené depozice se dá rozdělit do čtyř základních fází.

V první fázi nastává nástřik první vrstvy prášku na substrát. Začínají vznikat krátery v substrátu za pomoci velké kinetické energie částic. Tento jev lze pozorovat na **Obrázku 2-2**, který pochází z práce zabývající se nástřikem TiO_2 částic na dva různé substráty čistých kovů. V této první části nenastává ke tvorbě kovových vazeb. Částice jsou se substrátem spojeny pouze adhezivně. [6–8]



Obrázek 2-2 - SEM obrázek první vrstvy Cold Spray nástřiku na a, čistě měděný substrát C1020 a b, čistě hliníkový substrát AA1050 [8]

Druhou fází nástřiku je částečné zhutnění částic a jejich deformace. Dochází zde k zaplnění první vrstvy na substrátu a částečné tvorbě následných vrstev, především interakce mezi substrátem a částicemi. Ke konci této fáze nastávají první interakce mezi částicemi.

Ve třetí fázi již nastávají zpravidla interakce mezi částicemi, kde se již vytvářejí kovové vazby. Pokračuje kontinuální deformace částic a zhutňování vrstvy. Zbylé dutiny se zaplňují a tím se zvedá hustota samotné vrstvy.

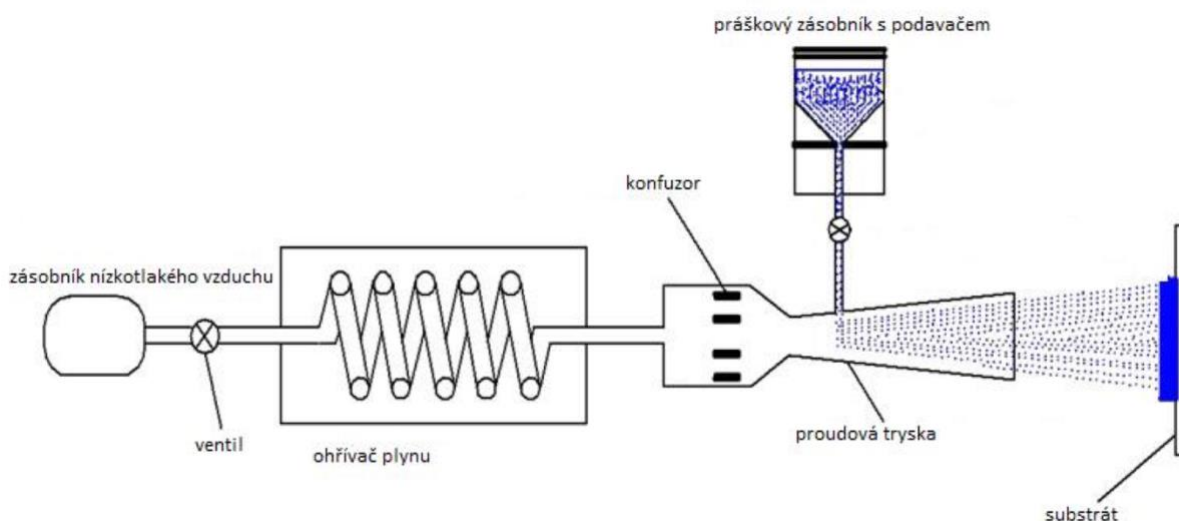
Poslední, čtvrtá fáze nástřiku je finální část celého procesu, kde poslední zbylé dutiny jsou maximálně vyplněny a zhutnění vrstvy se blíží ke 100 %. V důsledku velké rychlosti částic může docházet, nejen v poslední fázi, ke tvorbě nežádoucích defektů, jako jsou například: eroze samotné vrstvy nebo popraskání. [6, 7, 9]

2.4 Dělení studené depozice – Cold Spray

Metoda kinetické studené depozice se primárně dělí z hlediska tlaku nanášených částic. Jedná se tedy o rozdělení na nízkotlakou a vysokotlakou studenou depozici. Metody se liší nejen v tlacích, ale zároveň i v nanášecích rychlostech a dosahovaných teplotách.

Nízkotlaká studená depozice – LPCS (Low Pressure Cold Spray)

Technologie nízkotlakého nanášení Cold Spray jsou vyvíjeny již od roku 2002, kde s prvním nápadem nízkotlaké depozice přišel Kashirin z USA. Následovala řada úprav a vylepšení, kde hlavní inovaci přinesl Kyrsa a kol. s využitím dvojí trysky. Hnací prášek v nosném médiu je dodáván nezávisle do dvou urychlovacích trysek. Tento systém byl navržen tak, aby byl schopen nanášení v relativně širokém rozsahu práškových částic. Díky tomuto vynálezu firma Rus Sonic Technology Inc., která je z USA, začala stroje pro nanášení nízkotlaké studené depozice vyrábět.

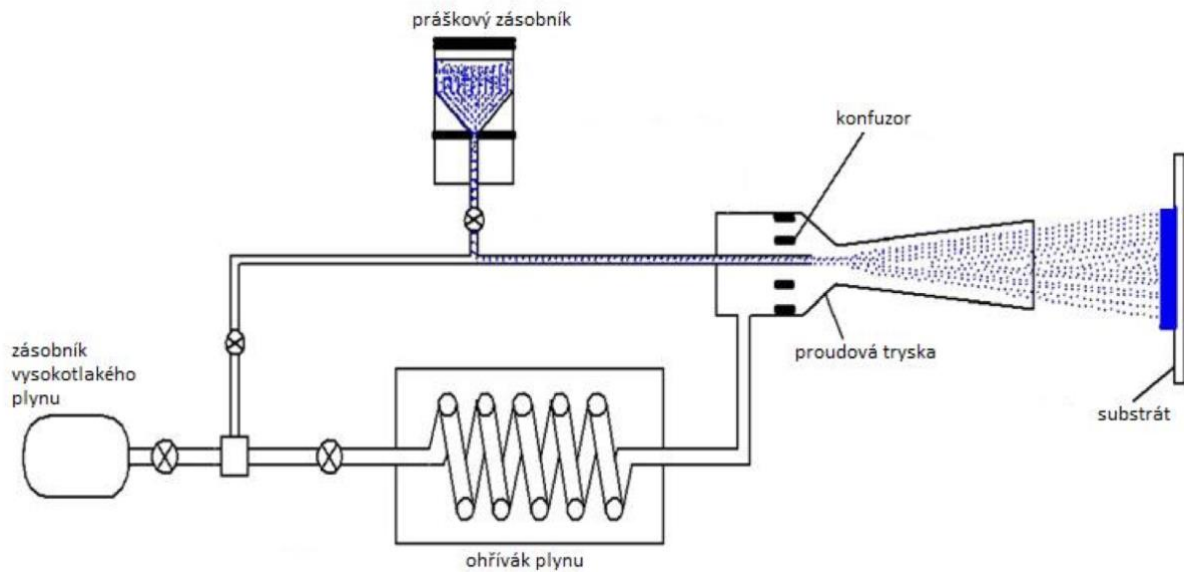


Obrázek 2-3 - Schéma zařízení pro LPCS původně [10], upraveno [11]

Nosné médium v tomto případě je nejčastěji vzduch nebo dusík a urychlovací tryskou je myšlena Lavalova dýza/tryska nebo jiná geometrie trysky, která částice dokáže v dostatečné míře urychlit, tj. zvýšit kinetickou energii. Rychlosti u LPCS se pohybují řádově mezi 300 až 600 m/s. Prášek se v tomto případě, viz **Obrázek 2-3**, umísťuje do nosného média až v samotné urychlovací trysce, kde je poté urychlen a nanesen na substrát. [11, 12]

Vysokotlaká studená depozice – HPCS (High Pressure Cold Spray)

Při vysokotlaké kinetické studené depozici dochází k nárustu všech parametrů nástřiku. Zvyšuje se například tlak nosného média, a to až do 10MPa, které zde tvoří buď dusík nebo hélium, který unáší částice prášku. Zároveň se zvyšuje rychlost unášených částic, která může dosahovat až 1200 m/s (maximální rychlosti se liší podle užitého zařízení). [13] Teplota nanášecího média dosahuje hodnot až 1000 °C. Při zahřívání plynu bychom neměli překročit teplotu tavení, a to jak substrátu, tak i nanášeného prášku. Konstrukce celé soustavy HPCS může být provedena, viz **Obrázek 2-4**.



Obrázek 2-4 - Schéma zařízení pro HPCS původně [10], upraveno [11]

Prášek se v tomto případě smíchává s nosným médiem v konvergentní části trysky. Částice jsou tedy urychleny spolu s médiem a následně naneseny na substrát. Předehřev média je principiálně stejný jako u LPCS. Prášek se do konvergentní části trysky dostává rovněž prostřednictvím nosného média. Prášek je uložen v práškovém zásobníku (federu), který dávkuje potřebné množství pro kvalitní nanášení. Toto množství je regulováno ventilem, který je možné pozorovat, viz **Obrázek 2-4**. Uložení práškového podavače je buď axiální neboli souběžné se směrem toku nosného média anebo radiální, které je umístěno kolmo k toku proudění.

Existují i nástřiky, které kombinují hned několik prášků najednou. Jejich smíchání může nastat jak mimo celkový systém LPCS vers. HPCS, tak i v něm. Pro smíchání více prášků přímo v systémech CS je zapotřebí více práškových zásobníků, které za užití redukčních ventilů namíchávají přesný poměr jednotlivých prášků. Takto vzniklá prášková směs se poté deponuje na substrát a vzniká kombinovaný povlak.

Parametry ovlivňující kinetickou studenou depozici

Účinnost je parametr charakterizující téměř jakoukoliv výrobní technologii. Pro kinetickou depozici je vzhledem k depozičním časům a ceně prášků zásadní rovněž. Pro HPCS účinnost depozice/povlakování dosahuje až 90 %. Účinnost depozice DE [%] jsme schopni vyčíslit pomocí následujícího vztahu, který vychází z poměru hmotnosti naneseného povlaku m_s [kg] a celkové, tedy výchozí hmotnosti daného prášku M_p [kg].

$$DE = \frac{m_s}{M_p} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Pro kvalitní spojení částic se substrátem a následujícího spojení jednotlivých vrstev je potřeba určit kritickou rychlost. Jedná se o rychlost, která je charakteristická pro každý nanášecí materiál, ovšem pro její stanovení je zapotřebí znát hned několik parametrů. Je mnoho

experimentálně ověřených vztahů, jak kritickou rychlost můžeme určit. Literatura označuje kritickou rychlost V_{krit} [m/s], ale můžeme se setkat i s označením V_c , popřípadě V_{crit} .

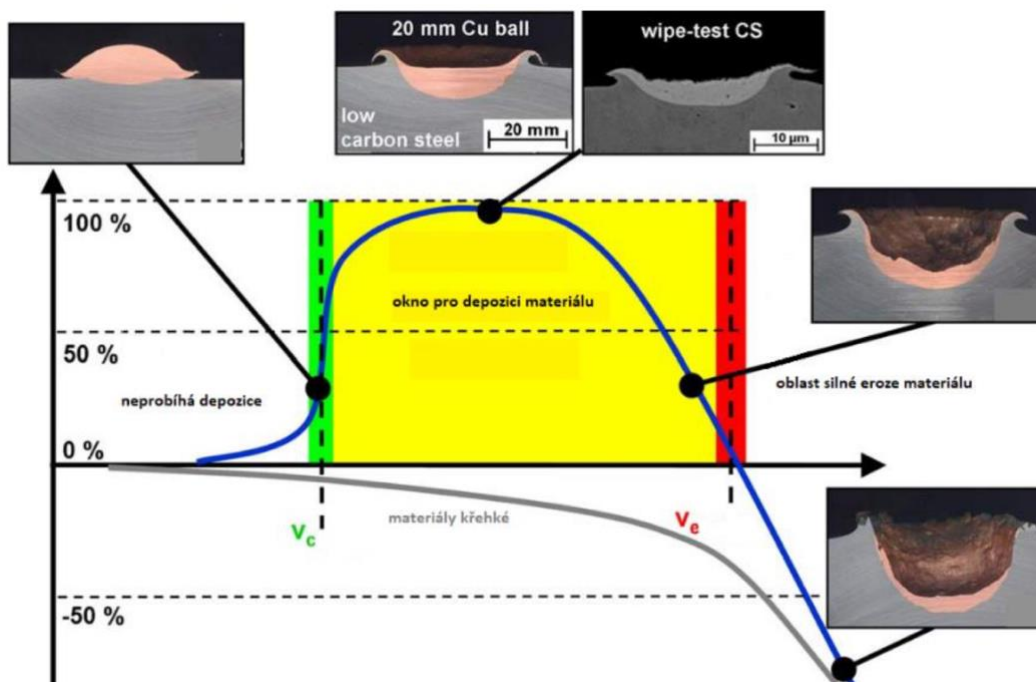
První vztah pro výpočet kritické rychlosti deponujících částic vychází z literatury [14, 15]. Tento vztah vůči v pořadí druhému vztahu pro výpočet kritické rychlosti částic, uvažuje méně proměnných. Následující vztah zohledňuje objemovou hustotu prachových částic ρ [kg/m³], teplotu tavení použitého materiálu částic T_m [°C], teplotu částic při dopadu na substrát T_i [°C] a pevnost práškové částice σ_u [MPa]. [11]

$$V_c = 667 - 14 \cdot \rho + 0,08 \cdot T_m + 0,1 \cdot \sigma_u - 0,4 \cdot T_i \quad (2.2)$$

Další vztah pro určení kritické rychlosti již uvažuje několik ovlivňujících parametrů. Výpočet je tudíž objektivnější a dle experimentálních studií i přesnější. Správné určení kritické rychlosti je klíčové pro vysokou hodnotu účinnosti CS. Vztah kombinuje parametry z předchozí rovnice a doplňuje je o mez kluzu v tahu σ_{TS} [MPa], měrnou tepelnou kapacitu za stálého tlaku C_p [J/kg·K], referenční teplotu okolí T_R [K] a dva kalibrační koeficienty – mechanické F_1 [-] a termické F_2 [-]. [11, 16]

$$V_c = \sqrt{\frac{F_1 \cdot 4 \cdot \sigma_{TS} \cdot \left(1 - \frac{T_i - T_R}{T_m - T_R}\right)}{\rho} + F_2 \cdot C_p \cdot (T_m - T_i)} \quad (2.3)$$

Kritická rychlost pro konkrétní materiál není většinou jedna hodnota, nýbrž interval, ve kterém je účinnost deponovaných částic maximální. Pokud se toto depoziční okno překročí, rychlost se tudíž zvýší, pak rychlost označujeme V_e [m/s] – erozivní rychlost, která je přísně nevhodná pro nanášení CS povlaků. Tuto skutečnost lze pozorovat, viz **Obrázek 2-5**.



Obrázek 2-5 - Graf závislosti kritické síly deponovaných částic na účinnosti deponování, nástřik prášek – Cu na substrát – nízkouhlíkovou ocel [17], upraveno [7]

3 Základní mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti materiálů jsou nám užitečnou směrnicí pro konkrétní a funkční aplikace. Pokud známe mechanické vlastnosti materiálů, pak můžeme cíleně používat materiály dle výpočtů konstrukčních požadavků a zbytečně nepředimenzovávat a zároveň nebezpečně nepoddimenzovávat konstrukční prvky. Mezi základní mechanické vlastnosti patří: pevnostní charakteristiky v tahu, tlaku, ohybu, krutu, střihu (smyku), tvárnost – plasticita, pružnost – elasticita a houževnatost. Všechny tyto základní vlastnosti jsou stěžejní při určování vhodnosti či vyhodnocování nevhodnosti materiálů pro konkrétní aplikace. Jednou z hlavních směrnic pro bezpečné aplikace je mechanická charakteristika pevnostní tahová s konkrétní hodnotou meze pevnosti v tahu R_m [MPa] a meze kluzu R_e [MPa].

Pevnost

Obecně pevnost je schopnost materiálu odolávat vnějším silám, které do materiálu vnášejí smyková a normálová napětí. Obecně se jakákoliv pevnostní charakteristika udává v jednotkách Pa, ovšem reálné hodnoty jsou velmi vysoké, a tak se vžil jednotka MPa, která je definována silou působící na plochu. To, ve kterém místě či jakým směrem síla působí, popřípadě k jaké ploše dané silové působení vztahujeme, nám udává konkrétní napětíovou charakteristiku. Tyto napětíové charakteristiky jsou meze pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu, střihu, popřípadě smyku, jak bylo již zmíněno výše.

Pružnost

Jedná se o schopnost materiálu vrátit se do původního tvaru po odtížení působení vnější zatěžující síly. Pokud je materiál pružný neboli elastický nedochází k pohybu dislokací a tím k plastické, nevratné deformaci. Pružné materiály jsou charakteristické svou vysokou lomovou houževnatostí. Pokud se pohybujeme v elastické deformaci a nepřekročíme mez úměrnosti, pak platí Hookův zákon, který je definován jako poměr napětí σ [MPa] a Youngova modulu pružnosti E [GPa], což se rovná poměrnému prodloužení ε [-].

Tvárnost

Plasticita neboli tvárnost je schopnost materiálu se plasticky deformovat. Jedná se o trvalou a nevratnou deformaci. Tvárnost materiálů vyžadujeme, pokud potřebujeme materiál jakkoliv jej plasticky trvale deformovat. Dobrým příkladem potřeby užití tvárných materiálů je hluboké tažení. Zde potřebujeme, aby materiál vykazoval výbornou tvárnost. V případě tahového diagramu se pohybujeme za mezí kluzu a před mezí pevnosti.

Houževnatost

Obecně houževnatost je schopnost materiálu přijmout množství energie, než dojde k porušení materiálů, popřípadě ke kritickému rozšíření trhliny. V případě tahového diagramu se houževnaté materiály vyznačují velkou plochou pod křivkou. Samotná plocha vyjadřuje práci potřebnou k přetrhnutí zkušební vzorku. Určování houževnatosti probíhá za pomoci více možných zkoušek. Přední mechanické charakteristiky pojednávající o houževnatosti materiálu jsou vrubová houževnatost a lomová houževnatost. Obě tyto mechanické charakteristiky se zjišťují mechanickými zkouškami, které podléhají příslušným normám, tj. Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – ČSN EN ISO 148-1 a Lomová houževnatost kovů při statickém zatížení – ČSN 42 0347.

4 Konvenční postupy stanovení mechanických vlastností

Zásluhou mechanických zkoušek můžeme vyhodnotit mechanické vlastnosti. Jedná se o typickou materiálovou charakterizaci, která je potřebná pro určení materiálu při drtivě většině aplikací, jak konstrukčních, tak i technologických prvků. Obecně můžeme mechanické zkoušky dělit podle několika kritérií. Dělení podle časového hlediska je na dlouhodobé a krátkodobé. Další rozdělovací charakterizací je rychlost zatížení (rychlost průběhu zkoušky), kde se zkoušky dělí na statické a dynamické. Konvenčně se jedná o zkoušky tahem, zkoušky ohybem, zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy, zkoušky tvrdosti, a to jak dle Brinella, Rockwella i Vickerse, a mnoho dalších.

V této práci se především zaměříme na zkoušku tahem a zkoušku ohybem, které jsme měřili v experimentální části této práce, ovšem na malých a miniaturních tahových tělesech.

4.1 Zkouška tahem

Hlavní materiálové charakteristiky plynou právě ze zkoušky tahem. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších mechanických zkoušek. Aktuálně o ní hovoří platná norma ČSN EN ISO 6892-1, která vyšla v platnost roku 2020. Další dodatky normy, ČSN EN ISO 6892-2 a ČSN EN ISO 6892-3, uvádí parametry zkoušky za zvýšených a snížených teplot. [18–20]

Výše uvedená norma pro zkoušku tahem zmiňuje několik zásadních parametrů pro správné nastavení, průběh a vyhodnocení. Jedním z těchto parametrů je tvar a velikost tahových těles. Nejčastěji se tahová zkušební tělesa používají s příčným průřezem kruhovým, obdélníkovým nebo čtvercovým, ovšem existují i jiné typy těles. Různé typy tahových těles lze pozorovat, viz **Obrázek 4-1**. Základní dělení těchto zkušebních těles je na poměrná a nepoměrná. Pro poměrná zkušební tělesa je jasně definovaný poměrný koeficient k [-] a to, buď 5,65, nebo 11,3. [20]



Obrázek 4-1 - Různé typy zkušebních těles pro zkoušku tahem [21]

Norma ČSN EN ISO 6892-1 uvádí počáteční plochu příčného průřezu S_0 [mm²], počáteční tloušťku plochého zkušební tělesa a_0 [mm], počáteční šířku plochého zkušební tělesa b_0 [mm], počáteční měřenou délku L_0 (také v literatuře ekvivalentní symbol l_0) [mm], zkoušenou délku L_c [mm], celkovou délku zkušební tělesa L_t [mm]. [20, 22]

Zkušební těleso po zkoušce tahem, kde oddělené dvě části vzorku jsou k sobě opět přiloženy a následně je změřena konečná délka po lomu L_u [mm]. Pro vzorky s kruhovým průřezem poté nastává zúžení průměru D_u [mm]. [20]

Při provádění tahové zkoušky je zkušební vzorek natahován silou F [N] neboli zatěžován napětím σ [MPa]. Následně je sledovaná délková změna ΔL [mm] popřípadě poměrné prodloužení ε [-]. Po propojení těchto hodnot do grafů a vytvoření závislosti napětí na poměrném prodloužení a síle na prodloužení, můžeme vyhodnocovat typické tahové charakteristiky. Tyto charakteristiky se dělí na napětíové a deformační. [20, 23, 24]

Mezi základní napětíové charakteristiky patří:

- E [MPa] – Modul pružnosti odpovídá odporu materiálu vůči deformaci, kde zatěžující síla je kolmá na plochu příčného průřezu. Celý tento jev je charakteristický v oblasti malých deformací. [23, 24]
- R_e [MPa] – Výrazná mez kluzu je důsledkem náhlého nárůstu deformace bez zvýšení působícího napětí. V některých případech lze rozlišovat horní R_{eH} [MPa] a dolní R_{eL} [MPa] mez kluzu.
- $R_{p0,2}$ [MPa] – Smluvní mez kluzu se uplatňuje, pokud testované materiály nevykazují výše zmíněnou výraznou mez kluzu. Jedná se o mez, při které je trvalá deformace na úrovni 0,2 %. Mez kluzu může být určena i pro jiné procentuální hodnoty trvalých deformací, jako například $R_{p0,1}$ [MPa], nebo R_{p1} [MPa].
- R_m [MPa] – Mez pevnosti odpovídá maximální naměření síle F_m [N] popřípadě maximální hodnotě napětí σ [MPa].

Mezi základní deformační charakteristiky patří:

- A [%] – Tažnost, která vyjadřuje v okamžiku porušení poměrné prodloužení vzorku v procentech původní měřené délky L_0 . Výpočet tažnosti je poté následující:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

- Z [%] – Kontrakce vyjadřuje v okamžiku porušení, poměrné zúžení vzorku, rovněž uváděné v procentech, ovšem zde již příčného průřezu S_0 . [23, 24] Výpočet kontrakce vypadá následovně:

$$Z = \frac{D_0 - D_u}{D_0} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Pro materiály ve stavu pružnosti platí další charakteristiky, a to charakteristiky elastické. Mezi první z nich je již předem zmíněný modul pružnosti v tahu E , dalším je modul pružnosti ve smyku G [MPa], objemový modul K [MPa], Poissonův poměr μ [-] (pro ocel $\mu=0,33$). Při

výpočtu modulu pružnosti ve smyku vycházíme z hodnot smykového napětí τ [MPa], zkosu γ [rad]. [25, 26] Vztah je poté následující:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4.3)$$

Vztah pro výpočet objemového modulu nalezneme v literatuře také jako bulk modulus označován B [27, 28], vychází z hodnot objemu materiálu V [m³] a derivace tlaku P [Pa] podle objemu V . Vztah pro výpočet objemového modulu:

$$K = -V \frac{dP}{dV} \quad (4.4)$$

Všechny tři zmíněné moduly jsou závislé mezi sebou a lze je vypočítat v závislosti jednoho na druhém. Všechny tyto vztahy ovšem obsahují Poissonův poměr μ . Následující vztahy pouze popisují a dokazují provázanost jednotlivých elastických charakteristik mezi sebou a definují tak materiál jako celek.

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (4.5)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (4.6)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (4.7)$$

$$\mu = \frac{2}{2G} - 1 \quad (4.8)$$

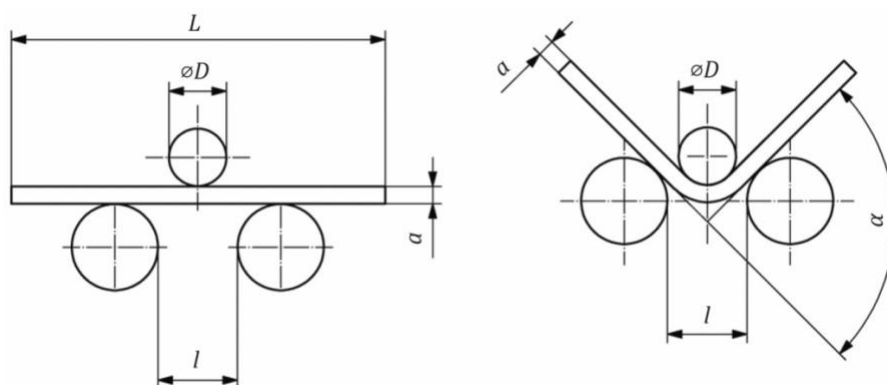
Pokud již dojde k deformaci materiálu, pak deformace není omezena pouze jedním směrem. Nachází se tedy ve všech směrech a v důsledku zákona zachování objemu poté platí vztah pro příčné a podélné deformace, který vypadá následovně:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu\varepsilon_x \quad (4.9)$$

, kde hodnota ε_y [-] je hodnota deformace ve směru osy y , ε_z [-] je hodnota deformace ve směru osy z a ε_x [-] je hodnota deformace ve směru osy x . [25]

4.2 Zkouška ohybem

Zkoušku ohybem popisuje norma ČSN EN ISO 7438 vydaná v roce 2021. [29] Zmíněná norma umožňuje tři zatěžovací modely. První z nich je nejpoužívanější, jedná se o umístění vzorku na dvou podpěrách o definované vzdálenosti, kde uprostřed je vzorek z druhé strany zatěžován trnem. Ve druhém případě lze použít ohýbací přípravek, který má tvar V. Trn poté opisuje tvar přípravku, tj. rovněž tvar V. Poslední možností, jak vzorek zatížit je upnou jej mezi upínací čelisti. Zkušební vzorek je poté ohýbán přes spolu s ním upnutý trn. Ekvivalent normy ČSN EN ISO 7438 je norma ASTM E290-22. [30]

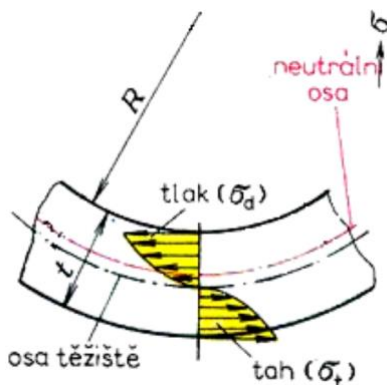


Obrázek 4-2 - Schéma ohýbacího přípravku s dvěma podpěrami a trnem (tříbodový ohyb) [29]

Na **Obrázku 4-2** jsou normou definované rozměry, kde $\varnothing D$ je hodnota průměru trnu [mm], L [mm] je délka zkušebního tělesa, a [mm] je tloušťka zkušebního tělesa, α [°] je úhel ohybu a l [mm] je vzdálenost mezi podpěrami. [29]

Pozn.: Pro užití všech výpočtových vztahů pro výpočet charakteristik vycházejících ze zkoušky ohybem je stěžejní rozměr vzdálenosti středu podpěr. Popřípadě je nutné znát průměr užitých podpěr, například norma ČSN EN ISO 12814-1 Zkoušení svarových spojů polotovarů z termoplastů – Část 1: Zkouška ohybem, zmiňuje osovou vzdálenost podpěr značenou D_a [mm], popřípadě norma ČSN EN ISO 5173 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky ohybem, ve které je uvedena rovněž vzdálenost l mezi podpěrami ovšem přidaná o dvakrát hodnotu poloměru podpěr r [mm] (obě podpory mají stejný poloměr). [29, 31, 32]

Napětí ve zkušebním vzorku je na příčném průřezu rozloženo nerovnoměrně. Na vnitřní straně ohýbaného tělesa nastává tlak, zatímco na vnější straně tah, toto lze pozorovat, viz **Obrázek 4-3**. Maximální hodnoty těchto napětí (tah, tlak) jsou v krajních vláknech, tj. na obvodu zatěžovaného vzorku. Nulová hodnota napětí se nachází po celé délce vzorku na neutrální ose. Neutrální osa nectí polohou geometrické osy zatěžovaného vzorku.



Obrázek 4-3 - Schéma rozložení a velikosti na ohybem zatěžovaném tělese [33]

Zkušební vzorky mohou být kruhového, čtvercového, obdélníkového či polygonálního příčného průřezu. Při ohybu se těleso plasticky deformuje do dosažení předem stanoveného úhlu, aniž by se změnil směr zatěžování.

Základní charakteristiky, které zjišťujeme ze zkoušky ohybem jsou v zásadě dvě. První, napěťová, značí se R_{mo} [MPa] a jedná se o mez pevnosti v ohybu, kdy můžeme zároveň hovořit o smluvním napětí na mezi pevnosti. Deformační charakteristiky se poté značí y [mm]. Jedná se o maximální průhyb, který nám dává zpětnou vazbu o tvárnosti materiálu. Ohybové napětí R_{mo} se poté vypočítá podle následujícího vzorce, který zahrnuje maximální hodnotu síly F_{max} [N] a poté šířku vzorku b [mm], výšku vzorku h [mm] a vzdálenost mezi osami podpěr l [mm]. [23, 24]

$$R_{mo} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (4.10)$$

Pro získání základní mechanické charakteristiky meze pevnosti v tahu z ohybové zkoušky je zapotřebí korelačního vztahu. Jedná se o natahovanou část krajního vlákna, viz Error! Reference source not found.. Hodnota tahové deformace se poté značí ε_f [-] a je definovaná maximální deflexí D [mm], která se nachází, v případě třibodového ohybu, uprostřed ohýbaného vzorku, kde vzdálenosti podpěr je l [mm] a výška vzorku h [mm].

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot D \cdot h}{l^2} \quad (4.11)$$

V oblasti elastických deformací při ohybové zkoušce třibodovým ohybem platí následující vztah pro výpočet modulu pružnosti E [MPa], kde F [N] je zatěžující síla působící skrze trn na zkušební vzorek, l [mm] je délka mezi osami dvou spodních podpěr, y [mm] je průhyb v ohybu a J_0 označuje kvadratický moment průřezu [mm⁴].

$$E = \frac{F \cdot l^3}{y \cdot 48 \cdot J_0} \quad (4.12)$$

Obdobný vztah je poté pro výpočet čtyřbodového ohybu. Čtyřbodový ohyb je častěji v technické praxi užíván pro křehké materiály, především keramiky, které jsou náchylné k lokálnímu extrému maximálního ohybového momentu, který se v případě čtyřbodového ohybu nachází na celé délce mezi trny, skrze které působí zatěžující síla.

5 Měření deformace na malých a miniaturních vzorcích

Obecně platí, že z rozměrových důvodů není možné ke vzorkům napojit konvenční deformaci měřící zařízení, které by kvalitně diagnostikovalo deformační průběh. Musíme tedy volit bezkontaktní metody, které mají velkou výhodu pro měření deformačních charakteristik za zvýšených teplot, kde je můžeme zcela umístit mimo teplotní pole. Jedná se především o DIC (digital image correlation) measuring system, laserové extenzometry a video extenzometry. Může ale nastat i případ, kdy se jedná o rozměrově malý zkušební vzorek, na který lze uchytit extenzometr. Pro tento případ se zpravidla používají velikostně nejmenší extenzometry.

5.1 Kontaktní měření deformace malých a miniaturních vzorků

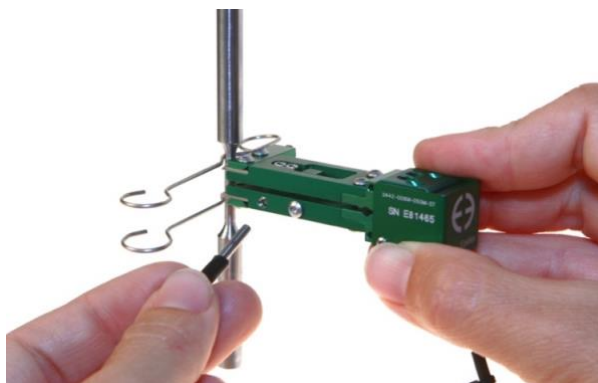
Při použití kontaktních extenzometrů jsme omezeni relativně malým rozsahem zkušebních teplot. Měření by ovlivňovala nejen dilatační roztažnost rozdílných materiálů, ale i vychýlení elektrických potenciálů u elektrických zařízeních.

Extenzometr, který lze pozorovat na **Obrázku 5-1**, má ve svých dostupných produktech firma Epsilon technology corp. Rozměry tohoto miniaturního extenzometru jsou velmi malé v zásadě se délka, výška i šířka pohybují pod 40 mm. Počáteční měřenou délku l_0 [mm] lze měřit už od pouhých 6 mm, což řadí tento extenzometr do skupiny pro měření malých a miniaturních těles.

Kontaktní extenzometry

Pro některé rozměry lze uplatnit konvenční kontaktní extenzometry. Vždy je ale zapotřebí rozměry zkontrolovat a zajistit, aby zkouška probíhala dle příslušné platné normy. Při tahové zkoušce u malých a miniaturních tahových těles je potřeba dbát na dostatečnou počáteční délku vzorku l_0 [mm]. V případě použití kontaktního extenzometru, pak probíhá sběr dat stejně jako při konvenčních velikostech zkušebních těles. Například firma MTS Systems vyrábí miniaturní axiální extenzometry s počáteční délkou $l_0 = 3$ mm. Tyto extenzometry se dají dále pořídit v konfiguracích pro metrický systém s počáteční měřenou délkou $l_0 = 5$ mm a $l_0 = 6$ mm. S těmito miniaturními axiálními extenzometry můžeme měřit od teplot -100 °C až do 150 °C. [34]

Další firmou vyrábějící extenzometry pro měření malých počátečních délek l_0 [mm] je Epsilon technology corp. Model 3442 z řady miniaturních extenzometrů dokáže měřit vzorky s původní délkou $l_0 = 6$ mm. Tento model lze pozorovat, viz **Obrázek 5-1**. [35]



Obrázek 5-1 - Miniaturní extenzometr model 3442 od firmy Epsilon technology corp [36]

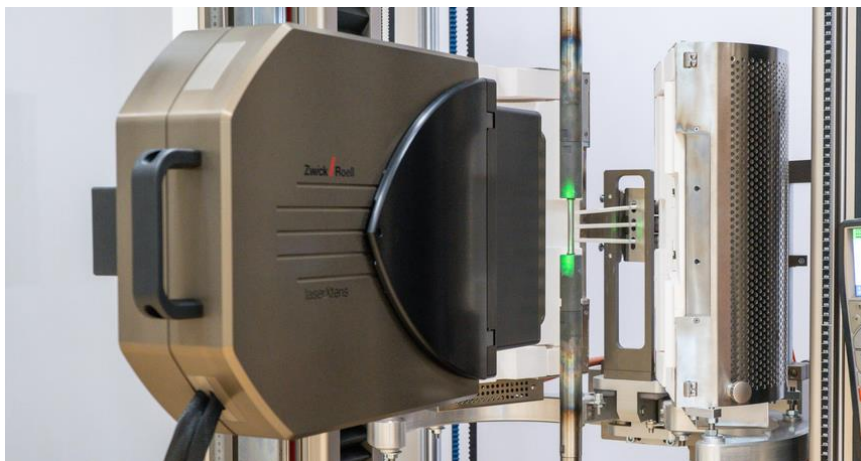
5.2 Bezkontaktní měření deformace malých a miniaturních vzorků

Mezi hlavní přednosti u bezkontaktních měřících systémů je možnost provádět zkoušky i za vyšších či nižších teplot než u kontaktních extenzometrů. Tento fakt je zapříčiněn umístěním snímacích zařízení mimo teplotní pole. Zároveň u velmi křehkých materiálů hrozí při porušení vzorku k ulomení materiálu a za velké rychlosti vymrštění do měřícího prostoru. Zde poté nastává pravděpodobnost zasažení kontaktního extenzometru, zatímco při použití bezkontaktních extenzometrů lze tuto pravděpodobnost zasažení odštipnutého kusu z materiálu takřka eliminovat ochranou průhlednou bariérou, za kterou jsou bezkontaktní senzory umístěny. Jedna z nevýhod může být příprava vzorku před samotným testováním jako je například nanesení detekční vrstvy na vzorek.

Laserové extenzometry

Dle normy ČSN EN ISO 9513 (příloha E – informativní) při měření laserovými extenzometry je potřeba vzorek označit dobře viditelnými referenčními značkami. Důležité je, aby mezi značkami a pozadím byl velký kontrast. Značky se ustanoví na počáteční naměřenou délku. Může se k označení použít značkovací páska. Laserový emitör (emitátor) vyzáruje paprsek směrem na rotační deflektor, ze kterého se následně odráží paprsek na měřený vzorek. Odražený paprsek poté skenuje celý vzorek v ose zatěžování. Na referenčních značkách (páskách) dochází k takzvanému difuznímu rozptylu laserového paprsku, který na druhé straně zachycuje fotopřijímač. Data z fotopřijímače následně putují do počítače, který je s fotopřijímačem po celou dobu propojen a dochází k přepočtu dat na použitelné výstupní hodnoty. Ve starších typech přístrojů se může jednat o analogové zobrazení, ovšem v dnešních moderních zařízeních se nejčastěji potkáme s digitálním vyobrazením výsledků. [37]

Laserové extenzometry se dále dělí na dva hlavní typy, a to s úhlovým typem skeneru a s paralelním skenerem. V prvním případě úhlového typu skeneru se paprsek nasměruje do středu zrcadla nebo polygonu ze kterého je následně paprsek radiálně vychýlen na měřený vzorek. Může být měřena příčná i podélná deformace. Ve druhém případě paralelního skeneru nastává difrakce na horizontální desce, která paprsek odráží paralelně. V obou případech se na referenčních značkách tělesa paprsek difuzně rozptýlí. Obě metody dokáží měřit jak podélnou deformaci ve směru zatěžování, tak i příčnou deformaci ve směru tloušťky, tj. kolmo ke směru zatěžování. [37]



Obrázek 5-2 - Laserový extenzometr LaserXtens 2-120 HP/TZ od firmy ZwickRoell [38]

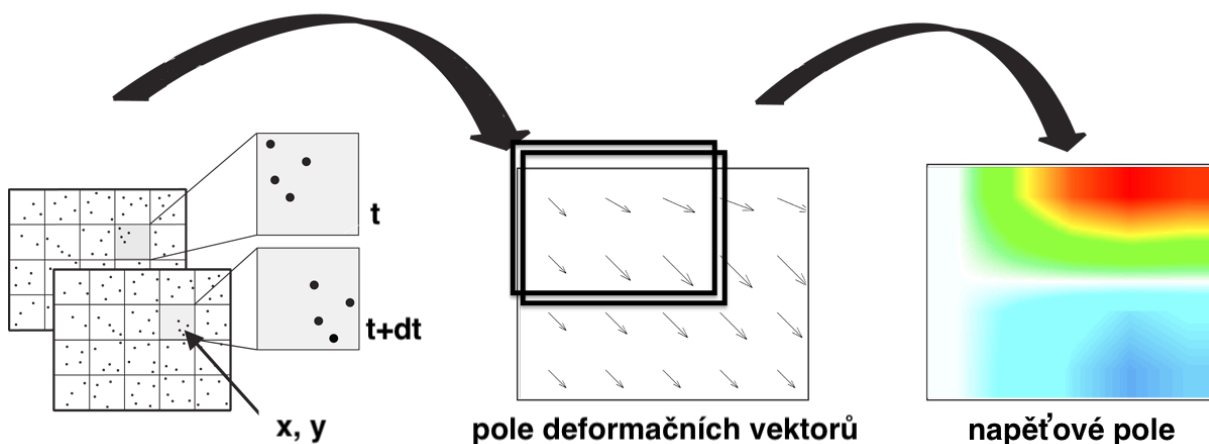
Video extenzometry

Dalším typem bezkontaktních extenzometrů jsou video extenzometry, které zmiňuje norma ČSN EN ISO 9513 (příloha F – informativní). Mezi hlavní části patří minimálně jedna snímací kamera vybavena optickým systémem a tomu odpovídající zobrazovací systém (videoprocessor). Za použití video extenzometru lze rovněž, stejně jako u laserových extenzometrů, měřit příčnou i podélnou deformaci. [37]

Existuje hned několik metod, jak zaznamenat a zpracovat deformaci video extenzometry. Jedná se o digitální korelaci obrazu neboli DIC (Digital Image Correlation), dále elektronická korelační interferometrie-ESPI (Electronic Speckle-Pattern Interferometry), fotoelasticimetrie, technika geometrického moaré, mřížková (moaré) interferometrie. Téměř všechny tyto metody používají k zaznamenávání obrazu CCD (Charge-Coupled Device) kamery. [37]

Digitální korelace obrazu – DIC (Digital Image Correlation)

Nejrozšířenější metodou vidoextenzometrů je DIC metoda, která používá k porovnání dva rozdílné časy zaznamenání deformace. Může například porovnat čas před deformací a po kompletní deformaci. Poté za pomoci výpočetního algoritmu systém porovnává konkrétní deformace v konkrétních časech a výsledně dokáže vyhodnotit kompletní 2D deformační pole. V případě použití dvou a více kamer lze získat kompletní 3D zobrazení deformace, viz **Obrázek 5-3**. Čím více použít kamer, tím je 3D modelace deformačních polí přesnější. Při užití DIC metod využíváme bílé, nekoherentní osvětlení. Zároveň potřebujeme, aby měl měřený vzorek texturu (náhodný vzor). Některé materiály tento požadavek splňují už ze své podstaty, ovšem na jiné je potřeba aplikovat různé typy nástříků, povlaků, aby texturu zesílily.



Obrázek 5-3 - DIC posuv elementu, vektorové pole, deformační barevné zobrazení (upraveno)
[39]

Samotné měření deformace poté nastává z konkrétního vybraného elementu. Většinou se jedná o element čtvercového typu, který má charakter posouvajícího se bodu. Vyhodnocuje se velikost a směr vektoru posunutí takového konkrétně zvoleného bodu. Systém ovšem pro vyhodnocení celkové deformace, která je nezbytná pro určení mnoha základních napěťových charakteristik, využívá celé sítě několika bodů, u kterých všech měří velikost a směr jejich vektorů. Této deformaci poté systém přiřazuje komplexní hodnotu tenzoru deformací. Za užití více kamer softwarový systém dokáže vypočítat deformační napětí na celém tělese. Jedná se o systémy obrazové analýzy, které určují množinu příslušných elementů a sledují jejich posuv.

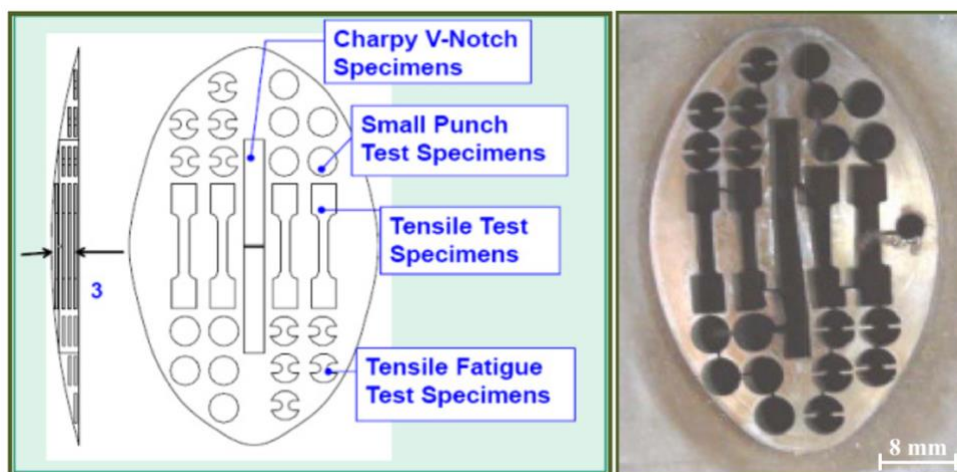
Metody digitální korelace obrazu jsou používány v mnoho technických i netechnických odvětvích. Měření DIC metodami je užíváno nejen ve strojírenských aplikacích, ale i ve stavebním inženýrství nebo například v medicíně. Obecně se jedná o pokrokovou metodu, která nám dokáže uživatelsky přívětivě a především komplexně poskytnou představu o konkrétních dějích, které se v materiálu odehrávají v reálném čase.



Obrázek 5-4 - Duální kamerový systém DIC Aramis od firmy Trilion [40]

6 Zkoušení malých a miniaturních zkušebních vzorků

Tělesa malých a miniaturních rozměrů, na kterých jsou prováděny mechanické zkoušky, mají jak mnoho výhod, tak s sebou nesou i pár značných omezení. Nesmírnou výhodou je sama velikost zkušebního vzorku v souvislosti s jeho odběrem. Odběr materiálu je v tak malém množství, že funkčnost součásti, stroje nebo zařízení zůstává neomezena. Přesto je zkušební těleso při mechanických zkouškách konvenčně porušeno a v důsledku testování uvedeno do stavu trvale nevratné deformace, tudíž se dá hovořit o zkouškách semidestruktivních, právě v důsledku tak malého odběru materiálu, viz **Obrázek 6-1**. Jedním z hlavních omezení je měření vzorků v průběhu samotných mechanických zkoušek. Konvenční měření, například u tahové zkoušky, probíhá za pomoci tensometrů, které se dotýkají měřeného vzorku. Toto nastavení ovšem není možné aplikovat u malých a miniaturních tahových těles, které zamezují svými rozměry přístupu tensometrů, tudíž je nutnost užití jiné měřicí technologie, jako je například DIC (digital image correlaton) measuring system. Další výsledky ovlivňující faktory jsou velikost zrn, orientace zrn, mikročistota, drsnost povrchu. U konvenčních velikostí jsou tyto faktory také pozorovány a korigovány, ne však v takové míře, jako u malých a miniaturních zkušebních vzorků. Dopad těchto faktorů na vyhodnocování mechanických zkoušek je mnohonásobně větší než u konvenčních velikostí zkušebních vzorků.

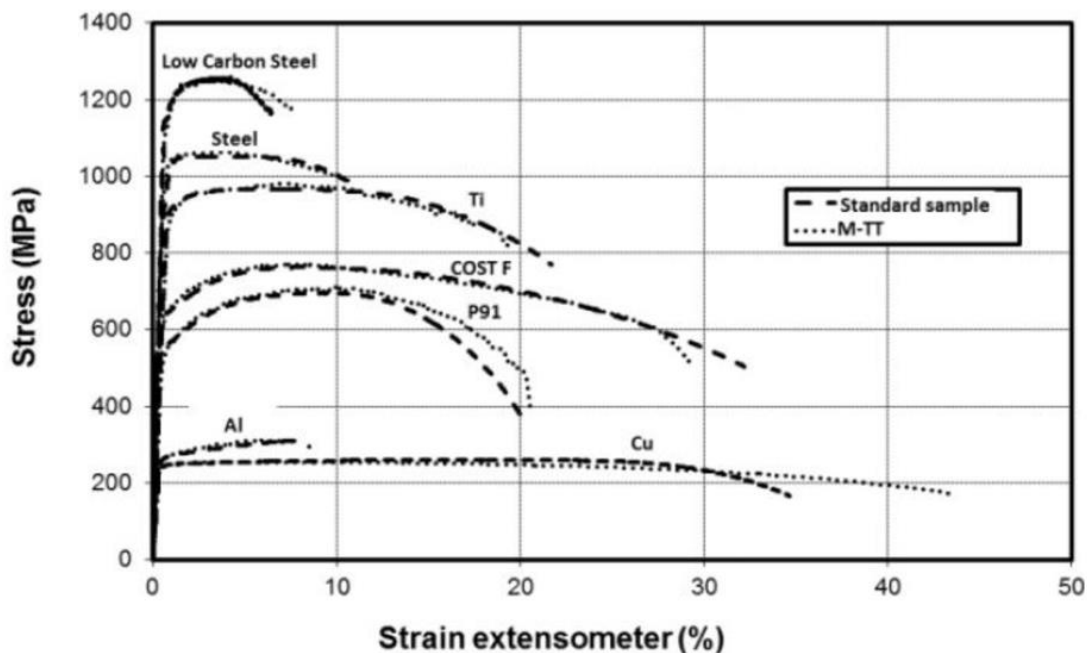


Obrázek 6-1 - Příklad odběru miniaturních vzorků pro různé mechanické zkoušky [41]

6.1 Zkouška tahem na malých a miniaturních vzorcích

Při zkoušení malých a miniaturizovaných těles v případě zkoušky tahem se řídíme dle platné normy pro konvenční zkoušení tahem ČSN EN ISO 6892. [20] Zkoušky na vzorcích o menších rozměrech, než uvádí norma jsou nenormalizované. Mohou být pouze uvedeny v předpisech pro konkrétní zkušební laboratoře, které zkoušky na malých a miniaturních tahových tělesech provádějí.

Pokud je potřeba zkušební vzorky zmenšovat, ať už z důvodu nedostatku experimentálního materiálu, nebo konstrukčního charakteru zkoumané součásti, pak je vhodné zachovávat poměrný koeficient k [-]. Výsledky vyhodnocené z poměrově stejných, ovšem malých zkušebních tělesech poté odpovídají výsledkům ze zkoušek na vzorcích konvenčních velikostech. Tento jev dokazují výsledky prezentované na ASME Pressure Vessels and Piping Conference (Boston, 2015), viz **Obrázek 6-2**.



Obrázek 6-2 - Komparace tahových křivek konvenčních velikostí vzorků a miniaturních velikostí vzorků [42]

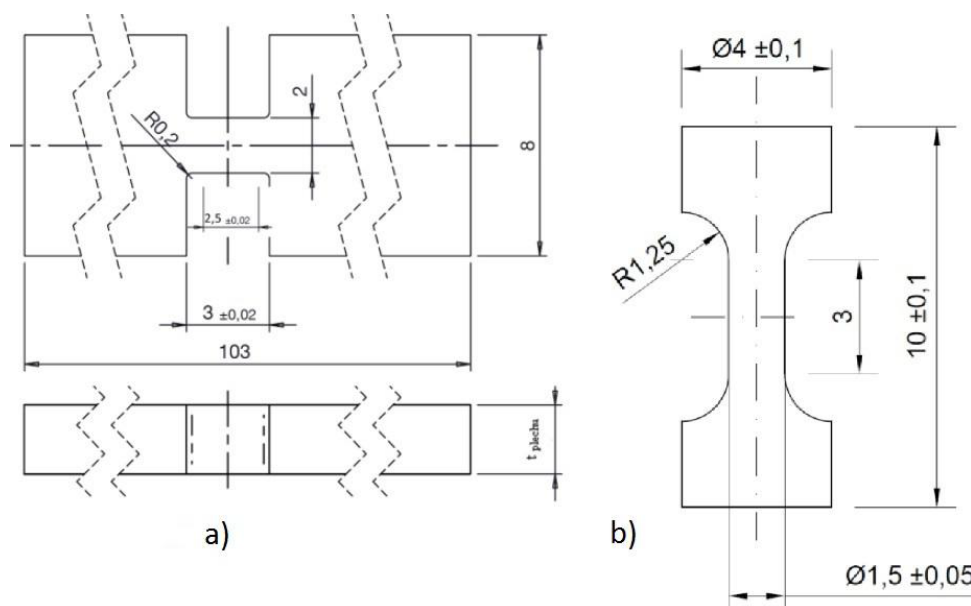
Obrázek 6-2 nám znázorňuje komparaci tahových křivek pro různé kovové, v praxi často používané materiály. Výsledkem tohoto pozorování je jednoznačně stejná odezva materiálu jak pro konvenční, tak i pro malé tahové vzorky napříč širokým materiálovým spektrem. Tento efekt poukazuje na schopnost reprodukovatelnosti experimentů, a tudíž vyhodnocování základních mechanických charakteristik ze vzorku menších rozměrů.

Mechanická charakteristika, která neodpovídá reálné hodnotě při použití malých tahových těles je prodloužení. Pro její přesné stanovení je třeba použít korekční vztah, který vypadá následovně:

$$A_x = \frac{A_{gm} \cdot l_{0x} + (A_m - A_{gm}) \cdot l_{0m}}{l_{0x}} \quad (6.1)$$

, kde hodnota A [-] je tažnost, A_g [-] je rovnoměrná tažnost, l_0 [mm] je měrná délka vzorku. Index x je faktor určující měřenou délku a index m je pro původní měřenou délku. [43]

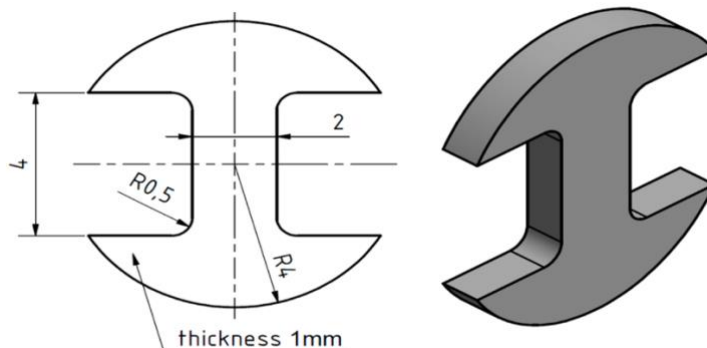
Konvenční geometrie malých tahových těles takřka neexistuje, ovšem napříč laboratořemi zaměřujících se na měření mechanických vlastností materiálu se velmi často objevují tahová tělesa plochého typu, viz **Obrázek 6-3 a**). Další možností je válcové tahové těleso malého průměru, viz **Obrázek 6-3 b**). [42, 44, 45]



Obrázek 6-3 - Geometrie a) plochého malého tahového vzorku, b) válcového malého tahového vzorku [42]

Rozměry, které jsou uvedeny na **Obrázku 6-3 a) i b)** se mohou v jednotlivých laboratořích lišit. Tloušťka plochého vzorku se standardně pohybuje v rozmezí od 0,2 mm do 2 mm. Plocha příčného průřezu při použití válcového zkušebního tělesa je až dvakrát větší než hodnota příčného průřezu plochého tělesa. Hodnoty naměřené na válcových tělesech musí mít zákonitě vyšší vypovídající hodnotu o reálném stavu materiálu než při zkoušce na plochých vzorcích. Použitelné jsou ovšem obě geometrie.

Další typ zkušební vzorku je vytvořený z kruhového disku. Konvenčním či nekonvenčním třískovým obráběním se z disku vyřeže tvar tahového tělíska, který lze pozorovat, viz **Obrázek 6-4**. Tloušťka, která je uvedena na **Obrázku 6-4** se může v důsledku konstrukčního charakteru nebo množství dostupného materiálu lišit. Mnozí [41, 46] tuto geometrii malého zkušební tělesa uplatňují ne pro zkoušky jednoosým tahem, ale pro zkoušky únavy materiálu, kde má geometrie pozitivnější vliv na výsledky únavových zkoušek.



Obrázek 6-4 - Geometrie malého tahového tělesa vyřezaného z disku [47]

Celkový odběr vzorků může probíhat několika způsoby, které závisí především na geometrii součásti, ze které je potřeba vyhodnotit její mechanické vlastnosti. Odběr lze provést konvenčními obráběcími metodami, pokud nám to rozměry součásti dovolují. V případě, že potřebný materiál nelze odebrat za pomoci obráběcích strojů mimo pracovní prostředí součásti kterou testujeme, lze použít metodu *in-situ*, která dokáže odebrat materiál přímo na pracovním místě součásti. Toto zařízení spolu s odběrovými technikami je blíže popsáno v kapitole 7.2.



Obrázek 6-5 – Porovnání konvenčních, malých a miniaturních tahových těles [48]

Na **Obrázek 6-5** lze pozorovat trend postupného zmenšování vzorku. Toto porovnání konvenčních, malých a miniaturních těles dokazuje potenciál úspory materiálu potřebného pro zjištění mechanických vlastností. Zmenšení velikosti zkušebních vzorků zároveň vede k možnosti zvýšení počtu testů a tím i zvýšení přesnosti vyhodnocení mechanických vlastností.

6.2 Vlivy ovlivňující vyhodnocování zkoušek na miniaturních vzorcích

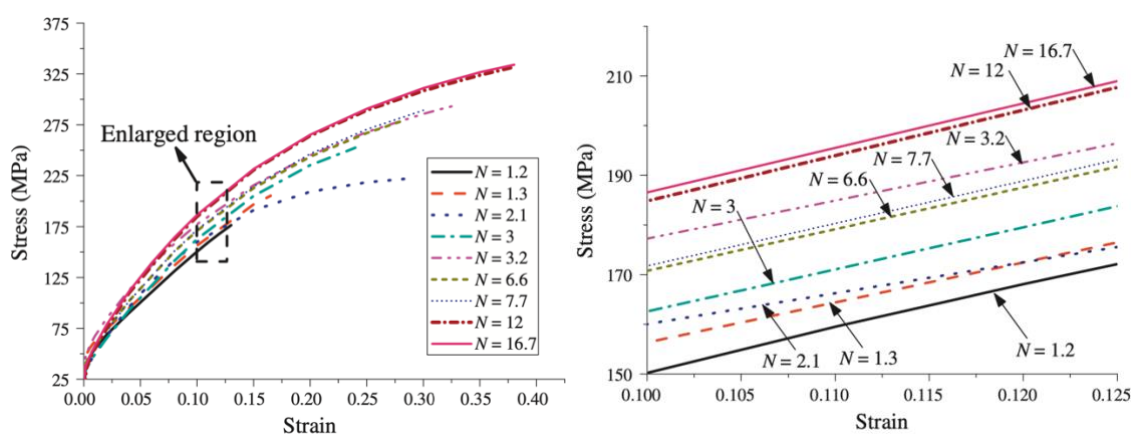
Malá velikost zkušebních těles je v mnohých případech velmi potřebná a někdy i nevyhnutelná, ovšem nese s sebou celou řadu reálných problémů, které je třeba pozorovat a při vyhodnocování mechanických charakteristik je vždy uvážit. Velkým faktorem ovlivňujícím chování vzorku je velikost a počet zrn v poměru s plochou příčného průřezu testovaného materiálu. Důležitá je i orientace zrn vůči směru zatěžování malých zkušebních vzorků. Dalším faktorem, který ovlivňuje jak standardní, tak i malé vzorky je drsnost povrchu a v neposlední řadě faktor nanočistoty, segregace a precipitace nekoherentních částic, které v měřítku malých vzorků hrají velkou roli. [41]

Velikost a počet zrn v miniaturních vzorcích

Pokud zmenšujeme zkušební vzorky poté zároveň nastává již zmíněné zmenšení plochy příčného průřezu. Z charakteru zkoušeného materiálu můžeme díky zmenšení rozměrů vzorku dosahovat pouhých desítek, ne-li jednotek zrn na plochu příčného průřezu. Tento efekt je zásadní při vyhodnocení mechanických charakteristik, jelikož počet, velikost, rozložení a geometrie zrn, vztažených na plochu příčného průřezu nám ovlivňuje výsledky mechanických zkoušek. Výsledky poté neodpovídají reálným hodnotám, které by měl materiál vykazovat.

Zkoušky poté nevhodně reprezentují materiál jako celek. Neexistuje žádná norma, která by stanovovala minimální hodnotu poměru počtu zrn vztáženou na plochu příčného průřezu. V normě penetrační zkoušky SP nesoucí označení ČSN EN 10371 je však doporučení minimálního počtu pěti zrn na zkušební vzorek tvaru disku. [49]

V literatuře [50] Fu a kol. testovali měnící se mechanické vlastnosti materiálu ve vazbě tloušťky vzorku vztážené na velikost zrn. Jednalo se o tahové zkoušky prováděné na experimentálním materiálu z mědi. Bylo zjištěno, že napětí potřebné k přetržení vzorku a počet mikroductin klesá s klesajícím poměrem tloušťky a velikosti zrna, viz **Obrázek 6-6**. Tento poměr je v literatuře značený N [-]. Další studie [51] zabývající se podobnou problematikou experimentálně potvrdila, že při poklesu počtu zrn vůči měřené tloušťce vzorku zároveň klesá jak mez pevnosti, tak i mez kluzu.



Obrázek 6-6 - Závislost tahového napětí a poměru N , tj. tloušťky vzorku vers. počtu zrn [50]

Samotná orientace zrn vůči směru zatěžování při provádění mechanických zkoušek má vliv na výsledné hodnoty. Z tohoto důvodu je vhodné provádět odběr vzorku jak longitudinálně, tangenciálně tak i transverzálně, aby hodnoty reprezentovaly případné anizotropické chování materiálu. Pokud se jedná o zvlášť hrubozrnnou strukturu, popřípadě strukturu tvořenou monokrystalem, poté je vhodné tento údaj zapsat do zkušebního protokolu. O tomto hovoří i norma SP penetrační zkoušky ČSN EN 10371 [49].

Drsnost povrchu miniaturních vzorků

Obecně platí, že pro správné vyhodnocení mechanických charakteristik je zapotřebí, aby drsnost povrchu byla co nejmenší. Vliv drsnosti povrchu je ovšem zvýšen samotným zmenšením vyhodnocovaných vzorků. Pro drsnost povrchu se v tomto případě doporučuje volit hodnoty $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ a menší. Snížením drsnosti povrchu snižujeme zároveň pravděpodobnost iniciace trhliny z místa nejhlubší trhliny, která byla vytvořena v důsledku např. nedostatečného nebo nekvalitního broušení. V tomto důsledku je důležité stanovovat hodnotu maximální drsnosti R_{max} . Kombinací již platné normy pro penetrační SPT zkoušku označenou ČSN EN 10371 a normy tahové zkoušky označenou ČSN EN ISO 6892-1 dokážeme získat hodnoty drsností, nad které bychom se neměli při obrábění zkušebních vzorků dostat. [20, 48, 49]

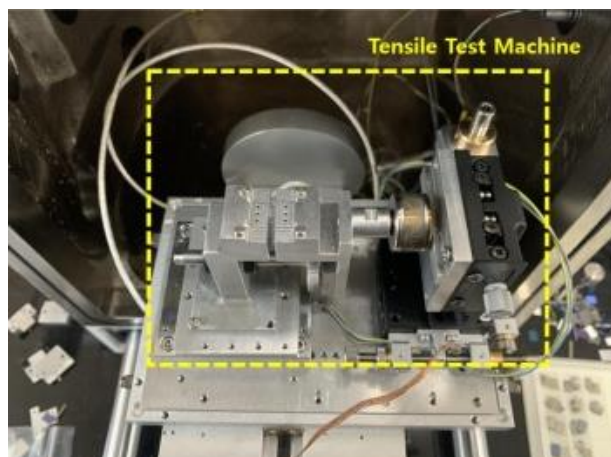
Chemická heterogenita miniaturních vzorků

Precipitace ostrohranných částic vlivem teplotního zpracování, segregace škodlivých prvků na hranice zrn nebo nanočistota vzorku ovlivňuje mechanické charakteristiky vždy. V případě miniaturizace zkušebních těles je dopad heterogenity mikrostruktury zásadní. Jakákoliv strukturní změna a tím vzniklá hranice může být potencionálním místem pro šíření trhliny. Standardizované velikosti zkušebních těles tato kritická místa obsahují rovněž, ovšem vzhledem k velikosti příčného průřezu klesá pravděpodobnost iniciace trhliny z kritického místa. Poměrově je větší podíl u konvenčně velikých zkušebních těles homogenní struktury vůči lokální heterogenitě než u malých a miniaturních zkušebních těles.

Segregace doprovodných prvků na hranice zrn může v případě nežádoucích doprovodných prvků způsobit oslabení hranic a tím změnu mechanických vlastností zkoumaného materiálu. Tyto nežádoucí doprovodné prvky jako je například O, N, S, P, se vyskytují ve struktuře z primární, sekundární případě z terciální části metalurgických procesů. Spolu se segregací na hranice zrn je úzce spjatá i precipitace s vyloučením precipitátů po hranicích zrn. Z důvodu vzniku nové fáze na hranicích zrn může nastat relativně ostrý přechod fyzikálních i chemických vlastností. Může se jednat například o soudržnost jinou chemickou vazbou nebo o odlišnou teplotní roztažnost materiálů. Veškeré předem zmíněné strukturní heterogenity ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti, které se do miniaturních zkušebních těles promítají formou značných odchylek od reálných hodnot mechanických charakteristik. [52, 53]

6.3 Mechanické zkoušky těles mikro rozměrů

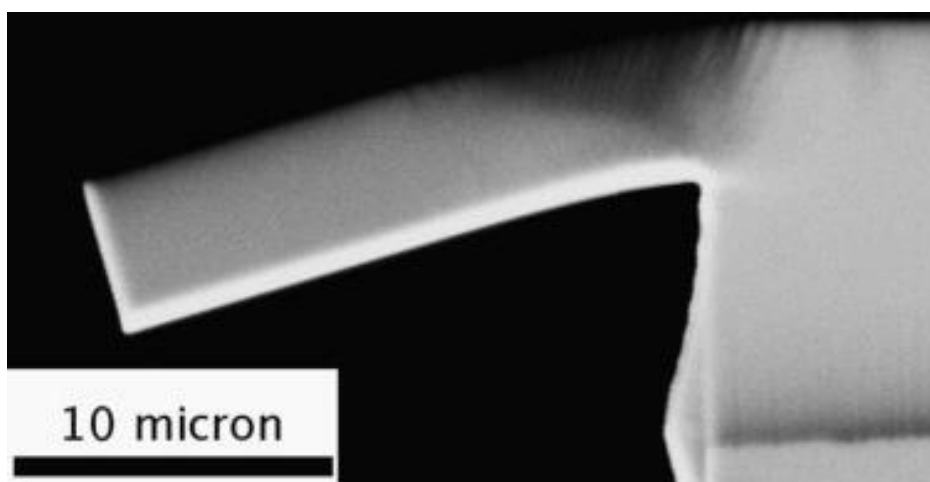
V posledních letech je trend zmenšování zkušebních těles tak výrazný, že se oblast zkoumání mechanických vlastností posouvá do ještě menších rozměrů. Jedná se o vzorky velikostech v řádech stovek až desítek mikrometrů. Testování takto malých rozměrů probíhá v laboratoři obsahující elektronový mikroskop. Celý výzkum se zpravidla přesouvá do SEM, ve kterém jsou mechanické zkoušky prováděny. Vzorky jsou pozorovány *in-situ* v elektronovém mikroskopu, do něhož je implementován celý uchycovací, měřicí a napěťový systém, který je pro zkoušky tahem či ohybem standardně zapotřebí. Upínací systém vzorku je vždy vytvořen pro konkrétní zařízení elektronového mikroskopu a charakteru mechanické zkoušky.



Obrázek 6-7 - Tahový stroj pro měření mikro tahových vzorků umístěný v SEM [54]

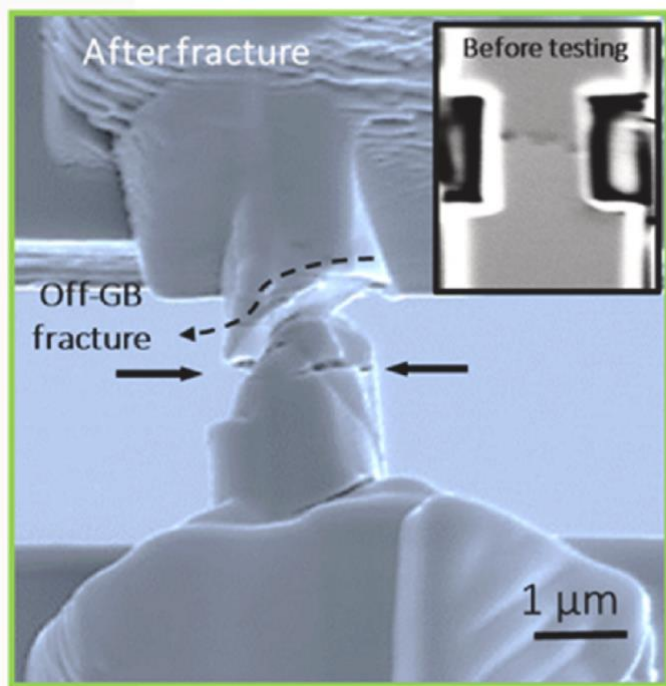
Na **Obrázku 6-7** lze pozorovat zařízení používané pro zkoušení mikro tahových těles v SEM. Součástí tohoto zařízení je zároveň zabudovaný systém měření posunutí, který odebírá hodnoty z čelistí, do kterých je vzorek upnutý. V případě absence tohoto senzoru posunutí se délkové změny vyhodnocují za pomoci DIC metody a obrazové analýzy.

Vyhodnocováním mikro ohybových zkoušek se zabývali vědci z literatury [55, 56]. Prvnímu týmu Paiva a spol. [56] se podařilo provést zkoušku tříbodovým ohybem na vzorku s rozměry tloušťky 2,5 mm. Jako experimentální materiál byla použita ocel s perlitickou mikrostrukturou, na které bylo pozorováno chování lamelárního a globulárního perlitu přímo v SEM. Jiný postup použil tým Motz a spol. [55], kde byl ohýbaný vzorek na jednom konci umístěný bez možnosti pohybu (vetknutý) a na druhém konci na něj působil ohýbací trn. Druhým rozdílem zároveň byly rozměry samotného vzorku. Délka vzorku od vetknutí po konec byla pouhých 14 μm a tloušťka činila 1 μm . Výzkum byl konkrétně zaměřen na zkoumání Hall-Petchova vztahu, který porovnává velikost zrna a mez kluzu. Tuto zkoušku lze pozorovat, viz **Obrázek 6-8**. Ohýbací hrot z důvodu zastínění není na tomto obrázku vidět, protože se nachází na levém konci vzorku.



Obrázek 6-8 - Mikro ohybový vzorek SEM (BSE), úhel průhybu 16,7°[55]

Wang a kol. v literatuře [57] využili mikro tahové zkoušky pro zkoumání pevnosti vazeb hranic zrn u materiálu Inconel X-750. Byly provedeny mikro tahové zkoušky na vzorcích o velikostech v řádech pouhých jednotek mikrometrů. Celá zkouška byla provedena ve FIB/SEM systému. Na hranicích zrn byly zjištěny precipitáty na bázi chromu M_{23}C_6 , které ovlivňovaly mechanické chování materiálu jako celku. Touto metodou bylo možno vyhodnotit pevnost samotných hranic zrn, což umožňuje lepší představu o chování celého materiálu, zároveň umožňuje konkrétnější a účelnější inovaci. **Obrázek 6-9** zachycuje zkoušku pevnosti hranic zrn přímo v SEM.



Obrázek 6-9 – SEM zkouška tahem mikro tahových těles Inconel X-750, hodnocení pevnosti hranic zrn s precipitáty $M_{23}C_6$ [57]

Kvůli miniaturizaci a umístění vzorku v systémech elektronových mikroskopů jsme schopni přímo vyhodnocovat deformační zóny a směr šíření iniciační trhliny. Značné nevýhody těchto zkoušek jsou zcela jistě v technickém provedení implementace trhacího nebo ohýbacího zařízení do elektronového mikroskopu, ale i náročnosti přípravy vzorku. Vzorek musí být připraven nekonvenčními metodami. Jednou z takových metod je například iontové odprašovací dělo. Výhodami těchto zkoušek je zkoumání procesů, které běžnými mechanickými zkouškami nejsou možné pozorovat. Z mikro tahových i ohybových zkoušek tudíž dokážeme získat velmi přesné a jedinečné mechanické charakteristiky, které mohou být užitečnou směrnicí pro další výzkum, vývoj a inovaci všech technických materiálů.

7 Small punch test – SPT

Výzkum a vývoj metody small punch testu se poprvé objevil roku 1981 na půdě amerického MIT, která poprvé začala zkoumat vlastnosti malého disku upevněného mezi horní a dolní matici, na který působili různými penetračními tělesy. Další obrovský posun tato metoda zaznamenala o několik málo let později na japonské univerzitě v Tohoku, kde spolu ve spolupráci s japonským Institutem pro výzkum atomové energie, se zaměřovali na testy materiálu vystavené radiačnímu záření. Hlavní výhodou této metody byla její relativní nedestruktivnost vůči konstrukcím jaderných zařízení a malé množství odebraného vzorku. Materiály ve stavbách a zařízeních pracující s tvorbou jadernou energií jsou potřeba kontrolovat v mnohem větší periodicitě, tudíž je potřeba velké množství sad vzorků. Rozměry, jejich velikost zkušebních těles konvenčních mechanických zkoušek často vyžadují tak velké množství odebraného zkušebního materiálu, že je poté potřeba vyměnit celou součást zařízení. To v té době tvořilo jeden z hlavních pilířů výzkumu. [58]

7.1 Zkušební těleso

Norma ČSN EN 10371 [49] vydaná v roce 2021 doporučuje použití disku o průměru $D_s=8$ mm a tloušťce $h_0=0,5$ mm, popřípadě ještě menší variantu, a to s průměrem disku $D_s=3$ mm a tloušťce $h_0=0,25$ mm. Norma rovněž dovoluje použití i jiných tvarů zkušebních těles pro zkoušku SPT, ovšem musí být splněna tloušťka a drsnost povrchu. Dále je potřeba myslet na správné upnutí vzorku, tak aby zkouška mohla být validně vyhodnocena. Pokud budeme měnit tvar zkušebního tělesa (jiný než disk), pak musíme změnit i tvar držáku upínacího zařízení. V tomto bodě ovšem dochází k anizotropnímu chování materiálu. Například obdélníkový tvar zkušebního tělesa bude vykazovat jinou mechanickou odezvu než u kruhového, kde je vzdálenost od razníku po upnutí všude stejná.

U takto malých zkušebních těles je zapotřebí brát ohled na velikost zrn a jejich orientaci. Norma hovoří o alespoň pěti zrnech u příčného průřezu, avšak pokud je potřeba vyhodnocovat hrubozrné materiály, popřípadě monokrystalické struktury, pak je nezbytné k vyhodnocení doplnit poznámku o velikosti zrn v dané struktuře.

Jelikož se jedná o velmi malé zkušební těleso, pak drsnost povrchu musí být úměrná jeho velikosti a tvaru. Drsnosti povrchu $R_a = 0,5 \mu\text{m}$, $R_a = 0,25 \mu\text{m}$, popřípadě nižších hodnot, dosahujeme v normě psaným postupem, který zamezuje tvorbě rizikově velkých trhlin při broušení, které by mohly velmi zásadně ovlivnit naměřené hodnoty. Především se chce předejít iniciaci trhlin v místech poškozených právě od špatného postupu při broušení.

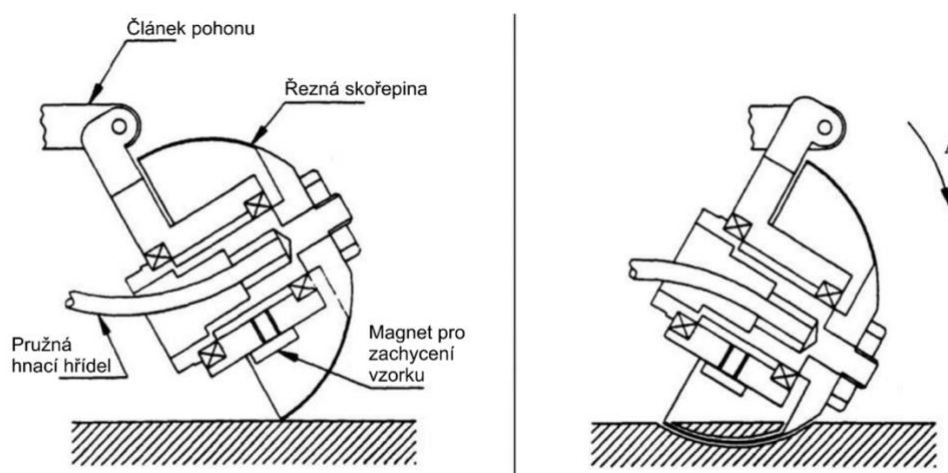
D_s [mm]		h_0 [mm]		R_a [μm]
Ø 8	0	0,50	+0,005	< 0,25
	-0,1		-0,005	
Ø 3	0	0,25	+0,002 5	< 0,25
	-0,025		-0,002 5	

Tabulka 7-1 – Rozměry, tolerance a drsnosti zkušebního tělesa [49]

V **Tabulka 7-1** můžeme vidět přesné hodnoty rozměrů, drsností a tolerancí, které norma doporučuje pro vyhotovení zkušebního tělesa. Norma udává i přesný metrologický postup k měření daných rozměrů u zkušebního tělesa. [49]

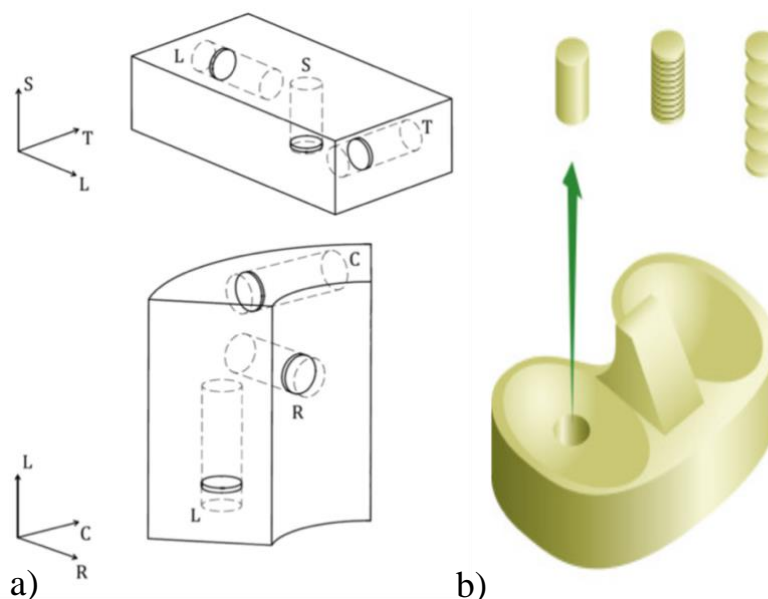
7.2 Odběr materiálu vzorku

Samotný odběr materiálu lze provést hned několika možnými způsoby. Buď můžeme ze zkoumané součásti obrobit prakticky jakýmkoliv možným třískovým obráběním válec o daném průměru a ten pak dále rozřezat na jednotlivé disky o potřebných tloušťkách, nebo můžeme využít příhodnější metodu Scoop Cutter. Tato metoda k odběru vzorku používá zařízení, jehož brusný nástroj, který má buď sférický nebo hemisférický tvar, rotuje kolem své osy a pohybuje se po kruhové dráze. Za pomoci těchto pohybů se odebere velmi malý, reprezentativní vzorek materiálů. Tento typ odběru může probíhat dvěma hlavními mechanismy, a to čistě mechanicky nebo elektrojiskrově.



Obrázek 7-1 - Zařízení s hemisférickou rotační hlavou pro odběr vzorku [59]

Konvenční odběr vzorku, který je znázorněn na **Obrázku 7-2 b)** je zcela proti hlavní myšlence vzniku metody SPT, jelikož její hlavní smysl bylo zmenšit zkušební vzorek natolik, aby nedocházelo k náročným opravám v důsledku odebírání velkého množství materiálu pro konvenční mechanické zkoušky. Pokud se rozhodneme, popřípadě jsme nuceni vzorek odebrat jednou z konvenčních metod, tudíž vyřezat ze součásti válec o daném průměru a ten následně rozřezat na požadované tloušťky, pak se v normě vyskytuje, v jakých směrech máme odběr provést. [49, 59, 60]



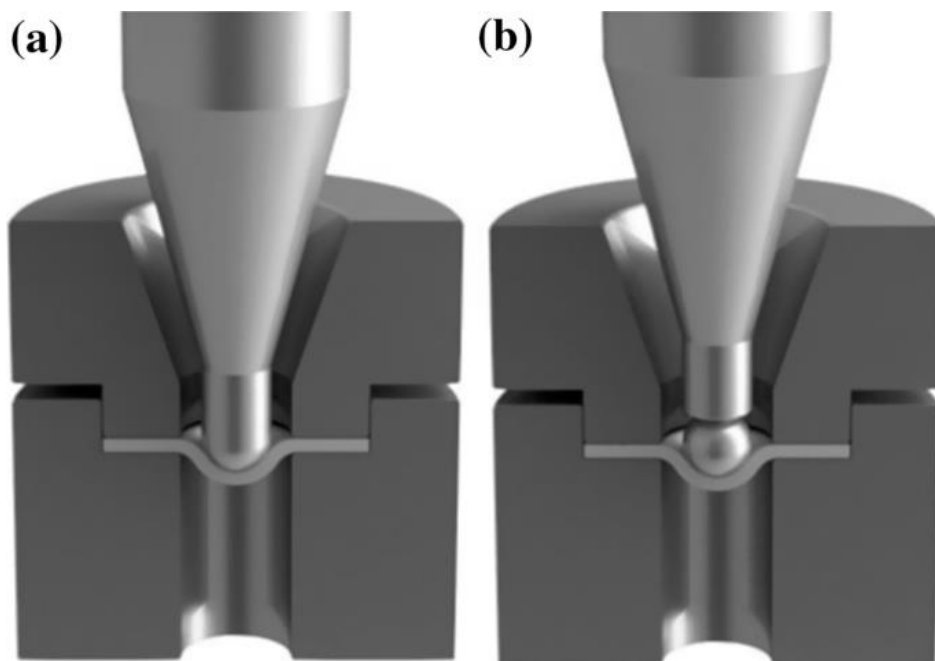
Obrázek 7-2 - a) Směry odběru vzorků [49], b) Schéma odběru vzorku po konkrétní příklad (endoprotéza kolene) [60]

Firmou, která se zabývá vývojem a výrobou odběrových zařízení podobných jako, viz **Obrázek 7-1**, je Rolls-Royce Power Engineering plc. Disponují zařízením na odběr polosférických a vrchlíkových vzorků a přístroji pro přímé vyhodnocení. Tyto odběrová zařízení byla navržena, aby odebírala materiál *in-situ* ve vzdálených a nepřístupných místech.

Několik takových odběrových zařízení firma Rolls-Royce Power Engineering plc navrhuje na míru pro maximalizaci efektivity odběru vzorku. Hlavním odběrovým zařízením je SSamTM – 2. Toto zařízení standardně odebírá sférický vrchlík o průměru $D=25$ mm a tloušťce $h=4$ mm. Přesné rozměry lze ovšem upravit na místě dle potřeby zákazníka a následného požadavku tvaru tělesa pro vyhodnocení zkoušky. Po odebrání vzorku, kvůli vysoké rychlosti otáčení hemisférické hlavičky a malému posuvu vzniká povrch o velmi nízké drsnosti, tudíž není potřeba následný povrch poté jakkoliv upravovat. [61]

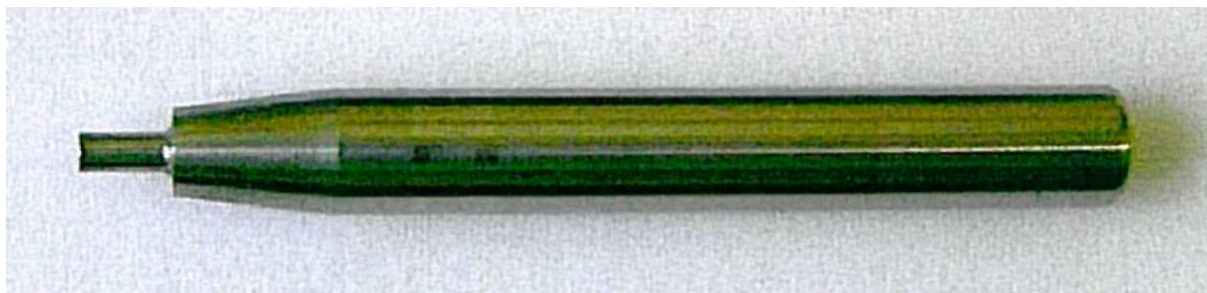
7.3 Tvar razníku a matrice

Razník může mít více podob, a to podle typu měřené zkoušky. Pro kuličkový penetrační test neboli Bulge Punch test se používá razník s kuličkou nebo hemisférickým hrotem. Norma má i dvě možnosti poloměru razníku r [mm], kde standardní poloměr má hodnotu $r=1,25$ mm a miniaturní poloměr má hodnotu $r=0,5$ mm. Na **Obrázku 7-3** můžeme vidět obě možnosti tvaru razníku. Varianta (a) je razník s hemisférickou hlavou a varianta (b) je razník s konkávním vybráním a kuličkou.



Obrázek 7-3 - a) Razník s hemisférickým hrotem, b) Razník s kuličkou [62]

Ke stříhovému penetračnímu testu (Shear Punch test) je potřeba změnit tvar razníku, aby byl schopen zkušební vzorek prostříhnout, a proto volíme jeho ostré zakončení, které je možno vidět na **Obrázku 7-4**.



Obrázek 7-4 - Razník s ostrým hrotem pro experimenty zjišťující mez pevnosti ve stříhu [58]

Další změna razníku nastává při ohybovém penetračním testu (Disc Bend test). Razník má při tomto typu SPT zkoušky tvar kužele. [58]

Jelikož lze zkoušky provádět jak za stavu ochlazení, tak i v ohřátí, pak musíme dbát na dilatační roztažnost materiálu, která by se neměla značně lišit mezi zkušebním vzorkem a matricí, do které je vzorek umístěn. Pokud se dilatační roztažnost značně liší, pak je potřeba spočítat deformační charakteristiky a uvážit validnost zkoušky. Zároveň při vyšších teplotách nesmí materiál, ze kterého jsou razník a matrice vyrobeny, značně podléhat oxidaci, tudíž tvorbě okují. Mohlo by při dosednutí spodní a horní části matrice dojít k lehkému nedosednutí a naklonění jedné z částí, tedy k vyosení působení síly skrze razník a vzniku jiného stavu než předpokládané dvojosé napjatosti. [49, 58]

7.4 SPT penetrační zkouška

Principem penetrační zkoušky je působení razníku s kuličkovým, popřípadě hemisférickým razníkem na disk, nebo jiný tvar zkušební tělesa. Síla, kterou razník působí na zkušební těleso je kolmá. Rychlost pohybu razníku směrem proti zkušebnímu tělesu musí být konstantní a může se pohybovat v rozmezí od 0,2 mm/min do 2 mm/min. Zatížení zkušební vzorku razníkem trvá až do momentu, kdy klesne síla pod 20 % její maximální hodnoty, poté se zkouška považuje za dokončenou. Obecně můžeme konstatovat, že z SPT penetračního testu dokážeme vyhodnotit tyto charakteristiky: maximální sílu F_m [N] a deflexi v místě maximální síly u_m [mm], sílu elasticko-plastického přechodu F_e [N] a deflexi v bodě síly elasticko-plastického přechodu u_e [mm], sílu počátku plastické nestability F_i [N] a deflexi v místi síly počátku plastické nestability u_i [mm]. Na místo deflexe lze vždy odečíst hodnotu posunutí se značkou v [mm]. Z těchto hodnot vždy vytváříme křivky závislosti síla – deflexe, popřípadě síla – posunutí. Výstupem z penetrační zkoušky je tedy vždy grafická závislost, která je svým trendem podobná výstupním grafům z konvenční tahové zkoušky (normálové napětí σ [MPa] – poměrné prodloužení ε [-]). Za pomoci těchto hodnot můžeme následně odhadnout mez pevnosti R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, transitní teplotu, potažmo hodnoty lomové houževnatosti materiálu. [46, 49]

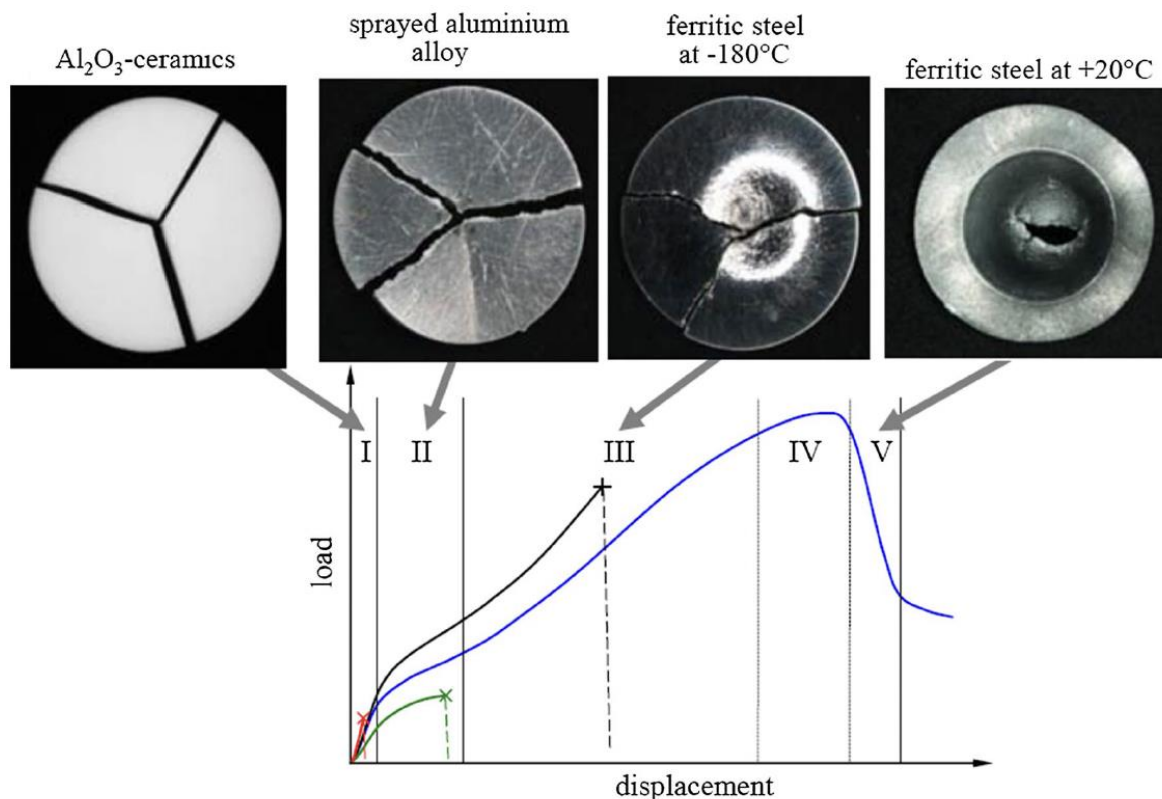
Zkušební postup

Následující zkušební postup doporučuje norma ČSN EN 10371 Kovové materiály – Metoda penetrační SP zkoušky.

1. Upnutí zkušební tělesa mezi horní a spodní část matrice.
2. Předběžné zatížení, kde maximální hodnota předpětí je 10 % z F_e .
3. Posuv nosníku konstantní rychlostí.
4. Monitorování zkoušky. Měření výše zmíněných hodnot (síla, deflexe, posunutí atd.).
5. Ukončení zkoušky

Charakteristické naměřené křivky pro SPT – penetrační zkoušku

Křivka, která popisuje průběh SPT penetrační zkoušky je definována již zmíněnou zatěžující silou udávanou v jednotkách N na vertikální ose a posuvem nebo deflexí měřenou v mm na horizontální ose. Díky zaznamenávání těchto dvou hodnot nám vzniká křivka typický pro SPT penetrační zkoušku, která se dá dle svého trendu rozdělit do pěti zón.



Obrázek 7-5 - Křivka SPT penetrační zkoušky, typické materiály v jednotlivých zónách [63]

První zóna je charakteristická svou linearitou, tudíž i elastickou deformací. Po odtížení se vzorek vrátí do původního stavu. Tato zóna platí až do bodu elasticko-plastického přechodu, která je označena silou F_e a deflexí nebo posunutím u_e/v_e . V této zóně lze aplikovat Hookův zákon. Pokud se poruší materiál v této zóně, jedná se o velmi křehký materiál. Typickým materiálem jsou například keramiky (Al_2O_3), viz **Obrázek 7-5**.

Ve druhé zóně, po elasticko-plastickém bodě, nastává přeměna elastické deformace na plastickou, kdy se po odtížení materiál zcela nevrátí do původního stavu. Nastává zde deformační zpevnění. Křivka se v tomto bodě, vůči předchozí zóně, snižuje a její směrnice je mírnější, ale rostoucí.

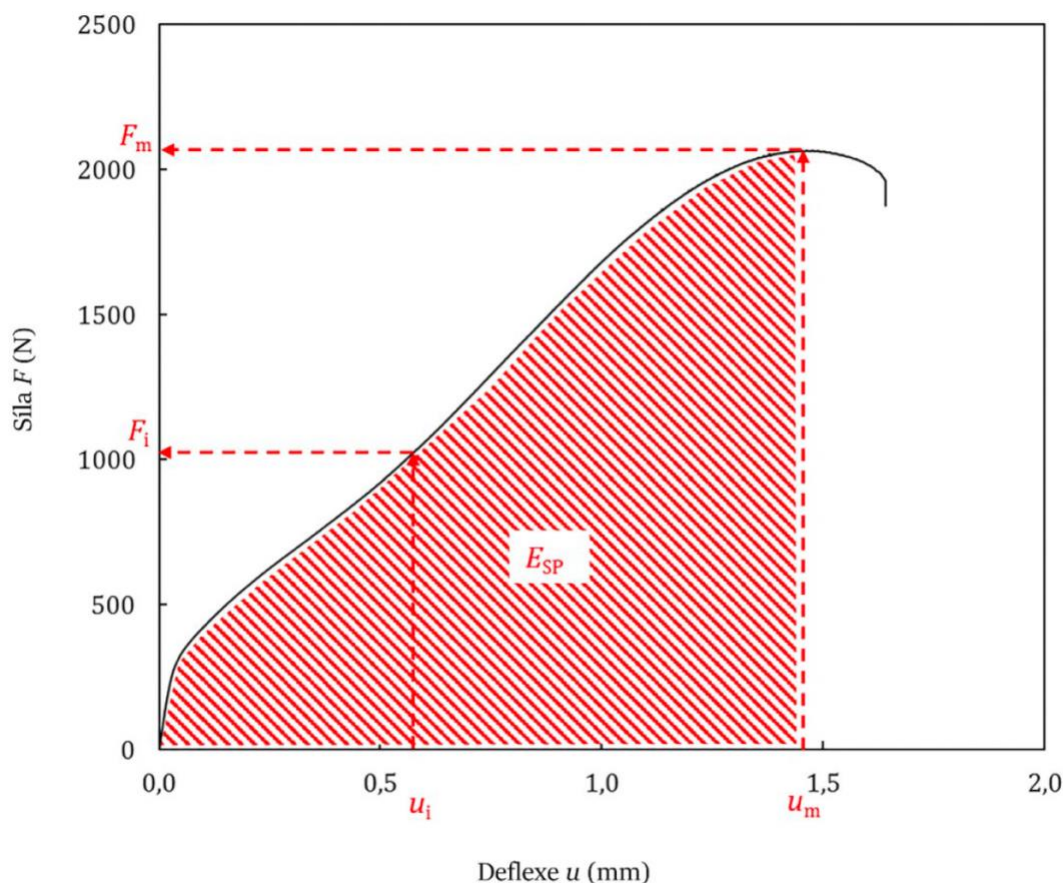
Ve třetí zóně nastává napínání membrány, materiál se zužuje. Nepřestávající dvouosá napjatost natahuje zkušební těleso a vzniká větší plastická deformace. V tomto důsledku křivka svou směrnici zvyšuje, mění svůj průběh z původního mírně konkávního na konvexní.

Křivka ve čtvrté fázi pokračuje se stejným trendem, kde končí křivka třetí fáze a nastává maximální možné zatížení. V tomto důsledku neustále se zvyšujícího zatížení až do maxima nastává nukleace dutin a dochází k následné trhlině, která zaujímá svůj tvar pro jednotlivé typy materiálů.

V páté poslední fázi, nastává rapidní pokles zatížení. Tento pokles je dán již nesoudržností materiálu a rozšiřování trhlín, vzniklých v předchozí fázi. Na konci této fáze je zkouška ukončena a automatický systém vyhodnotí naměřené hodnoty a vytvoří příslušné

křivky. Vzorek se zpravidla vyjme a dále se potom zkoumá (lomová plocha, tvar trhliny, velikost trhliny, popřípadě další charakteristiky).

Na **Obrázku 7-5** lze pozorovat ukázky materiálů, které ukončují zkoušky v jednotlivých fázích. Lze pozorovat korelaci mezi stejnými materiály při konvenční tahové zkoušce. Důvodem jsou charakteristické vlastnosti materiálů a podobné zatěžující mechanismy u zkoušek SPT penetrační zkouška a konvenční tahová zkouška. [63]



Obrázek 7-6 - Křivka SPT penetrační zkoušky Síla/Deflexe a E_{SP} [49]

Červeně vyšrafovaná plocha na **Obrázku 7-6** je hodnota energie SPT penetrační zkoušky E_{SP} [J], která se používá při odhadování lomové houževnatosti, popřípadě k vyjádření transiční teploty SPT zkoušky. Můžeme použít i křivky operující s posunutím v [mm] a silou F_v [N], ovšem nelze zaměňovat síly pro deflexi F_u [N] a síly pro posunutí F_v [N] mezi sebou, stejně tak nelze zaměnit posunutí v [mm] a deflexi u [mm] pro jednu sílu. [49]

7.5 SPT creepová penetrační zkouška

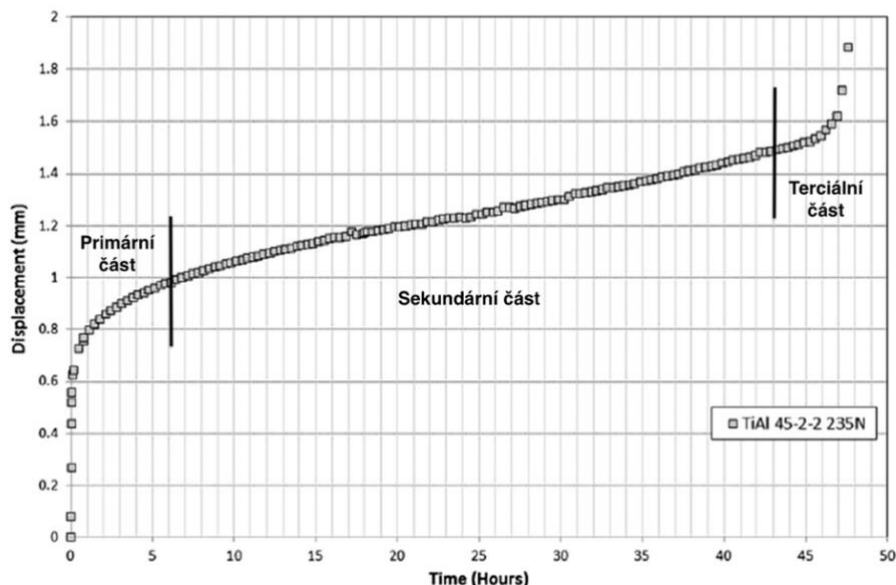
Hlavním rozdílem SPT penetrační zkoušky creepové (dále jako SPC) je pozorování deflexe/posunutí v v čase za nezávážující se síly. Celá konstrukce a postup je velice podobný SPT penetrační zkoušce, kde se nezaznamenává čas, ale síla v závislosti na deflexi/posunutí. První krok zkoušky je uchycení zkušební vzorku mezi spodní a horní část matrice. Razník je v tomto případě opět kulička umístěna v konkávním těle razníku nebo razník s hemisférickým hrotem, skrze který působí síla na zatěžovaný zkušební vzorek. Síla, kterou působíme na vzorek

je konstantní. Posun spodní části membrány (deflexe/průhyb) měříme za pomoci LVDT (linear variable differential transformer) technologie, popřípadě digitálního úchylkoměru. Je potřeba vhodně volit materiál, ze kterého je vyhotoven razník, jelikož při zvýšených teplotách u SPC nastává oxidace vlivem zvýšených teplot. Typickými materiály pro razníky vykazující žárupevnost, tj. zachování si pevnostních charakteristiky i za zvýšených teplot jsou: karbidy wolframu, nomonic alloy, keramiky vykazující vysokou pevnost nebo žárupevné oceli. Zkušební vzorek se zpravidla zahřívá na požadované teploty indukčním ohřívacem, který je řízen digitálně. Doporučuje se provádět zkoušky v inertních prostředích, abychom co nejvíce zabránili oxidaci, popřípadě korozi. Jedná se rozměrově o malé vzorky, tudíž oxidace či koroze mohou mít značný dopad na výsledek měření. [64]

Charakteristické parametry křivky deflexe – čas

Křivky získané z SPC se velice podobají konvenčním creepovým zkouškám. V křivkách se rovněž objevují tři charakteristické oblasti a to: primární, sekundární a terciální. Zkušební vzorky mají creepově standardní odezvu, kterou je zrychlení nárůstu deflexe se zvyšující se teplotou či velikostí zatížení. Tyto pochody se odehrávají i reverzně, tudíž s klesající teplotou, nebo velikostí zatěžující síly nám klesá rychlost deflexe, tudíž celý proces trvá déle. Hlavní mechanismy deformace SPC jsou jen málo odlišné od konvekční creepové zkoušky. Tím hlavním rozdílem je, že při creepové zkoušce konvenční nastává jednoosá napjatost, zatímco u zkoušek SPC se jedná o napjatost dvouosou. Díky možnostem pozorovat vzorek ve skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) bylo zjištěno ztenčení směrem od jeho středu. Způsob deformace v primární oblasti je ohyb, zatímco v sekundární a terciální oblasti nastává tzv. napínání membrány. V poslední, terciální fázi nastává k porušení materiálu a prudkému nárůstu obvodové trhliny, která má za následek rychlý nárůst deflexe a ukončení zkoušky. [64]

Obrázek 7-7 reprezentuje typickou křivku posunutí/čas pro konkrétní materiál TiAl 45-2-2, který byl zatěžován konstantní silou 235 N. Na křivce lze pozorovat jednotlivé oblasti, které jsou svým rozdílným průběhem lehce rozlišitelné. Pro tento konkrétní materiál byla zkouška ukončena po necelých 48 hodinách, kde nastalo k tak výraznému posunutí vůči času, až měřicí systém zatěžování zastavil. V poslední terciální fázi, tedy těsně před ukončením zkoušky, došlo k akumulaci napětí v místě zúženého průřezu, kde došlo k tak velké nukleaci a následnému propojení kruhových trhlin až došlo k prakticky absolutní penetraci zkušebního tělesa razníkem.



Obrázek 7-7 - SPC křivka posunutí/čas pro teplotu 750 °C, 235 N [64]

Teploty a jejich odchylky při SPT creepové penetrační zkoušce

Teplotu měříme termočlánkem, který by měl být v ideálním stavu v kontaktu se zkušebním vzorkem. Norma ČSN EN 10371 dovoluje implementaci termočlánku do spodního mechanického senzoru posunutí/deflexe, popřípadě se termočlánek nemusí zkušebního vzorku dotýkat vůbec, ovšem v tom případě bychom se vždy měli ujistit, že termočlánek měří s dovolenou odchylkou za pomoci dostupného ethanolu pro SPC zkoušky. Pokud termočlánek nevyhovuje musí se zajistit příslušné korekce. Termočláanky používáme nejčastěji typu K nebo N podle měřené teploty.

Teplotní odchylka, která norma povoluje mezi indukovanou teplotou T_i a teplotou specifickou zkušební T je různá pro předepsaná rozmezí teplot, ovšem je obdobná s normou ČSN EN ISO 6892-2. [19, 49, 64]

7.6 Odhad meze pevnosti v tahu R_m a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na základě penetračního zkoušení

Hlavním výstupem z SP penetrační zkoušky jsou hodnoty, které nejsou v běžné praxi vždy vhodně použitelné a je tedy příhodnější je převést na hodnoty aplikovatelnější, jako je mez pevnosti v tahu R_m [MPa], popřípadě mez pevnosti v kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]. Jedná se o kvalitativní odhady, které jsou korelovány za pomoci korelačních koeficientů, jež jsou zjišťovány experimentálně.

Obecně lze provést kvalitativní výpočet a odhad meze pevnosti dvěma způsoby. První způsob uvažuje sílu na mezi plastické nestability F_i [N] a druhý sílu maximální F_m [N].

$$R_m = \beta_{R_m} \frac{F_m}{h_0 u_m} \quad (7.1)$$

$$R_m = \beta_{R_m} \frac{F_i}{h_0^2} \quad (7.2)$$

V obou vzorcích se objevují korelační koeficienty β_{R_m} , jehož hodnota závisí na geometrii nastavení SP zkoušky, dále na poloměru hrotu razníku, průměru otvoru a zkosení v přídržné spodní matici, na zkosení otvoru v přídržné spodní matici, na tvaru a velikosti vzorku. Korelační součinitel β_{R_m} je empirický faktor zjištěn experimentálním měřením pro konkrétní materiály. Hodnoty β_{R_m} lze pozorovat, viz **Tabulka 7-2**. [49]

Geometrie	R (mm)	D (mm)	Typ hrany dolní matrice	h_0 (mm)	Typ křivky	$u_i v_i$ (mm)	β_{R_m}
Standardní	1,25	4,0	Zkosení $0,2 \times 45^\circ$	0,5	$F(u)$	$0,552(u_i)$	0,192
Standardní	1,25	4,0	Zkosení $0,2 \times 45^\circ$	0,5	$F(v)$	$0,645(v_i)$	0,179
Miniaturní	0,5	1,75	Zkosení $0,2 \times 45^\circ$	0,25	$F(u)$	$0,282(u_i)$	0,205
Miniaturní	0,5	1,75	Zkosení $0,2 \times 45^\circ$	0,25	$F(v)$	$0,320(v_i)$	0,197

Tabulka 7-2 - Hodnoty korelačního součinitele β_{R_m} v závislosti na geometrii SP penetrační zkoušky [49]

Dalším kvalitativním odhadem je odhad meze kluzu $R_{p0,2}$ [MPa], což je velice důležitá hodnota pro nejen konstrukční navrhování. Jelikož se na této hodnotě materiál přesouvá z elastického chování do plastického chování je ideální vycházet ze síly F_e . Tato síla se nachází na mezi plastické nestability a odpovídá jí v příslušném místě posunutí v_e nebo deflexe u_e .

$$R_{p0,2} = \beta_{R_{p0,2}} \frac{F_e}{h_0^2} \quad (7.3)$$

Vzorec pro kvalitativní odhad $R_{p0,2}$ je obdobný vzorcí pro kvalitativní odhad R_m . Rovněž i v tomto vzorcí se objevuje korelační koeficient, ovšem pro mez kluzu $\beta_{R_{p0,2}}$, který také závisí na geometrii SP penetrační zkoušky. Korelační koeficient $\beta_{R_{p0,2}}$, viz **Tabulka 7-3** je platný pro oceli v rozmezí mezích kluzu od 200 MPa do 1000 MPa. [49]

Geometrie	r (mm)	D (mm)	Typ hrany matrice	h_0 (mm)	Typ křivky	$\beta_{R_{p0,2}}$
Standardní	1,25	4,0	Zkosení $0,2 \times 45^\circ$	0,5	$F(u)$	0,510
Standardní	1,25	4,0	Zkosení $0,2 \times 45^\circ$	0,5	$F(v)$	0,479

Tabulka 7-3 - Hodnoty korelačního koeficientu $\beta_{R_{p0,2}}$ v závislosti na geometrii SP penetrační zkoušky [49]

7.7 Odhad lomové houževnatosti na základě penetračního zkoušení

Hodnoty lomové houževnatosti lze odhadovat třemi různými způsoby. Jedná se o dvoustupňové korelace lomové houževnatosti K_{IC} [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$], kde norma ČSN EN 10371 uvádí vzorec, ve kterém jsou potřebné dvě teploty, a to T [$^{\circ}\text{C}$, K] teplota měření a T_{CVN} [$^{\circ}\text{C}$, K] Charpyho přechodová teplota, která je definována na 50% horní prahové hodnotě energie. [49]

$$K_{IC} = \frac{6\,600}{60 - (T - T_{CVN})} \quad (7.4)$$

V normě ČSN EN ISO 148-1 pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy je stejná hodnota Charpyho přechodové teploty pro 50% horní prahové energie značena jinak než v normě ČSN EN 10371, a to $T_{50\%US}$ namísto T_{CVN} . [49, 65]

Dalším způsobem, jak lze korelovat hodnoty lomové houževnatosti je empirická korelace mezi ε_f [-] a J_{IC} [N/mm]. Hodnota J_{IC} je lomová houževnatost určena z J -integrálu a zároveň hodnota ε_f je efektivní lomová houževnatost jejíž hodnotu lze spočítat pomocí logaritmičského podílu hodnot h_0 [mm] a h_f [mm]. [49, 65, 66] Dále se do vzorce promítají empirické koeficienty s označením k a J_0 , jejichž hodnoty jsou závislé na materiálu a lze je nalézt v následující literatuře [67–71].

$$J_{IC} = k \cdot \varepsilon_f - J_0 \quad (7.5)$$

Posledním způsobem je určení lomové houževnatosti u vrubovaných vzorků v místě, kde iniciuje trhlinka. Značí se δ_{IC} [mm] a platí pro ni vztah obsahující J_{IC} a smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa], který lze vidět níže. [49, 66]

$$J_{IC} = R_{p0,2} \cdot \delta_{IC} \quad (7.6)$$

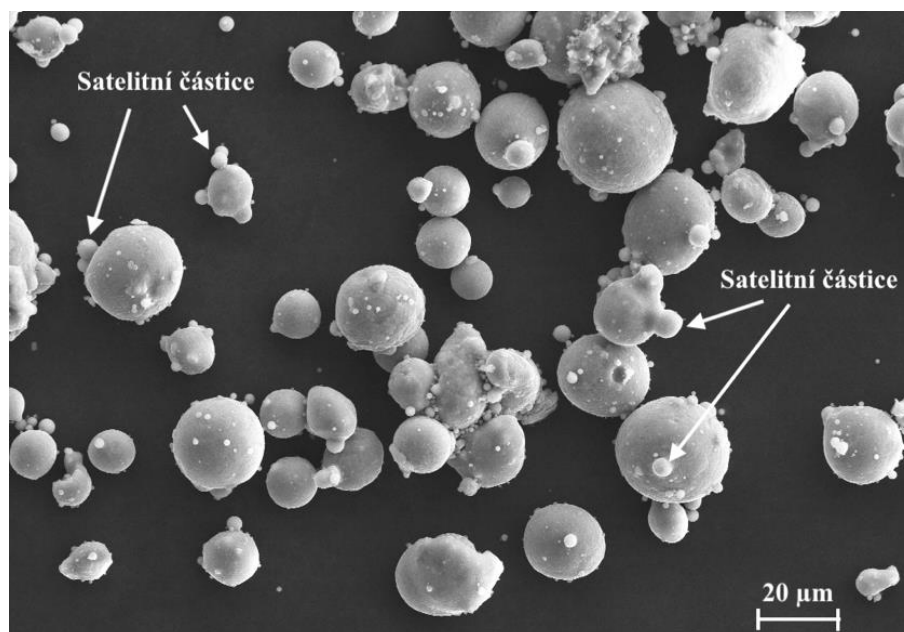
8 Experimentální část

Pro experiment byla zvolena pevnostní hliníková slitina s označením AA 7075, komerčně dostupná v atomizovaném práškovém stavu. Následovala analýza prášku, které spočívala v zjištění chemickém složení, mikrotvrdosti a granulometrii. Prášek byl poté nadeponován na substrát, který byl oddělen konvenčním třískovým obráběním. Veškerá testování tedy probíhala na pouze nanesené vrstvě bez substrátu. Pro stanovení mechanických vlastností byly zvoleny tři mechanické zkoušky. Jedná se o zkoušku tahem, zkoušku ohybem a small punch test. Všechny zkoušky byly provedeny na nekonvenčně malých zkušebních tělesech, které byly vyhotoveny z nadeponovaného práškového materiálu slitiny AA 7075 bez následného tepelného zpracování (dále jako As-built). Po provedení a vyhodnocení zkoušek následovala fraktografie lomových ploch. Na závěr byl provedena korelace mechanických charakteristik u zkoušky small punch testu. Mechanické charakteristiky získané ze zkoušky tahem a zkoušky ohybem nebylo nutno dále korelovat. Vyhodnocovaly se přímo dosažené hodnoty z jednotlivých zkoušek.

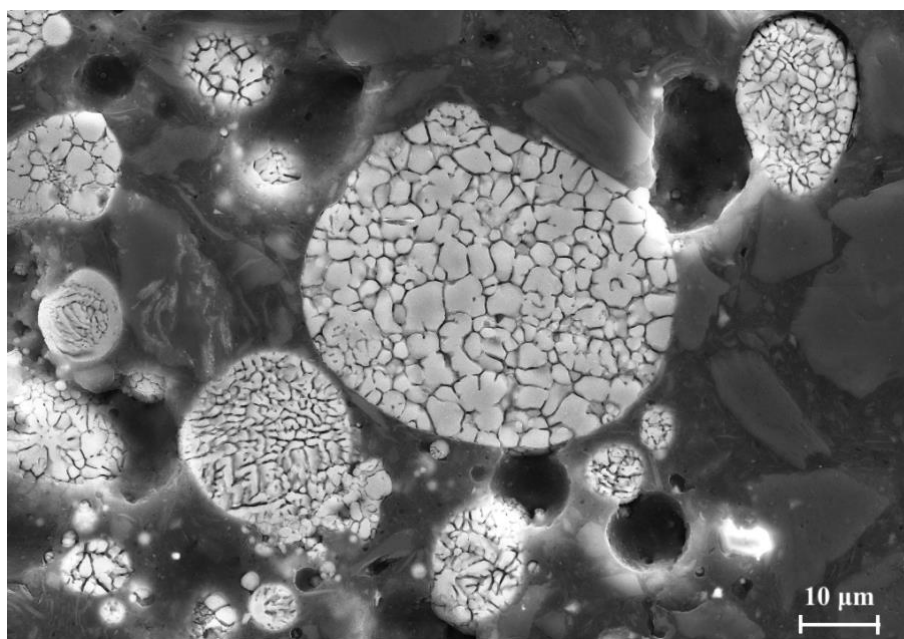
8.1 Popis experimentální materiál AA 7075 pro studenou kinetickou depozici

Jedná se o materiál hliníkové slitiny AA 7075, který byl prostřednictvím metody atomizace uveden do práškového stavu. Prášek byl dodán firmou Nanografi (Turecko). Pro analýzu prášku byl proveden metalografického výbrusu s následujícími specifikacemi. Prášek, z důvodu nízkých teplot aktivace vnitřních procesů, byl zaléván za studena do vybrané formy. Po ztuhnutí následovalo zbroušení, které probíhalo na řadě brusných kotoučů (500, 800, 1200, 2400, 4000). Celý proces broušení byl chlazený vodou. Následovalo mechanické leštění za pomoci leštících kotoučů (odpovídajících jednotlivým mikronovým diamantovým pastám), tří mikronové diamantové pasty a v posledním leštícím kroku jedno mikronové diamantové pasty. Leštící proces byl po celou dobu průběhu smáčen ethanolem. Na části vzorku následovalo leptání, kde z důvodu hliníkové slitiny bylo použito leptadlo Keller.

Částice prášku byly zdokumentovány zapomocí SEM Carl Zeiss Ultra Pluss (Německo). Částice po atomizovaném stavu vykazují po celém obvodu tzv. satelitní částice, které jsou spojeny s hlavními částicemi prášku. Počet a rozložení satelitních částic závisí na kvalitě atomizace prášku. Poté pro lepší vizualizaci poměru zrn a velikosti částic byl prášek zachycen v řezu zapomocí SEM, viz **Obrázek 8-2**. Leptání na hranice zrn Keller.



Obrázek 8-1- Částice materiálu AA 7075 se satelitními částicemi ze SEM, zvětšení 500 krát, SEs (secondary electrons)



Obrázek 8-2 - Částice v řezu, leptáno Keller, ze SEM, zvětšení 1000 krát, SEs (secondary electrons)

Chemická analýza experimentálního materiálu

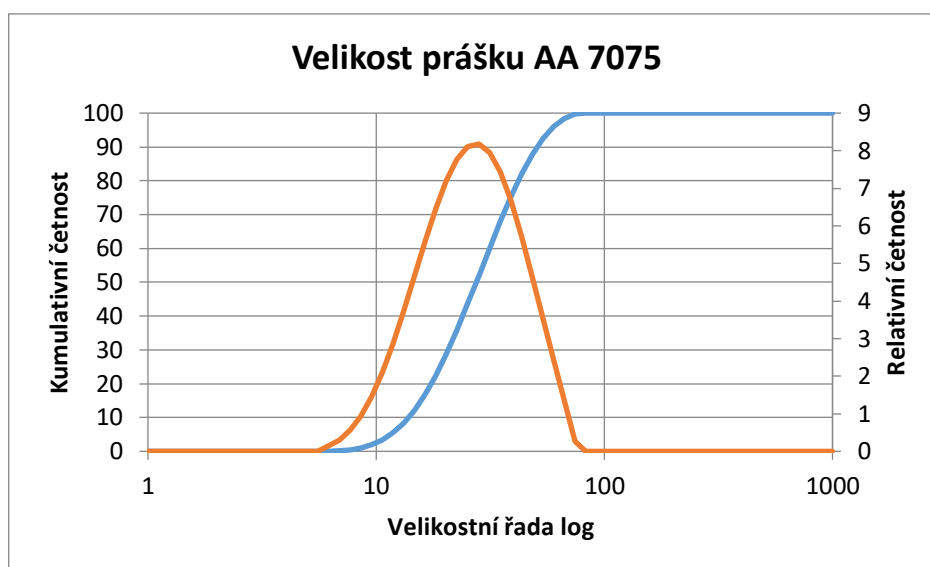
Chemická analýza složení prášku byla provedena za pomoci spektroskopu GDOES. Jedná se o optickou emisní spektroskopii s doutnavým výbojem, kde zařízení nese technický název Q4 TASMÁN. Výsledky z chemické analýzy jsou uvedeny, viz **Tabulka 8-1**. Hlavními prvky doprovázející hliník s obsahem nad 90 % je Zn, Mg a Cu.

	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
hm. %	90,47	0,075	0,081	1,561	2,28	0,229	0,005	5,235	0,0014

Tabulka 8-1 - Chemické složení prášku AA 7075 uvedeno v hmotnostních procentech

Analýza velikosti částic experimentálního materiálu

Následující analýzou bylo zjištění velikosti práškových částic neboli granulometrie. Měření probíhalo v laserovém difraktometru pod názvem Mastersizer 2000 (Nizozemsko) od firmy Malvern Panalytical. Vzorky byly vyhodnocovány ve dvou modulech, a to jak v suchém, tak i v mokřem stavu. Mediální hodnota velikosti částic je 24,65 μm . Celkové rozložení velikosti částic ze suché metody granulometrie lze pozorovat, viz **Obrázek 8-3**.



Obrázek 8-3 - Vyhodnocení velikosti částic ze suché metody granulometrie

Analýza tvrdost experimentálního materiálu

Následovala zkouška mikrotvrdosti prášku za užití Vickersova tvrdoměru Q10A, Qness (Německo). Měření a vyhodnocení zkoušky probíhala v souladu s normou pro měření mikrotvrdosti dle Vickerse ČSN EN ISO 6507-1. [72] Hodnota zatížení byla HV 0,005, což odpovídá hmotnosti 5 g, velikosti působící síly 0,049 N. Parametry a výsledné hodnoty, lze pozorovat, viz **Tabulka 8-2**, která poukazuje na průměrnou tvrdost 102,18 HV.

Zatížení	Počet indentů	Doba zatížení [s]	Min tvrdost	Max tvrdost	Průměrná tvrdost
0,005	5	15	92,2	111	102,18

Tabulka 8-2 - Mikrotvrdost prášku HV 0,005

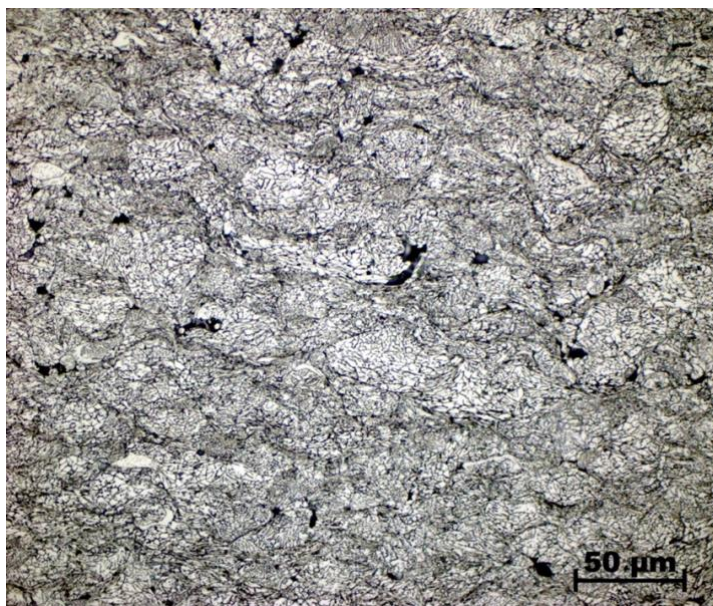
Poslední analýzou zabývající se samotným práškem byla analýza porozity prášku. Která se vyhodnocovala za pomoci programů obrazové analýzy. Použitý program pro vyhodnocení porozity byl ImageJ. Vyhodnocení výsledků z obrazové analýzy je náchylné na přípravu metalografického výbrusu. V našem případě byl metalografický výbrus v poslední části přípravy leštěn nejprve tří a poté jedno mikronovou diamantovou pastou a leštícím kotoučem. Z důvodu objemových změn byla porozita vyhodnocena ve čtyřech hladinách vzdálených 1 mm. Celková porozita vyšla 1,06 %.

8.2 Parametry nástřiku prášku – Cold Spray

Materiál v atomizovaném stavu byl nadeponován na předem zvolený substrát. Jednalo se o slitinu hliníku EN AW 6082-T6, která měla tvar desky s rozměry o délce 50 mm, šířce 40 mm a tloušťce 8 mm. Tento substrát ve formě desky byl před nástřikem otryskán hnědým korundem. Jednalo se o hrubé tryskání k zvýšení adhezních vlastností deponovaného prášku na substrát. Celý proces studené kinetické vysokotlaké depozice probíhal na stroji 5/11 Cold Spray System od firmy Impact Innovations (Německo). Použitá tryska byla z karbidické keramiky na bázi křemíku, tedy SiC. Pracovní tlak byl 40 bar a teplota nástřiku dosahovala 550 °C. Hnací plyn byl použit dusík.

Rozteč samotného skenování byla 1 mm. Substrát byl vzdálen od vyústění trysky 30 mm a proud dopadajících částic svíral se substrátem 90°. Rychlost skenování poté dosahovala 300 mm/s. Po předehřevu, který proběhl v rámci třech přejezdů nastalo samotné nanášení funkční vrstvy, které čítalo 25 přejezdových úseků. Depozice byla v tomto momentu zastavena z důvodu ucpání trysky nanášeným materiálem. Podařilo se nastříkat finální vrstvu prášku o tloušťce 2,8 mm, ovšem z důvodu ucpané trysky se posledních několik vrstev poškodilo. Poté nastalo odstranění nevyhovující části nástřiku a to formou konvenčního třískového obrábění. Bylo odstraněno 0,5 mm tloušťky nástřiku tzn., že použitelná tloušťka naneseného substrátu čítala 2,3 mm.

Z nadeponovaného experimentálního materiálu, byly připraven metalografický výbrus, které měl stejné parametry, jako metalografický výbrus pro přípravu prášku. Metalografický výbrus byl následně podroben zkoumání ve světelném mikroskopu a SEM. Strukturu a přibližnou velikost nadeponovaných částic po plastické deformaci lze pozorovat, viz **Obrázek 8-4**. Černé skvrny, které můžeme na obrázku pozorovat jsou póry vzniklé na hranicích jednotlivě deformovaných částic (splatů). Pórovitost může být důsledkem nevhodných parametrů nástřiku CS. Obrázek byl pořízen ze světelného mikroskopu Olympus GX51 se zvětšením 500 krát. Bylo použito leptadlo Keller.



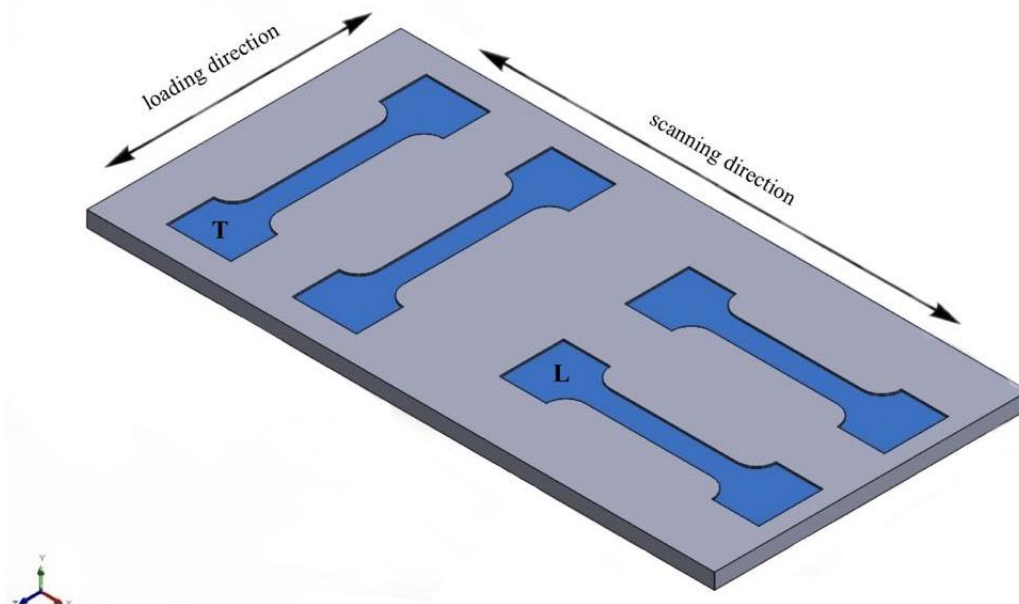
Obrázek 8-4 - Mikrostruktura nadeponovaných částí, leptáno Keller, světelný mikroskop, zvětšení 500 krát

8.3 Zkouška tahem – AA 7075 Cold Spray

První mechanickou zkouškou, která byla provedena na experimentálním materiálu, byla zkouška tahem. Vyhodnocovaný materiál byl v základním stavu bez tepelného zpracování (dále jako as-built). Bylo provedeno testování na čtyřech malých vzorcích. Stroj, na kterém byla zkouška provedena, byl universální trhačí stroj s technickým označením Zwick/Roell Z250. Siloměrná hlava byla použita do maximální hodnoty síly nepřevyšující 50 kN. Měření lineární odezvy materiálu probíhala kontaktním extenzometrem MultiXtens. Rychlost posuvu příčnicku byla po celou dobu zkoušky 0,5 mm/min. Zkoušky byly provedeny za pokojových teplot. Všechny čtyři tahové zkoušky probíhaly za stejných podmínek a v souladu s normou ČSN EN ISO 68921-1. [20]

Geometrie zkušební vzorku – zkouška tahem

Kvůli malým rozměrům vzorků byla nutnost odběru nekonvenčními obráběcími metodami. Konkrétně se jednalo o elektroerozivní drátové řezání. Odběr byl proveden ve dvou směrech, transversálním a longitudinálním. Transversální odběr vzorku je kolmý ke směru nástřiku CS a longitudinální je odběr ve směru nástřiku CS. Pro každý směr byly odebrané dva vzorky, aby se prověřila anizotropie zkoumaného materiálu. Tvar zkušebních těles může být porovnán se standardně plochými zkušebními tělesy z normy ČSN EN ISO 6892-1 [20]. Počáteční šířka vzorku činila $a_0 = 3$ mm, tloušťka vzorku $b_0 = 2$ mm a počáteční měřené délka $l_0 = 12$ mm. Celková délka vzorku l [mm] byla poté pro transversální odběr 36 mm a pro longitudinální 32 mm. Rozlišné délky vzorku jsou z důvodu lepší rozlišitelnosti při měření a zároveň úspore materiálu při odběru. Schéma odběru vzorku lze pozorovat, viz **Obrázek 8-5**. Obrázek znázorňuje směr (T-transverzální, L-longitudinální) odběru vzorku vůči směru depozice, tj. pohybu trysky (scanning direction).



Obrázek 8-5 - Schéma odběru malých tahových vzorků

Výsledky tahových zkoušek

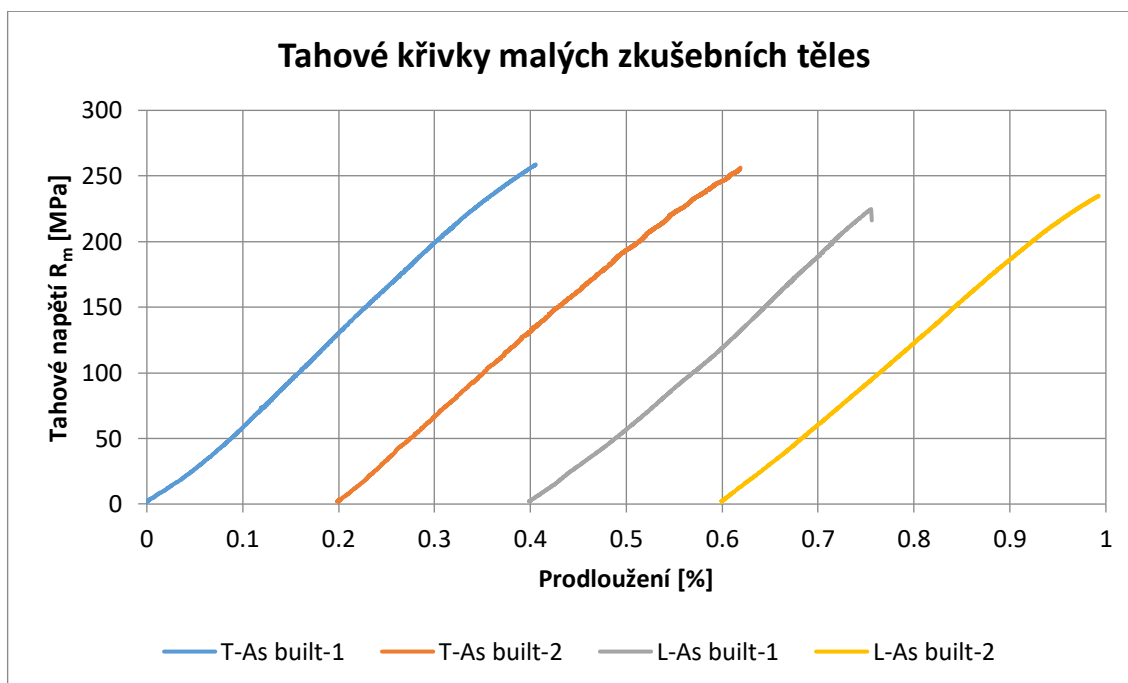
Přesné hodnoty rozměrů a výsledky z tahových zkoušek můžeme pozorovat, viz **Tabulka 8-3**. U označení vzorků první písmeno T označuje transversální odběr vzorku a písmeno L longitudinální odběr vzorku. Označení maximální síly je v tomto případě F_m [N]. Smluvní mez kluzu pro prodloužení 0,1 % je označena $R_{p0,1}$ [MPa] a tažnost A [%].

Označení vzorku	a_0 [mm]	b_0 [mm]	E [GPa]	F_m [N]	$R_{p0,1}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
T-As-built-1	2,11	2,92	72,37	1594	-	259	-
T-As-built-2	2,09	2,94	65,67	1574	-	256	-
L-As-built-1	2,16	2,95	67,54	1434	-	225	-
L-As-built-2	2,17	2,99	63,76	1523	-	235	-

Tabulka 8-3 - Výsledky tahových zkoušek malých zkušebních těles

Průměrná hodnota Youngova modulu pružnosti $E = 67,34$ GPa a průměrná hodnota meze pevnosti $R_m = 244$ MPa. Hodnoty smluvní meze kluzu pro prodloužení 0,1 % spolu s tažností nebylo možné vyhodnotit.

Výsledné tahové křivky všech čtyř měřených vzorků mají lineární charakter, a to až do meze pevnosti, což je zároveň bodem přetržení zkušebního tělesa. Na základě tohoto efektu lze vyhodnotit materiál jako křehký. Longitudinálně odebrané vzorky vykazují pokles meze pevnosti o zhruba 10 %. Lineární chování spolu s téměř nulovou hodnotou tažnosti je ovšem shodné pro oba směry odběrů, viz **Obrázek 8-6**.



Obrázek 8-6 - Tahové křivky malých zkušebních těles v obou odebíraných směrech T i L

8.4 Zkouška ohybem – AA 7075 Cold Spray

Druhou provedenou mechanickou zkouškou na experimentálním materiálu byla zkouška třibodovým ohybem. Vyhodnocovaný materiál byl, rovněž jako u tahových zkoušek, v základním stavu bez tepelného zpracování. Testovací stroj, na kterém byla zkouška provedena byl univerzální trhací stroj s technickým označením Zwick/Roell Z250, s úpravou čelistí pro zkoušku třibodovým ohybem. Použitá siloměrná hlava byla do maximální hodnoty síly 50 kN. Průhyb vzorku byl měřen, vzhledem k sousstavě podpor (uvažována 100 % tuhost soustavy), kontaktním senzorem MultiXtens. Průměr ohýbacího trnu spolu s průměry obou spodních podpor byl 10 mm. Rychlost zkoušky byla po celou dobu 1 mm/min. Všechny tři vzorky byly měřeny za pokojových teplot a v souladu s normou ASTM E290. [30]

Geometrie zkušební vzorku – zkouška ohybem

Vzorky byly odebrány z nadeponovaného materiálu pouze v jednom směru. Vzorky byly kvádřového tvaru s počáteční šířkou $b_0 = 3$ mm, počáteční výškou $h_0 = 1,5$ mm a délkou mezi osami spodních podpěr (roztečí) $l_0 = 35$ mm. Celková délka tělesa čítala $l_t = 40$ mm.

Výsledky ohybových zkoušek

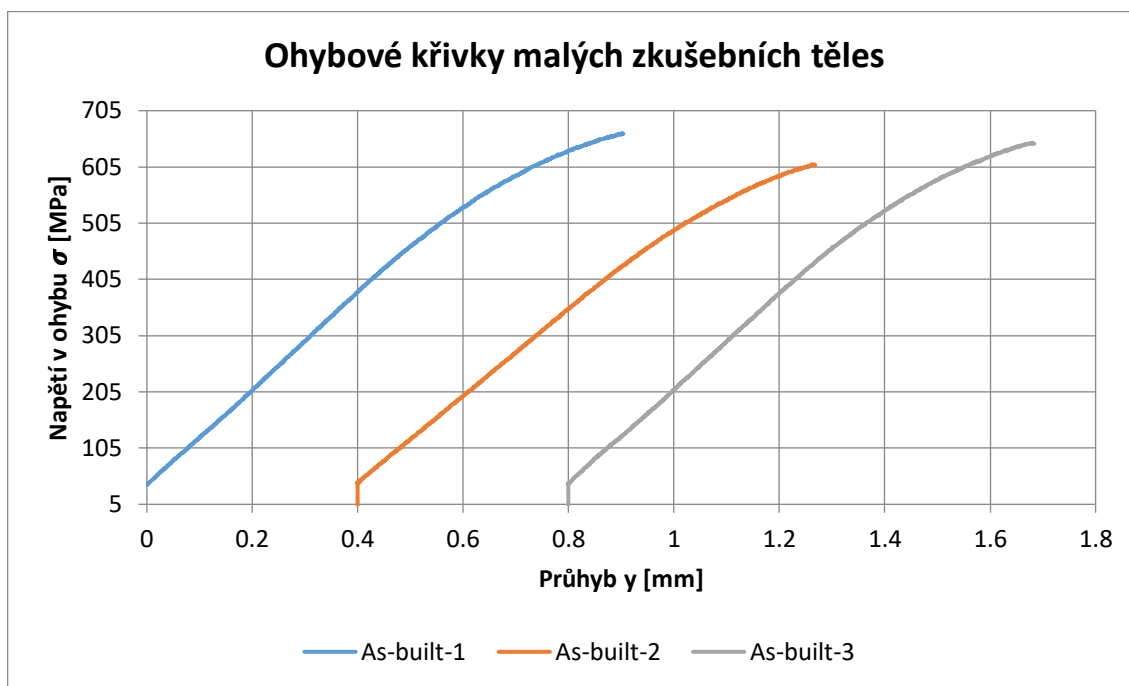
Výsledky všech tří ohybových zkoušek měřených na malých ohybových vzorcích je možno pozorovat, viz **Tabulka 8-4**. Smluvní mez kluzu byla stanovena pro trvalý průhyb 0,05 mm. Mez kluzu se poté označuje σ_y [MPa]. Maximální síla během zkoušky se značí F_{\max} [N] a hodnota meze pevnosti v ohybu nese označení σ_m [MPa].

Označení vzorku	h_0 [mm]	b_0 [mm]	σ_y [MPa]	F_{\max} [N]	σ_m [MPa]
As-built-1	1,613	2,888	634	94,1	657
As-built-2	1,513	2,957	588	75,9	588
As-built-3	1,565	2,857	639	87,2	654

Tabulka 8-4 - Výsledky ohybových zkoušek malých zkušebních těles

Průměrná hodnota meze kluzu je $\sigma_y = 620,33$ MPa, průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu je $\sigma_m = 633$ MPa a průměrná hodnota maximální síly $F_{\max} = 85,73$ N.

Křivky ohybových zkoušek vykazují nízkou plasticitu experimentálního materiálu. Z tohoto důvodu zároveň bylo možné určit smluvní mez kluzu pro deformaci trvalý průhyb 0,05 mm. Linearita ohybových křivek poukazující na křehkost materiálu je stále značná, ovšem jedná se o jedinou zkoušku, při které materiál začal vykazovat známky mírné plasticity, viz **Obrázek 8-7**.

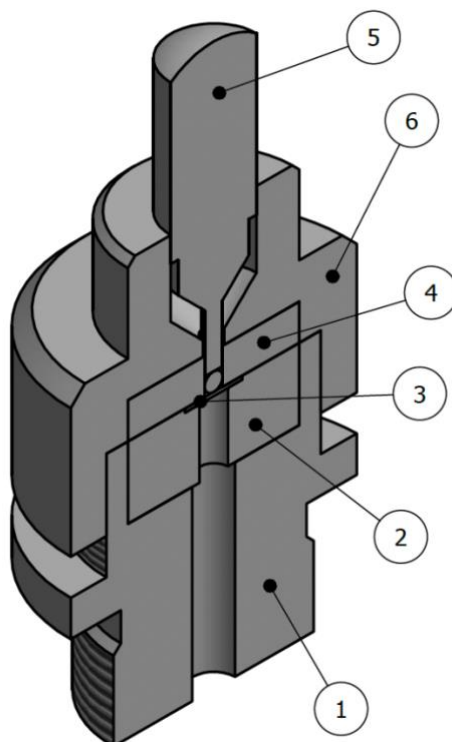


Obrázek 8-7 - Ohybové křivky malých zkušebních těles – zkouška tříbodovým ohybem

8.5 Small punch test – AA 7075 Cold Spray

Poslední mechanickou zkouškou byla zkouška SPT. Experimentální materiál byl v základním stavu, tj. bez tepelného zpracování. Z experimentálního materiálu byly odebrány tři zkušební vzorky, který podléhaly zkouše SPT. Experiment byl proveden na univerzálním trhačím stroji s technickým názvem Zwick/Roell Z250 s redukční siloměrnou hlavou do maximálních hodnot síly 50 kN. Pro experiment byl vyhotoven uchycovací a penetrační systém, který odpovídá požadavkům normy ČSN EN 10371 [49]. Zkušební těleso bylo umístěno mezi spodní a horní část uchycovací matrice. V horní části matrice je vyvrtaná díra, do které byla vložena (nabita) tvrdokovová kulička průřezu $D=2,50$ mm. Kulička je vyrobena z karbidu wolframu. Skrz horní část matrice je na kuličku položen hrot, který má konkávní vybrání, aby kopíroval tvar kuličky. Celé zařízení obsahující spodní a horní matici, zkušební vzorek, kuličku a razník bylo umístěno do univerzálního trhačího stroje. Zapomocí menších konstrukčních úprav uchycovacích čelistí bylo působeno na penetrační razník. Senzor posunutí byl použit MultiXtens, který snímal posuv penetračního razníku vzhledem k horní (tuhé) matici. Experiment byl proveden za pokojových teplot. Rychlost posuvu razníku byla po celou dobu zkoušky 1 mm/min.

Celou sestavu přípravku pro měření penetrační SPT zkoušky je možno pozorovat na **Obrázku 8-8**, kde je 1 – spodní část matrice, 2 – spodní vložka, 3 – vzorek tvaru disku, 4 – horní vložka, 5 – penetrační razník s hemisférickou hlavou a kuličkou, 6 – horní matrice.



Obrázek 8-8 - Schéma sestavy přípravku pro měření SPT zkoušek

Geometrie zkušební vzorku – zkouška SPT

Penetrační zkoušky SPT používají zkušební vzorku tvaru disku dvojího typu – standardní velikosti a miniaturní velikosti. Pro vyhodnocení tohoto experimentu byly vytvořeny vzorky standardních velikostí, tj. průměr disku $D_s = 8$ mm a tloušťka vzorku $h_0 = 0,45$ mm. Horní strana všech tří zkušebních vzorku byla leštěna na minimální požadovanou drsnost $R_a = 0,25$ μm .

Výsledky zkoušek SPT

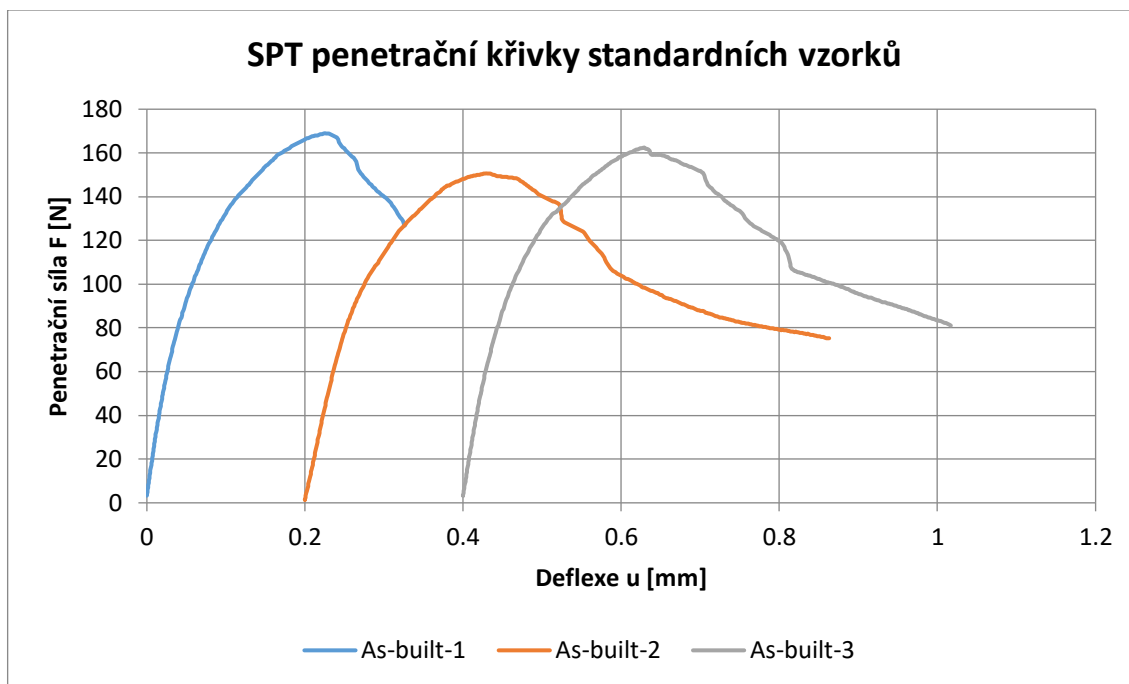
Konkrétní hodnoty tloušťky tělesa spolu s výsledky penetračních zkoušek SPT lze pozorovat, viz **Tabulka 8-5**. Maximální naměřená síla je v tabulce označena F_{max} [N] a hodnota deflexe pro maximální sílu u_m [mm]. Síla počátku plastické nestability přechodu F_i [N] a jí odpovídající posunutí v_i [mm] popřípadě deflexi u_i [mm] nebylo možné vyhodnotit z důvodu absence inflexního bodu. Zároveň nebylo možné stanovit sílu elastiko-plastického přechodu F_e [N]. Tato hodnota síly elastiko-plastického přechodu byla nahrazena experimentální silou $F_{h/100}$ [N], která odpovídá offsetu $h/100$, tj. 0,004 mm.

Označení vzorku	h_0 [mm]	$F_{h/100}$ [N]	F_{max} [N]	u_m [mm]
As-built-1	0,436	99,2	169	0,225
As-built-2	0,423	97,9	150,6	0,229
As-built-3	0,431	97,3	162,4	0,228

Tabulka 8-5 - Výsledky penetračních zkoušek SPT standardních zkušebních těles

Křivky penetračních SPT zkoušek, které můžeme pozorovat na **Obrázku 8-9** jsou typickými představiteli křehkých materiálů. Křivky neobsahují 2. a 3. část, kterou vykazují plastické materiály a můžeme ji pozorovat, viz **Obrázek 7-5**. Jedná se o část po elasticko-plastickém přechodu, kde se mění elastické deformace na plastickou a část napínání membrány.

První test penetrační SPT zkoušky byl zastaven již na 25 % maximální penetrační síly, zatímco zbylé dva na 50 % maximální penetrační síly.

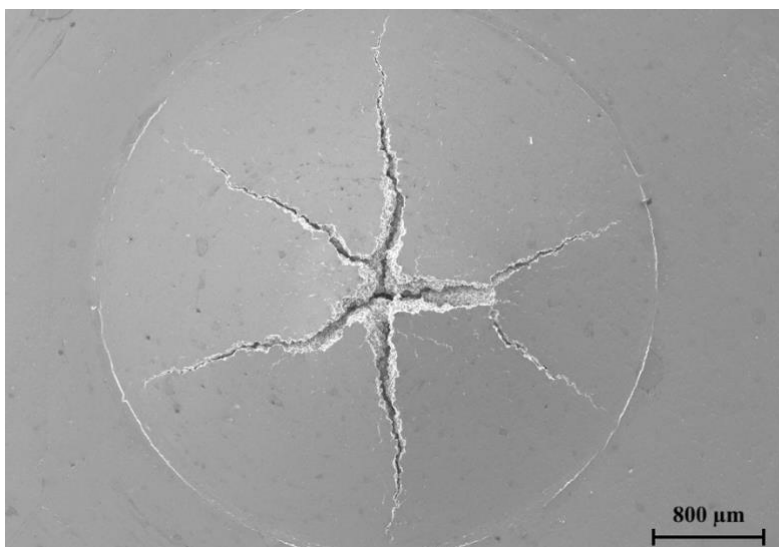


Obrázek 8-9 - Křivky SPT penetračních zkoušek prováděných na standardních tělesech
 $\varnothing D_s = 8 \text{ mm}$

Fraktografie – zkouška SPT

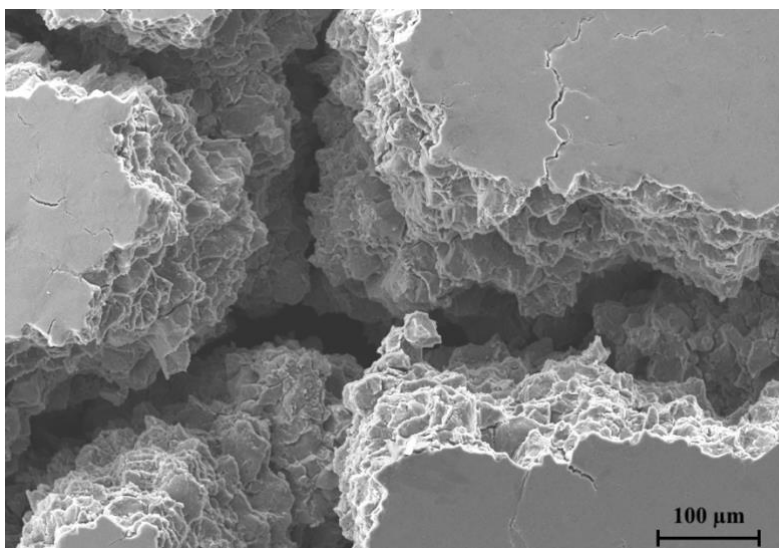
Po provedení penetrační SPT zkoušky byly pozorovány vzniklé trhliny a lomové plochy. V první fázi fraktografické analýzy byl vzorek zkoumán z kolmého pohledu a ve druhé fázi nastalo rozříznutí v místě trhliny a pozorování trhliny z pohledu bočního. Pro vyhodnocení fraktografie a pořízení fotodokumentace byl použit SEM Carl Zeiss Ultra Pluss (Německo).

Tvar trhlín při penetrační zkoušce SPT je popisován za pomoci počtu cípů hvězdy, jejímž tvarem trhlina hvězdu připomíná. V našem případě se jednalo o pětícípé trhliny (v anglické literatuře pod názvem five-star). **Obrázek 8-10** ukazuje makro fotku z elektronového mikroskopu při dvacetinásobném zvětšení. Hlavní magistralní trhlina má tvar pětícípé trhliny-hvězdy, která naznačuje relativně křehké chování materiálu. Kružnice opisující tvar trhliny je deformovaný okraj po vtlačené penetrační kuličce.



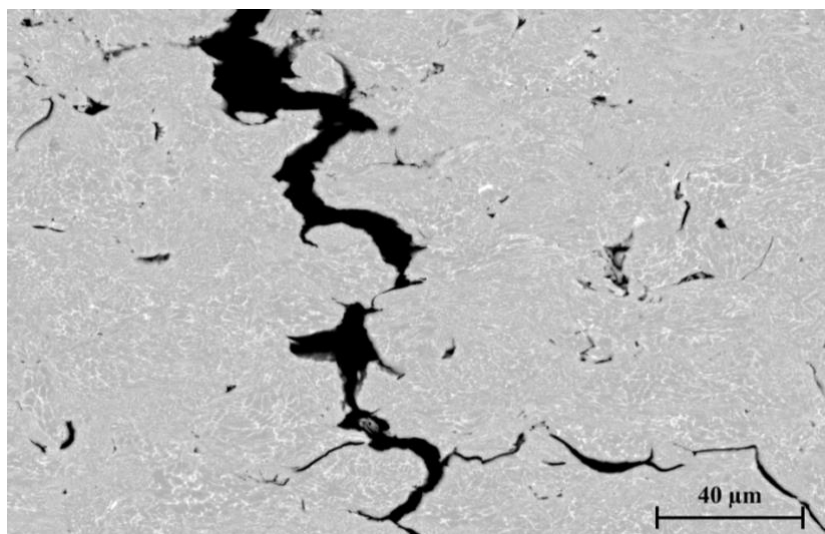
Obrázek 8-10 - Kolmý pohled na zkušební vzorek *As-built-2* penetrační zkoušky SPT ze SEM, zvětšení 20 krát, SEs (secondary electrons)

Pro podrobnější zkoumání lomové plochy následovalo větší zvětšení, viz **Obrázek 8-11**. Jedná se o zvětšení **Obrázku 8-12**, uprostřed trhliny. Charakter lomové plochy poukazuje na relativně velkou křehkost experimentálního materiálu. Z energetického hlediska se jedná o nestabilní, křehké lomy, které mají tendenci kopírovat strukturu nadeponovaných částí. Z hlediska mikromechanismů porušování jsou tyto lomy štěpné.



Obrázek 8-11 - Kolmý pohled na zkušební vzorek *As-built-2* penetrační zkoušky SPT ze SEM, zvětšení 150 krát, SEs (secondary electrons)

Z bočního pohledu lze šíření trhliny vidět napříč mikrostrukturou, viz **Obrázek 8-11**. Zároveň lze jednoznačně pozorovat šíření trhliny po jednotlivých nadeponovaných částicích. Toto poukazuje na adhezivní a kohezivní síly mezi jednotlivými částicemi. Tyto hranice jsou jednoznačným kritickým a zároveň iniciačním místem pro začátek a postup šíření trhlin v materiálech v přírodním stavu, tj. *As-built*.

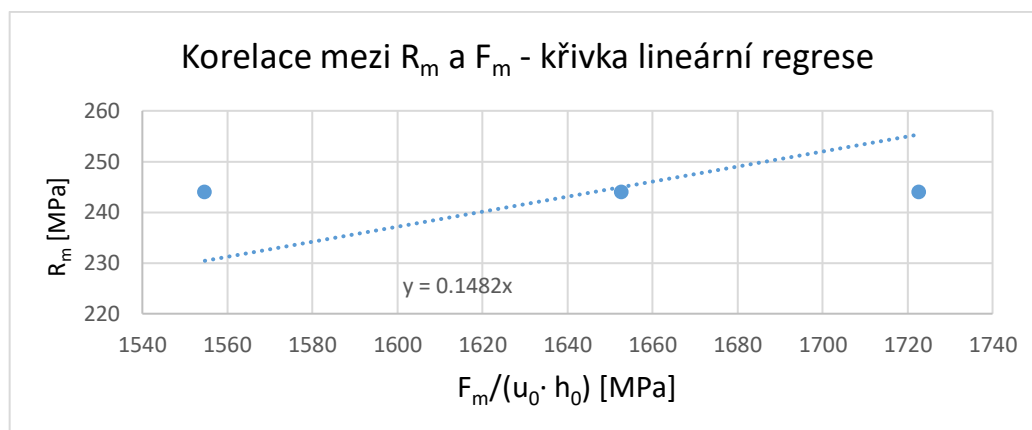


Obrázek 8-12 - Boční pohled na zkušební vzorek As-built-2 penetrační zkoušky SPT ze SEM, zvětšení 500 krát, SEs (secondary electrons)

Korelace výsledků – zkouška SPT

V posledním jsme se zaměřili na korelaci výsledků z penetračních zkoušek SPT pro experimentální měřený materiál v přírodním stavu, tj. As-built. Pro tento konkrétní experiment bylo možné korelovat pouze hodnoty meze pevnosti R_m [MPa], založené na maximální hodnotě síly F_m [N]. Následné korelace meze pevnosti založené na F_i [N], tj. síla počátku plastické nestability, popřípadě korelace smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ založené na F_e [N], tj. síla na mezi elasticko-plastického přechodu, nebyly možné stanovit z důvodu absence obou sil u všech tří zkušebních vzorků.

K vyhodnocení výsledků byl použitý vzorec 7.1, který dává do poměru maximální sílu a součin deflexe s tloušťkou vzorku. Korelace probíhala pouze ze tří dostupných zkoušek penetrační zkoušky SPT. Po porovnání výše zmíněného poměru a průměrné meze pevnosti, která činila $R_m = 244$ MPa byl získané tři body. Těmito body byla provedena lineární regrese, díky které jsme mohli určit hodnotu $\beta_{R_m} = 0,148$, viz **Obrázek 8-13**.



Obrázek 8-13 - Korelace mezi F_m z penetrační zkoušky a R_m z tahové zkoušky, korelační faktor $\beta_{R_m} = 0,148$

DISKUSE

V první části experimentu byl vybraný materiál pevnostní slitiny AA 7075 nadeponován metodou vysokotlaké studené kinetické depoziče – CS, tímto byl vytvořen základní tvar desky o takovém objemu, z kterého bylo možno vyřezat všechny zkušební tělesa. Klíčovým bylo nastavení parametrů metody CS, které vycházely z průvodních analýz testování prášku. Výsledná struktura nadeponovaných částic, viz **Obrázek 8-3**, svou mikrostrukturou, velikostí zdeformovaných částic (splatů) a porozitou, se shoduje s literaturou [73–75]. V těchto odborných člancích Ren a kol. [74] a Rokni a kol. [73] rovněž připravovali materiál studenou kinetickou depozičí – CS. Analýza mikrostruktury, která zahrnovala zjištění přibližné velikosti plasticky zdeformovaných částic (splatů), vyhodnocení pórovitosti, velikost a počet cizích částic dokazuje, že jsou materiály ekvivalentní.

Výsledky z tahových zkoušek poukazují na křehkost materiálu. Důkaz křehkého chování je absence smluvní meze kluzu $R_{p0,1}$ [MPa] a tažnosti A [%]. Zároveň při pohledu na tvar tahových křivek, viz **Obrázek 8-5**, si lze povšimnout lineárního charakteru až do meze porušení. Značnější lineární charakter, a to v obou směrech (T i L), vykazuje vzorek As-built 2. Samotná hodnota meze pevnosti, viz **Tabulka 8-3**, se shoduje s literaturou [75], kde probíhalo měření tahových těles materiálu hliníkové slitiny 7075 připraveného metodou CS. Maximální tahové napětí je odlišné pro oba typy odběru vzorku vzhledem k orientaci nástřiku prášku, viz **Obrázek 8-4**. Vzorky odebrané transversálně vykazují až o 10 % vyšší pevnost než u vzorků odebrané v longitudinálním směru. Tuto skutečnost potvrzuje literatura [74], kde Ren a kol. testovali mechanické vlastnosti materiálu AA 7075 připraveného CS vzhledem ke směru odběru vzorku.

Při ohybových zkouškách materiál začal vykazovat lehký nárůst plasticity. Pro tyto zkoušky bylo možno, napříč již zjištěné křehkosti experimentálního materiálu, vyhodnotit mez kluzu σ_y [MPa], viz **Tabulka 8-4**. Toto chování může být zapříčiněno pozicí vzorku při testování, kde zkušební vzorek byl ohýbaný netradičně přes tenčí stranu vzorku. Tahové křivky ke konci průběhu zkoušky ztrácí svou linearitu, ovšem nijak značně, viz **Obrázek 8-6**. V tomto důsledku nemarkantní změny linearity v poslední části ohybového diagramu jsou si svými hodnotami napěťové charakteristiky σ_y [MPa] a σ_m [MPa] velmi podobné. Průměrný rozdíl v napětích σ_y [MPa] a σ_m [MPa] je do 5 %. V porovnání s literaturou [76, 77], kde se zabývali ohybovými testy na materiálech hliníkové slitiny 7075, jsou námi naměřené hodnoty vyšší, konkrétně hodnoty meze kluzu σ_y [MPa]. Důležité je ovšem podotknout, že ve studii [76] probíhaly ohybové zkoušky za zvýšených teplot, konkrétně $T = 400$ °C, je tedy zřejmé, že pevnostní charakteristiky byly zhoršené. I přes zvýšené teploty materiál ve studii [76] vykazoval značně vysoké napěťové charakteristiky. Tato skutečnost může být zapříčiněna parametry nástřiku – CS, konkrétně použitím nosného média He. V našem případě bylo použito nosné médium N.

Výsledky penetračních SPT zkoušek poukazují opět na křehkost materiálu. SPT křivky svým tvarem neodpovídají houževnatým materiálům o kterých hovoří, jak norma ČSN EN 10371 [49], tak i literatura [63], kde Rasche a kol. zkoumají mechanické vlastnosti obecně tvárných a křehkých materiálů za pomoci SPT zkoušek. Křivky v důsledku křehkosti materiálů neobsahují inflexní bod a zároveň se z křivek nedá určit síla elasticko-plastického přechodu F_e [N], která je potřebná pro následné korelační vzaty. Na místo síly F_e [N] byla zvolena experimentální síla $F_{h/100}$, která odpovídá offsetu $h/100$.

Fraktografie vzorků po zkouškách SPT dokázala, že trhliny se jednoznačně šíří po hranicích jednotlivých deformovaných částic (splatů), jedná se tedy o kritické místo, viz **Obrázek 8-11**. Lomy jsou z energetického hlediska nestabilní, tj. křehké a z hlediska mikromechanismů porušování štěpné, viz **Obrázek 8-11**, což pouze reflektuje křehkost materiálu jakožto celku. Pozorování lomových ploch a míst kudy se šíří trhlina jasně ukazuje na lokální oslabení mikrostruktury v místech hranic jednotlivých deformovaných částic (splatů). V pracích [74, 76] po fraktografické analýze dospěli ke stejným výsledkům, tedy že nejslabšími místy celé makrostruktury jsou již zmíněné hranice deformovaných částic (splatů). Trhliny se v obou literaturách šířily podél těchto kritických míst.

Korelace výsledků z penetrační SPT zkoušky probíhala na základně vztahů z normy ČSN EN 10371 [49]. Z důvodů absence potřebných sil, konkrétně F_i [N] a F_e [N], byla provedena pouze korelace R_m [MPa] v závislosti na F_m [N], viz **Obrázek 8-12**. Korelace byla porovnávána z průměrnou hodnotou R_m , která byla získána z tahových zkoušek, viz **Tabulka 8-3**. Po dosazení do vztahu 7.1, byl získán korelační součinitel $\beta_{R_m} = 0,148$, který je nižší přibližně o 20 %, než který uvádí norma ČSN EN 10371 [49]. Teno výsledek může být zapříčiněn špatným rozměrem tloušťky $h_0 = 0,45$ mm, který má být dle výše zmíněné normy vyšší o 0,05 mm. Z korelace $R_{p0,2}$ nebylo možné určit součinitel $\beta_{R_{p0,2}}$ i přes to, že jsme nahradili sílu F_e experimentálně zjištěnou silou $F_{h/100}$, jelikož z tahových zkoušek nebylo možné vyhodnotit jak $R_{p0,2}$, tak $R_{p0,1}$.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývala miniaturizací zkušebních těles a příslušnými mechanickými zkouškami. V teoretické části byl popsán základní princip metody kinetické studené depozice. Dále se řešerše zabývala konvenčními mechanickými zkouškami, konkrétně se jednalo o zkoušku tahem a zkoušku ohybem. V neposlední řadě se řešerše zaměřuje na miniaturizaci zkušebních těles, měření deformace na malých a miniaturních zkušebních tělesech a zkoušky prováděné na malých a miniaturních zkušebních vzorcích. Experimentální část se zabývá zkoušením malých a miniaturních těles z materiálu připravených vysokotlakou kinetickou studenou depozicí – CS AA 7075 a to tahem, ohybem, small punch testem, korelací výsledků ze small punch testu a fraktografií lomových ploch. Na základě metalografické analýzy, analýz výsledků zkoušek tahem, ohybem a small punch testem na malých a miniaturních vzorcích, spolu s určením korelační závislosti výsledků ze small punch testu a fraktografie lomových ploch, lze vyvodit následující závěry:

- Metalografická analýza experimentálního materiálu AA 7075, připraveného vysokotlakou kinetickou studenou depozicí bez následného tepelného zpracování, dokázala přítomnost typické mikrostruktury s pórovitostí 1,06 %.
- Analýza tahových zkoušek poukazuje na jistou míru anizotropie materiálu ve směrech kolmých a podélných vůči trajektorii trysky, ovšem analýza zároveň dokazuje, že zmenšení rozměrů nemělo vliv na vyhodnocení zkoušky.
- Analýza ohybových zkoušek dokázala relativní plasticitu experimentálního materiálu AA 7075, která se projevila změnou lineární charakteristiky na konci ohybových křivek, ovšem stejně jako u tahových zkoušek miniaturizace zkušebních těles nevedla k potřebě užití korelačních koeficientů.
- Získání korelačního koeficientu β_{R_m} z korelace mezi R_m a F_m , který byl odlišný od deklarovaného korelačního koeficientu v normě ČSN EN 10371 dokazuje, že norma nezahrnuje dostatečně velké spektrum materiálů pro určení korelačního koeficientu a bylo by vhodné dostupné portfolio materiálů a korelačních koeficientů rozšířit.
- Fraktografickou analýzou bylo zjištěno šíření trhliny po hranicích jednotlivých deformovaných částic (splatů), tedy po kritickém místě. Lomy jsou z energetického hlediska nestabilní/křehké a z hlediska mikromechanismů porušování štěpné.
- Všechny provedené analýzy mechanických zkoušek i fraktografie jednoznačně poukazují na křehkost materiálu hliníkové slitiny AA 7075 v tepelně nezpracovaném stavu v důsledku nedostatečných adhezivních a kohezních pevností mezi jednotlivými částicemi a pórovitosti. Hranice mezi jednotlivými deformovanými částicemi (splaty) jsou poté kritickými místy, kde indukuje trhlina, která může vést k defektu součásti/zařízení.
- Navrhují tedy následné tepelné zpracování, popřípadě užití metody HIP (Hot Isostatic Pressing) pro zhouževnatění materiálu, nárůstu pevnostních charakteristik v důsledku precipitace a lepšímu propojení jednotlivých zdeformovaných částic (splatů) napříč sebou.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BENEŠ, Petr. *Aditivní technologie v automobilovém průmyslu* [online]. 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/211822>
- [2] VTÍPIL, Jaroslav. Průmyslové spektrum. *Průmyslové spektrum* [online]. 2018, **2018**(4), 4. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-nejen-v-leteckem-prumyslu>
- [3] PAPYRIN, Anatolii. *Cold spray technology*. 1st ed. Amsterdam: Amsterdam : Elsevier, 2007.
- [4] BRUS, A, M DONOVALOVÁ a Š NOVOTNÝ. *Bernulliho rovnice a její aplikace* [online]. 2009. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2008-2009/Zima08/proc/bernuli.pdf>
- [5] CHEN, Xi, Xiao BAI, Chaonan FAN, Shaocheng GE, Cunbao DENG a Guoliang MA. Experimental investigation of atomization characteristics of sonic blasting nozzle based on De-Laval dynamics. *Energy* [online]. 2024, **297**, 131188. ISSN 0360-5442. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131188](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131188)
- [6] STEENKISTE, Thomas. Kinetic Spray: A New Coating Process. *Key Engineering Materials - KEY ENG MAT* [online]. 2001, **197**, 59–86. Dostupné z: [doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.197.59](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.197.59)
- [7] MATIASH, Dmytro. *Opravy kontaktních ploch součástí pomocí technologie studené kinetizace* [online]. 2020. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/191820>
- [8] OMAR, Noor irinah, Motohiro YAMADA, Toshiaki YASUI a Masahiro FUKUMOTO. Bonding Mechanism of Cold-Sprayed TiO₂ Coatings on Copper and Aluminum Substrates. *Coatings* [online]. 2021, **11**(11). ISSN 2079-6412. Dostupné z: [doi:10.3390/coatings11111349](https://doi.org/10.3390/coatings11111349)
- [9] ASSADI, Hamid, Frank GÄRTNER, Thorsten STOLTENHOFF a Heinrich KREYE. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia* [online]. 2003, **51**(15), 4379–4394. ISSN 1359-6454. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X)
- [10] MAEV, Roman a Volf LESHCHYNSKY. Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray: Physics & Technology. *Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray: Physics & Technology* [online]. 2008, 1–234. ISSN 9783527406593. Dostupné z: [doi:10.1002/9783527621903](https://doi.org/10.1002/9783527621903)
- [11] BUČEK, Tomáš. *Zhodnocení technologie studené kinetické depozice (Cold Spray)* [online]. 2022. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/204909>
- [12] IRISSOU, Eric, Jean-Gabriel LEGOUX, Anatoly RYABININ a B JODOIN. Review on Cold Spray Process and Technology: Part I - Intellectual Property. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2008, **17**. Dostupné z: [doi:10.1007/s11666-008-9203](https://doi.org/10.1007/s11666-008-9203)
- [13] GRUJICIC, M, C L ZHAO, C TONG, W S DEROSSET a D HELFRITCH. Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials*

- Science and Engineering: A* [online]. 2004, **368**(1), 222–230. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.312>
- [14] LI, Chang-Jiu, Hong-Tao WANG, Q ZHANG, Guan-Jun YANG, Wenya LI a Hanlin LIAO. Influence of Spray Materials and Their Surface Oxidation on the Critical Velocity in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2010, **19**, 95–101. Dostupné z: doi:[10.1007/s11666-009-9427-x](https://doi.org/10.1007/s11666-009-9427-x)
- [15] ALKHIMOV, Anatoly P, Anatoly N PAPYRIN, Vladimir F KOSAREV, Nikolai I NESTEROVICH a Mikahil M SHUSHPANOV. *GAS - DYNAMIC SPRAYING METHOD FOR APPLYING A COATING* [online]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/92/16/7f/93e032d9041894/US5302414.pdf>
- [16] *Opravy vysokopevnostních ocelí pomocí technologie studené kinetizace* [online]. 2020. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=217770
- [17] SCHMIDT, Tobias, Hamid ASSADI, Frank GÄRTNER, Horst RICHTER, Thorsten STOLTENHOFF, Heinrich KREYE a Thomas KLASSEN. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2009, **18**(5), 794–808. ISSN 1544-1016. Dostupné z: doi:[10.1007/s11666-009-9357-7](https://doi.org/10.1007/s11666-009-9357-7)
- [18] *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 3: Zkušební metoda za nízké teploty ČSN EN ISO 6892-3*. 2015
- [19] *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty ČSN EN ISO 6892-2*. 2018
- [20] *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty ČSN EN ISO 6892-1*. 1. vydání. 2020
- [21] ASTM A370: Mechanical Testing of Steel Products Instron. In: *ibertest* [online]. 2014. Dostupné z: https://www.ibertest.es/wp-content/uploads/2014/01/Probetas_mecanizadas.jpg
- [22] *Zkouška tahem: studijní opora předmětu Nauka o materiálu vyučovaného v kombinovaném bakalářském studiu* [online]. 2002. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/Tahovka.pdf>
- [23] BÁRTKOVÁ, Denisa. *VYSOKOCYKLOVÁ ÚNAVA TITANOVÉ SLITINY Ti6Al4V* [online]. Brno, 2013. b.n. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65907
- [24] PRUDÍKOVÁ, Alena. *Struktura a únavové vlastnosti vybrané titanové slitiny* [online]. 2014. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85301
- [25] BOHUMIL, Vlach. Pružnost. In: *Podklady pro ZS 2023/2024: Mezní stavy materiálů 6MS* [online]. nedatováno. Dostupné z: https://umvi.fme.vutbr.cz/wp-content/themes/umvi_website/assets/materials/winter/6MS/00-Plasticita.pdf

- [26] LOUDA, P a D ODEHNÁLOVÁ. Vlastnosti kovů a jejich zkoušení. In: [online]. 2017. Dostupné z: https://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/NOM%20I.htm
- [27] CLELLAND, Dustin T, Ethan K NICKERSON a Daniel R MERKEL. Direct measurement and calculation of rubber bulk modulus by piston-cylinder method using conventional mechanical testing equipment. *Polymer Testing* [online]. 2023, **125**, 108135. ISSN 0142-9418. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108135](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108135)
- [28] MOSCATELLI, Eduardo, Luís F N SÁ, Hélio EMMENDOERFER a Emílio C N SILVA. Pure-displacement formulation and bulk modulus propagation for topology optimization with pressure loads. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2023, **411**, 116058. ISSN 0045-7825. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116058](https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116058)
- [29] *Kovové materiály - Zkouška ohybem ČSN EN ISO 7438*
- [30] *Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility ASTM E290-22* [online]. 2022. Dostupné z: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/113199/9d7a9ad1d7704d8d8ea3f5c82fdf9193/ASTM-E290-22.pdf>
- [31] *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem ČSN EN ISO 5173*. 2023
- [32] *Zkoušení svarových spojů polotovarů z termoplastů - Část 1: Zkouška ohybem ČSN EN ISO 12814-1*. 2001
- [33] *TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ - OHÝBÁNÍ* [online]. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm
- [34] *MTS* [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.mts.com>
- [35] *EpsilonTech* [online]. 2024. Dostupné z: <https://www.epsilontech.com>
- [36] Miniature Axial Extensometers – Model 3442. In: *epsilonTech* [online]. nedatováno. Dostupné z: https://www.epsilontech.com/wp-content/uploads/2016/07/low-profile_extensometer-Model_3442-with_model_holding.jpg
- [37] WOZNIAK, Jan a DRÁPAL. *Kovové materiály - Kalibrace průběhových systémů používaných při zkoušení jednoosým zatížením ČSN EN ISO 9513*. 1. vydání. 2013
- [38] laserXtens 2-120 HP/TZ. In: *zwickroell* [online]. nedatováno. Laser extensometr. Dostupné z: https://www.zwickroell.com/zrmedia/_processed_/1/8/csm_CTA210318_TVM1453433_laserxtens-2-120-hp-tz-mit-hochtemperatur-ofen_422484b816.png
- [39] LAVISION. In: *DIC-DVC* [online]. nedatováno. Techniques - dic-dvc. Dostupné z: https://www.lavision.de/cms_images/techniques/strainevaluation.png?m=1477655154
- [40] Aramis. In: *trillion* [online]. nedatováno. 3D Aramis DIC system. Dostupné z: <https://www.trillion.com/aramis>

- [41] KUMAR, Kundan, Arun POOLEERY, K MADHUSOODANAN, R N SINGH, J K CHAKRAVARTTY, B K DUTTA a R K SINHA. Use of Miniature Tensile Specimen for Measurement of Mechanical Properties. *Procedia Engineering* [online]. 2014, **86**, 899–909. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.112>
- [42] *Výsledky prezentované na ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. 2015
- [43] DŽUGAN, Jan, Zbysek NOVY, Pavel KONOPIK a Petr MOTYČKA. IMPROVEMENT OF FATIGUE PROPERTIES OF 34CRNIMO6 STEEL BY CONTROLLED THERMOMECHANICAL TREATMENT. nedatováno.
- [44] DŽUGAN, Jan, Pavel KONOPIK, Radek PROCHÁZKA a Zuzanka TROJANOVÁ. SPD Processed Materials Mechanical Properties Determination with the Use of Miniature Specimens. *Materials Science Forum* [online]. 2017, **879**, 471–476. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:[10.4028/www.scientific.net/MSF.879.471](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.471)
- [45] PROCHÁZKA, R, J DŽUGAN a M KÖVÉR. Miniature specimen tensile testing of AZ31 alloy processed by ECAP. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2015, **76**(2), 134–139.
- [46] VOLÁK, Josef. *Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise* [online]. 2014. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/14960>
- [47] DYMÁČEK, Petr, Milan JARÝ, Ferdinand DOBEŠ a Luboš KLOC. Tensile and Creep Testing of Sanicro 25 Using Miniature Specimens. *Materials* [online]. 2018, **11**(1). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:[10.3390/ma11010142](https://doi.org/10.3390/ma11010142)
- [48] ZHANG, Lintao, Will HARRISON, Mazher A YAR, Stephen G R BROWN a Nicholas P LAVERY. The development of miniature tensile specimens with non-standard aspect and slimmness ratios for rapid alloy prototyping processes. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2021, **15**, 1830–1843. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.029>
- [49] *Kovové materiály - Metoda penetrační SP zkoušky ČSN EN 10371*. 1. vydání. 2021
- [50] FU, M W a W L CHAN. Geometry and grain size effects on the fracture behavior of sheet metal in micro-scale plastic deformation. *Materials & Design* [online]. 2011, **32**(10), 4738–4746. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.039>
- [51] RAULEA, L V, A M GOIJAERTS, L E GOVAERT a F P T BAAIJENS. Size effects in the processing of thin metal sheets. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2001, **115**(1), 44–48. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00770-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00770-1)
- [52] LEJČEK, Pavel. *Grain boundary segregation in metals*. Berlin: Springer, nedatováno. ISBN 978-3-642-12504-1.
- [53] KIM, Ji Hoon, Guiyoung GU, Min-Hyeok KWON, Minseo KOO, Eun-Young KIM, Jin-Kyung KIM, Jae Sang LEE a Dong-Woo SUH. Microstructure and tensile properties of

- chemically heterogeneous steel consisting of martensite and austenite. *Acta Materialia* [online]. 2022, **223**, 117506. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117506>
- [54] KIM, Seong-Jae, Hyeon-Gyu MIN, Jun-Hyub PARK a Dong-Joong KANG. Application of deep learning method for time reduction and precision improvement in displacement measurement during in-situ SEM tensile test. *Measurement* [online]. 2024, **234**, 114769. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114769>
- [55] MOTZ, C, D WEYGAND, J SENGER a P GUMBSCH. Micro-bending tests: A comparison between three-dimensional discrete dislocation dynamics simulations and experiments. *Acta Materialia* [online]. 2008, **56**(9), 1942–1955. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.12.053>
- [56] PAIVA LEÃO, Pablo Bruno, João RODRIGUES DE BARROS NETO, Samuel Filgueiras RODRIGUES, Maria Veronica GONCALVES RODRIGUES, João Victor BARROSO XAVIER, Tiago Nunes LIMA, Gedeon Silva REIS, Antonio J RAMIREZ a Hamilton Ferreira G DE ABREU. In-situ and interrupted cyclic three-point bending tests in SEM of two pearlitic steel microstructures: Lamellar and partially spheroidized. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2024, **28**, 2990–3012. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.169>
- [57] WANG, Yachun, Xiang LIU, Daniel J MURRAY, Fei TENG, Wen JIANG, Mukesh BACHHAV, Laura HAWKINS, Emmanuel PEREZ, Cheng SUN, Xianming BAI, Jie LIAN, Colin D JUDGE, John H JACKSON, Robert G CARTER a Lingfeng HE. Measurement of grain boundary strength of Inconel X-750 superalloy using in-situ micro-tensile testing techniques in FIB/SEM system. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2022, **849**, 143475. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143475>
- [58] MATOCHA, Karel. *Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra materiálového inženýrství, 2010. ISBN 978-80-248-2223-5.
- [59] BŘEZINA, Martin a Ludovít KUPČA. MOŽNOSTI VYUŽITIA SYSTÉMU NA ODBER MALÝCH VZORIEK Z PREVÁDZKOVANÝCH ZARIADENÍ PRI HODNOTENÍ VLASTNOSTÍ MATERIÁLOV. *Chemické Listy*. 2011, **2011**(105), s167–s170.
- [60] EDIDIN, Avram A. 38 - Development and Application of the Small Punch Test to UHMWPE. In: Steven M KURTZ, ed. *UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition)* [online]. Oxford: William Andrew Publishing, 2016, s. 739–752. ISBN 978-0-323-35401-1. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35401-1.00038-7>
- [61] *Scoop Sampling - Rolls-Royce* [online]. 1. vydání. 2010. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/scoop-sampling-tcm92-50918.pdf>

- [62] ARUNKUMAR, S. Overview of Small Punch Test. *Metals and Materials International* [online]. 2020, **26**(6), 719–738. ISSN 2005-4149. Dostupné z: doi:10.1007/s12540-019-00454-5
- [63] RASCHE, Stefan a Meinhard KUNA. Improved small punch testing and parameter identification of ductile to brittle materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2015, **125**, 23–34. ISSN 0308-0161. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2014.09.001
- [64] ARUNKUMAR, S. Small Punch Creep Test: An Overview. *Metals and Materials International* [online]. 2021, **27**(7), 1897–1914. ISSN 2005-4149. Dostupné z: doi:10.1007/s12540-020-00783-w
- [65] *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda ČSN EN ISO 148-1*. 3. vydání. 2017
- [66] *Skúšenie kovov - LOMOVÁ HÚŽEVNATOSŤ KOVOV PRI STATICKOM ZAŤAŽENÍ ČSN 42 0347*. 1. vydání. 1991
- [67] GARCÍA, T E, C RODRÍGUEZ, F J BELZUNCE a C SUÁREZ. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2014, **582**, 708–717. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.009
- [68] HURST, Roger a K MATOCHA. Experiences with the European Code of Practice for Small Punch Testing for Creep, Tensile and Fracture Behaviour. *SSTT 2014*. 2014, 1–26.
- [69] WANG, Zhao-Xi, Hui-Ji SHI, Pan SHI a Xianfeng MA. Small Punch Testing for Assessing the Fracture Properties of the Reactor Vessel Steel with Different Thicknesses. *Nuclear Engineering and Design - NUCL ENG DES* [online]. 2008, **238**, 3186–3193. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2008.07.013
- [70] BUDZAKOSKA, E, D CARR, P STATHERS, Huijun LI, Robert HARRISON, Alan HELLIER a W YEUNG. Predicting the J integral fracture toughness of Al 6061 using the small punch test. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* [online]. 2007, **30**, 796–807. Dostupné z: doi:10.1111/j.1460-2695.2007.01153.x
- [71] MAO, Xinyuan a Hideaki TAKAHASHI. Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk (\varnothing 3 mm) small punch tests. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1987, **150**(1), 42–52. ISSN 00223115. Dostupné z: doi:10.1016/0022-3115(87)90092-4
- [72] *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda ČSN EN ISO 6507-1*. 5. vydání. 2024
- [73] ROKNI, M R, C A WIDENER, V K CHAMPAGNE, G A CRAWFORD a S R NUTT. The effects of heat treatment on 7075 Al cold spray deposits. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2017, **310**, 278–285. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.064

- [74] REN, Yupeng, Naeem ul Haq TARIQ, Hanhui LIU, Lijia ZHAO, Xinyu CUI, Yanfang SHEN, Jiqiang WANG a Tianying XIONG. Study of microstructural and mechanical anisotropy of 7075 Al deposits fabricated by cold spray additive manufacturing. *Materials & Design* [online]. 2021, **212**, 110271. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110271>
- [75] JUDAS, Jakub, Josef ZAPLETAL, Lukáš ŘEHOŘEK a Vít JAN. Effects of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of cold sprayed AA7075. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2023, **43**, 160–165. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.252>
- [76] BOBZIN, K, W WIETHEGER, J HEBING a L GERDT. Softening Behavior of Cold-Sprayed Aluminum-Based Coatings AA1200 and AA7075 During Annealing. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2021, **30**(1), 358–370. ISSN 1544-1016. Dostupné z: doi:[10.1007/s11666-020-01121-7](https://doi.org/10.1007/s11666-020-01121-7)
- [77] TAJALLY, Mohammad, Zainul HUDA a H H MASJUKI. Effect of Cold Rolling on Bending and Tensile Behavior of 7075 Aluminum Alloy. *Journal of Applied Sciences* [online]. 2009, **9**. Dostupné z: doi:[10.3923/jas.2009.3888.3893](https://doi.org/10.3923/jas.2009.3888.3893)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Veličina	Jednotka
DE	Účinnost depozice	%
m_s	Hmotnost naneseného povlaku	kg
M_p	Hmotnost prášku	kg
V_{krit}	Kritická rychlost částic	m/s
V_{crit}	Kritická rychlost částic	m/s
V_c	Kritická rychlost částic	m/s
ρ	Objemová hustota prachových částic	kg/m ³
T_m	Teplota tavení materiálu	°C
T_i	Teplota částic při dopadu na substrát	°C
σ_u	Pevnost práškové částice	MPa
F_1, F_2	Kalibrační koeficient	-
σ_{TS}	Mez kluzu v tahu	MPa
C_p	Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	J/kg·K
T_R	Referenční teplota okolí	K
V_e	Erozivní rychlost částic	m/s
R_m	Pevnost v tahu	MPa
R_e	Pevnost na mezi kluzu	MPa
σ	Normálové napětí	MPa
E	Youngův modul pružnosti	MPa
ε	Poměrné prodloužení	-
S_0	Počáteční plocha příčného průřezu	mm ²
k	Poměrný koeficient	-
a_0	Počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa	mm
b_0	Počáteční šířka plochého zkušebního tělesa	mm
L_0	Počáteční délka	mm
L_c	Zkoušená délka	mm

L_t	Celková délka zkušebního tělesa	mm
L_u	Konečná délka po lomu	mm
D_u	Zúžený průměr po lomu	mm
F	Tahová síla	N
ΔL	Délková změna	mm
R_{eH}	Horní mez kluzu	MPa
R_{eL}	Dolní mez kluzu	MPa
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	MPa
A	Tažnost	%
Z	Kontrakce	%
G	Modul pružnost ve smyku	MPa
$K(B)$	Objemový modul (bulk modulus)	MPa
μ	Poissonův poměr	-
τ	Smykové napětí	MPa
γ	Zkos	rad
V	Objem	m ³
P	Tlak	Pa
ε_x	Deformace ve směru osy x	-
ε_y	Deformace ve směru osy y	-
ε_z	Deformace ve směru osy z	-
L	Délka zkušebního tělesa	mm
ϕD	Průměr ohybového trnu	mm
α	Úhel ohybu	°
l	Vzdálenost mezi podpěrami pro zkoušku ohybem	mm
R_{mo}	Mez pevnosti v ohybu	MPa
F_{max}	Maximální ohybová síla	N
b	Šířka vzorku	mm
h	Výška vzorku	mm

ε_f	Tahové deformace vyjádřené z ohybové zkoušky	-
D	Deflexe v ohybu	mm
y	Průhyb v ohybu	mm
J_0	Kvadratický moment průřezu	mm ⁴
A_g	Rovnoměrná tažnost	-
R_a	Drsnost povrchu	μm
R	Poloměr razníku pro SPT	mm
E_{SP}	Energie penetrační zkoušky	J
F_i	Síla na počátku plastické nestability	N
F_m	Síla maximální penetrační zkoušky	N
F_e	Síla elasticko-plastického přechodu	N
v	Posunutí pro SPT	mm
u	Deflexe pro SPT	mm
v_e	Posunutí na mezi elasticko-plastického přechodu	mm
u_e	Deflexe na mezi elasticko-plastického přechodu	mm
v_i	Posunutí na počátku meze plastické nestability	mm
u_i	Deflexe na počátku meze plastické nestability	mm
β_{R_m}	Korelační součinitel meze pevnosti	-
$\beta_{R_{p0,2}}$	Korelační součinitel meze kluzu	-
F_u	Síla pro deflexi	mm
F_v	Síla pro posunutí	mm
K_{IC}	Lomová houževnatost při rovinné deformaci	MPa·m ^{1/2}
T	Teplota měření	°C, K
T_{CVN}	Charpyho přechodová teplota	°C, K
J_{IC}	Lomová houževnatost z J-integrálu	N/mm
ε_f	Efektivní lomová houževnatost pro zkoušku SPT	N/mm
δ_{IC}	Lomová houževnatost v místě trhliny	mm
$F_{h/100}$	Síla odpovídající hodnotě offsetu h/100 – zkouška SPT	N

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Celý název
<i>FDM</i>	Fused Deposition Modeling
<i>SLM</i>	Selective Laser Melting
<i>DED</i>	Directed Energy Deposition
<i>CS</i>	Cold Spray
<i>ITAM</i>	Institute of Theoretical and Applied Mechanics
<i>RAS</i>	Russian Academy of Sciences
<i>LPCS</i>	Low Pressure Cold Spray
<i>HPCS</i>	High Pressure Cold Spray
<i>DIC</i>	Digital Image Correlation
<i>ESP</i>	Electronic Speckle-pattern Interferometry
<i>CCD</i>	Charge-Coupled Device
<i>MIT</i>	Massachusetts Institute of Technology
<i>SPT</i>	Small Punch Test
<i>SPC</i>	Small Punch Creep Test
<i>LVDT</i>	Linear Variable Differential Transformer
<i>SEM</i>	Skenovací elektronický mikroskop
<i>FIB</i>	Focused Ion Beam
<i>GDOES</i>	Glow-Discharge Optical Emission Spectrometry
<i>HV</i>	The Vickers Hardness
<i>L</i>	Longitudinální
<i>T</i>	Transverzální
<i>HIP</i>	Hot Isostatic Pressing

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1 - Geometrický model Lavalovy dýzy [5].....	4
Obrázek 2-2 - SEM obrázek první vrstvy Cold Spray nástřiku na a, čistě měděný substrát C1020 a b, čistě hliníkový substrát AA1050 [8].....	5
Obrázek 2-3 - Schéma zařízení pro LPCS původně [10], upraveno [11].....	6
Obrázek 2-4 - Schéma zařízení pro HPCS původně [10], upraveno [11]	7
Obrázek 2-5 - Graf závislosti kritické síly deponovaných částic na účinnosti deponování, nástřik prášek – Cu na substrát – nízkouhlikovou ocel [17], upraveno [7]	8
Obrázek 4-1 - Různé typy zkušebních těles pro zkoušku tahem [21]	10
Obrázek 4-2 - Schéma ohýbacího přípravku s dvěma podpěrami a trnem (tříbodový ohyb) [29]	13
Obrázek 4-3 - Schéma rozložení a velikosti na ohybem zatěžovaném tělese [33].....	14
Obrázek 5-1 - Miniaturní extenzometr model 3442 od firmy Epsilon technology corp [36].	15
Obrázek 5-2 - Laserový extenzometr LaserXtens 2-120 HP/TZ od firmy ZwickRoell [38] .	16
Obrázek 5-3 - DIC posuv elementu, vektorové pole, deformační barevné zobrazení (upraveno) [39].....	17
Obrázek 5-4 - Duální kamerový systém DIC Aramis od firmy Trilion [40].....	18
Obrázek 6-1 - Překlad odběru miniaturních vzorků pro různé mechanické zkoušky [41]	19
Obrázek 6-2 - Komparace tahových křivek konvenčních velikostí vzorků a miniaturních velikostí vzorků [42]	20
Obrázek 6-3 - Geometrie a) plochého malého tahového vzorku, b) válcového malého tahového vzorku [42].....	21
Obrázek 6-4 - Geometrie malého tahového tělesa vyřezaného z disku [47]	21
Obrázek 6-5 – Porovnání konvenčních, malých a miniaturních tahových těles[48]	22
Obrázek 6-6 - Závislost tahového napětí a poměru N, tj. tloušťky vzorku vers. počtu zrn [50]	23
Obrázek 6-7 - Tahový stroj pro měření mikro tahových vzorků umístěný v SEM [54]	24
Obrázek 6-8 - Mikro ohybový vzorek SEM (BSE), úhel průhybu $16,7^\circ$ [55].....	25
Obrázek 6-9 – SEM zkouška tahem mikro tahových těles Inconel X-750, hodnocení pevnosti hranic zrn s precipitáty $M_{23}C_6$ [57]	26
Obrázek 7-1 - Zařízení s hemisférickou rotační hlavou pro odběr vzorku [59]	28
Obrázek 7-2 - a) Směry odběru vzorků [49], b) Schéma odběru vzorku po konkrétní příklad (endoprotéza kolene) [60]	29
Obrázek 7-3 - a) Razník s hemisférickým hrotem, b) Razník s kuličkou [62].....	30

Obrázek 7-4 - Razník s ostrým hrotem pro experimenty zjišťující mez pevnosti ve střihu [58]	30
Obrázek 7-5 - Křivka SPT penetrační zkoušky, typické materiály v jednotlivých zónách [63]	32
Obrázek 7-6 - Křivka SPT penetrační zkoušky Síla/Deflexe a ESP [49]	33
Obrázek 7-7 - SPC křivka posunutí/čas pro teplotu 750 °C, 235 N [64]	35
Obrázek 8-1 - Částice materiálu AA 7075 se satelitními částicemi ze SEM, zvětšení 500 krát, SEs (scondary electrons)	39
Obrázek 8-2 - Částice v řezu, leptáno Keller, ze SEM, zvětšení 1000 krát, SEs (scondary electrons)	39
Obrázek 8-3 - Vyhodnocení velikosti částic ze suché metody granulometrie	40
Obrázek 8-4 - Mikrostruktura nadeponovaných částí, leptáno Keller, světelný mikroskop, zvětšení 500 krát	41
Obrázek 8-5 - Schéma odběru malých tahových vzorků	42
Obrázek 8-6 - Tahové křivky malých zkušebních těles v obou odebíraných směrech T i L ..	43
Obrázek 8-7 - Ohybové křivky malých zkušebních těles – zkouška tříbodovým ohybem	45
Obrázek 8-8 - Schéma sestavy přípravku pro měření SPT zkoušek	46
Obrázek 8-9 - Křivky SPT penetračních zkoušek prováděných na standardních tělesech	47
Obrázek 8-10 - Kolmý pohled na zkušební vzorek As-built-2 penetrační zkoušky SPT ze SEM, zvětšení 20 krát, SEs (scondary electrons)	48
Obrázek 8-11 - Kolmý pohled na zkušební vzorek As-built-2 penetrační zkoušky SPT ze SEM, zvětšení 150 krát, SEs (scondary electrons)	48
Obrázek 8-12 - Boční pohled na zkušební vzorek As-built-2 penetrační zkoušky SPT ze SEM, zvětšení 500 krát, SEs (scondary electrons)	49
Obrázek 8-13 - Korelace mezi F_m z penetrační zkoušky a R_m z tahové zkoušky, korelační faktor $\beta R_m = 0,148$	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 7-1 – Rozměry, tolerance a drsnosti zkušebního tělesa [49]	27
Tabulka 7-2 - Hodnoty korelačního součinitele βRm v závislosti na geometrii SP penetrační zkoušky [49].....	36
Tabulka 7-3 - Hodnoty korelační koeficientu $\beta Rp0,2$ v závislosti na geometrii SP penetrační zkoušky [49].....	36
Tabulka 8-1 - Chemické složení prášku AA 7075 uvedeno v hmotnostních procentech	40
Tabulka 8-2 - Mikrotvrдость prášku HV 0,005	40
Tabulka 8-3 - Výsledky tahových zkoušek malých zkušebních těles	43
Tabulka 8-4 - Výsledky ohybových zkoušek malých zkušebních těles	44
Tabulka 8-5 - Výsledky penetračních zkoušek SPT standardních zkušebních těles	46