



Bakalářská práce

Deformační analýza nýtového spoje

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Petr Grosman

Vedoucí práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Deformační analýza nýtového spoje

<i>Jméno a příjmení:</i>	Petr Grosman
<i>Osobní číslo:</i>	S19000386
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Přehled technologií spojování plechů. Metody nýtování a jejich použití v průmyslové praxi.
2. Možnosti bezkontaktní analýzy deformace, základy fotogrammetrie.
3. Metody měření makro a mikro tvrdosti kovových materiálů.
4. Pro zvolenou kombinaci spojovaných materiálů (ocel – ocel, ocel – slitina Al) povést deformační analýzu nýtovaných spojů.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] DWIVEDI, DHEERENDRA KUMAR. FUNDAMENTALS OF METAL JOINING: processes, mechanism and performance. S.l.: SPRINGER, 2021. ISBN 9789811648182.
- [2] LUHMANN, Thomas, Stuart ROBSON a Stephen KYLE, ed. Close-range photogrammetry: principles, methods and applications. Dunbeath: Whittles, 2006. ISBN 978-1-870325-50-9.
- [3] ČSN EN ISO 6507-1 (420374) Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [4] ČSN EN ISO 6506-1 (420359) Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [5] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 30. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Název bakalářské práce

Deformační analýza nýtového spoje

Anotace

Předložená bakalářská práce se zabývá deformační analýzou nýtového spoje. V teoretické části jsou uvedeny možnosti rozebíratelných a nerozebíratelných spojů plechů, zkoušky tvrdosti a základy fotogrammetrie. Cílem praktické části je analyzování deformací vniklé zalisováním samoděrovacího nýtu, na které je nahlíženo ze dvou odlišných úhlů pohledu. V prvním případě je zjišťováno, jak se materiál deformuje v okolí nýtu na metalografickém výbrusu, zatímco v druhém případě naopak sledujeme deformaci – průhyb vzorku jako celku. Zkoušky byly prováděny na vzorcích kombinací materiálů ocel – ocel a ocel – hliník.

Klíčová slova: samoděrovací nýt, nýtový spoj, měření tvrdosti, rozebíratelné spoje, nerozebíratelné spoje, bezkontaktní měření deformace

Title of bachelor thesis

Deformation analysis of the rivet connection

Annotation

The presented bachelor thesis deals with the deformation analysis of a rivet connection. In the theoretical part the possibilities of demountable and non-demountable sheet metal joints, hardness tests and basics of photogrammetry are presented. The aim of the practical part is to analyse the deformation introduced by the pressing of a self-piercing rivet, which is viewed from two different points of view. In the first case, the deformation of the material in the vicinity of the rivet on the metallographic cut is investigated, while in the second case, on the contrary, we observe the deformation - the deflection of the sample as a whole. The tests were carried out on samples of steel-steel and steel-aluminium material combinations.

Keywords: self-tapping rivet, rivet joint, hardness measurement, demountable connections, non-demountable connections, non-contact strain measurement

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D, za odborné vedení, neocenitelné rady a ochotu věnovat čas konzultacím, které mi pomohly k dokončení mé závěrečné práce. Dále velké díky patří mé rodině a blízkým, kteří mi jsou po celou dobu studia obrovskou oporou.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	10
1 Úvod.....	12
2 Teoretická část.....	13
2.1 Rozebíratelná spojení.....	13
2.1.1 Šroubové spoje.....	13
2.1.2 Kolíkové spoje.....	14
2.1.3 Čepové spoje.....	15
2.1.4 Perové a klínové spoje.....	15
2.2 Nerozebíratelná spojení.....	16
2.2.1 Svařování.....	16
2.2.2 Pájení.....	19
2.2.3 Lepení.....	20
2.2.4 Nýtové spoje.....	22
2.3 Zkoušky tvrdosti.....	26
2.3.1 Zkoušky makrotvrdosti.....	27
2.3.1.1 Zkouška dle Brinella.....	27
2.3.1.2 Zkouška dle Vickerse.....	29
2.3.1.3 Zkouška dle Rockwella.....	30
2.3.2 Zkoušky mikrotvrdosti.....	32
2.4 Fotogrammetrie.....	35
2.4.1 Historie.....	35
2.4.2 Základní rozdělení fotogrammetrie.....	36
3 Praktická část.....	38
3.1 Určení vlastností použitých materiálů.....	39
3.1.1 Ocel DC05+ZE 75/75 BP.....	40
3.1.2 Ocel HX260BD+Z100MB.....	42
3.1.3 Slitina hliníku EN AW 6082.....	44
3.2 Příprava vzorků.....	46
3.2.1 Stříhání vzorků.....	46
3.2.2 Nýtování vzorků.....	47
3.3 Zkoumání deformace materiálu okolo nýtu.....	49
3.3.1 Příprava metalografického výbrusu.....	49
3.3.2 Měření mikrotvrdosti v okolí nýtu.....	52
3.3.3 Získání závislosti mezi tvrdostí a deformací.....	56

3.3.4	Určení deformace materiálu okolo nýtu	66
3.4	Zkouška rovinné deformace.....	68
3.4.1	Skenování povrchu	68
3.4.2	Srovnání naměřených deformací	71
4	Diskuze.....	73
5	Závěr.....	76
	Použitá literatura.....	77
	Seznam příloh.....	80

Seznam použitých zkratk a symbolů

<i>A</i>	Plocha vtisku	[mm ²]
<i>AW 6082</i>	Materiál EN AW 6082	[1]
<i>A_g</i>	Homogenní tažnost	[%]
<i>A_{80mm}</i>	Celková tažnost	[%]
<i>D</i>	Průměr intenteru	[mm]
<i>DC05</i>	Materiál DC05+ZE 75/75 BP	[1]
<i>d</i>	Průměr vtisku	[mm]
<i>F</i>	Zatěžující síla	[N]
<i>F₀</i>	Předběžné zatížení	[N]
<i>F₁</i>	Přídavné zatížení	[N]
<i>HB</i>	Tvrдость podle Brinella	[1]
<i>HK</i>	Tvrдость podle Knoop	[1]
<i>HR</i>	Tvrдость podle Rockwella	[1]
<i>HV</i>	Tvrдость podle Vickerse	[1]
<i>HV 0,1</i>	Mikrotvrдость podle Vickerse při zatížení 100g po dobu 5s	[1]
<i>HX260</i>	Materiál HX260BD+Z100MB	[1]
<i>K</i>	Materiálová konstanta	[1]
<i>l</i>	Vzdálenost od kraje vzorku	[mm]
<i>R</i>	Smluvní napětí	[MPa]
<i>R_m</i>	Smluvní mez pevnosti v tahu	[MPa]
<i>R_{p0,2}</i>	Smluvní mez kluzu	[MPa]
<i>t</i>	Doba zatěžování	[s]
<i>u</i>	Délka úhlopříčky vtisku	[mm]
<i>x</i>	Vzdálenost od trhliny	[mm]
<i>y</i>	Deformace – průhyb vzorku	[mm]
<i>α</i>	Vrcholový úhel jehlanu	[°]
<i>β</i>	Vedlejší vrcholový úhel jehlanu	[°]
<i>ε</i>	Poměrné prodloužení	[1]
<i>φ₁</i>	Skutečná deformace ve směru šířky vzorku	[1]
<i>φ₂</i>	Skutečná deformace ve směru tloušťky vzorku	[1]
<i>φ₃</i>	Skutečná deformace ve směru délky vzorku	[1]
<i>φ_i</i>	Intenzita deformace	[1]

$\varphi_{iAW6082}$	Intenzita deformace v materiálu AW 6082	[1]
φ_{iDC05}	Intenzita deformace v materiálu DC05	[1]
φ_{iHX260}	Intenzita deformace v materiálu HX260	[1]

1 Úvod

Nýtování je osvědčená a spolehlivá metoda spojování dvou nebo více kusů materiálů. Používá se již po staletí v různých aplikacích, včetně stavebnictví, stavbách lodí, automobilovém průmyslu a ve výrobě letadel.

Nýtování je proces, při kterém se kovový kolík nazývaný nýt vbitím umísťuje do předvrtaných otvorů v materiálu, obvykle plechu nebo nosníku. Následně se koncová část nýtu deformuje, čímž se zajistí spojení a držení dílů pohromadě. Jednou z prvních metod nýtování byla technika nýtování za tepla, kde se nejprve zahřál nýt na požadovanou tvářecí teplotu a poté se vložil do předvrtaného otvoru a zatloukl se kladivem, čímž došlo k jeho deformaci a vytvoření spoje. Výsledný spoj je velmi pevný a vydrží velké namáhání a vibrace.

Obecně došlo k lehkému úpadku technologie nýtování, ale i v dnešní době novějších a pokročilejších spojovacích technik si nýtování najde své uplatnění díky svým vlastnostem. Velká pevnost, spolehlivost, jednoduchost a možnost spojovat různé kombinace materiálů (například dřevo a kov) udržuje stále tuhle technologii v mnoha průmyslových odvětvích.

V teoretické části této bakalářské práce bude popsána problematika rozebíratelných a nerozebíratelných spojení plechů, měření tvrdosti a základy fotogrammetrie. V praktické části bude nahlíženo na spoj nýtem dvěma způsoby. Nejprve bude zjišťována deformace materiálu způsobená zalisováním nýtu na metalografickém výbrusu v jeho bezprostřední blízkosti. Druhý typ deformace bude zjištěn pomocí bezkontaktního měření deformace – průhybu vzorku, který vznikne vlivem zalisování samoděrovacích nýtů, na proužku snýtovaných plechů. Pro oba experimenty bude zvolena kombinace materiálů plechů ocel-ocel a ocel-hliník a na závěr dojde k vzájemnému porovnání naměřených výsledků.

2 Teoretická část

2.1 Rozebíratelná spojení

Jsou to taková spojení, které je možné opakovaně rozebírat a následně smontovávat bez poškození spojovaných a spojovacích částí. [1]

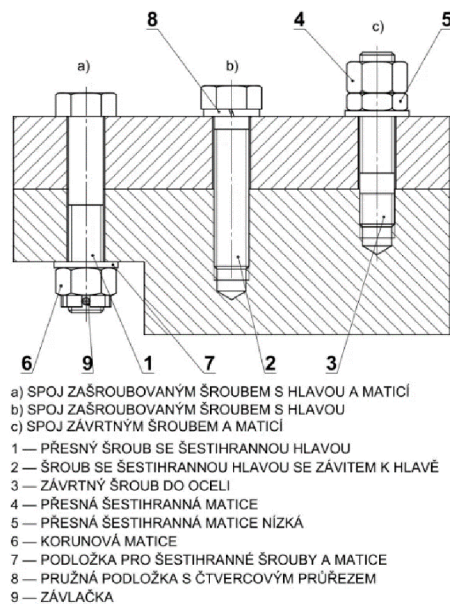
2.1.1 Šroubové spoje

Jedná se o rozebíratelné spojení dvou nebo více součástí díky silovému styku, který vzniká dotažením dříku-šroubu a matice k sobě. Šroubový spoj je zpravidla tvořen dvěma či více dílci opatřenými dírou/dírou se závitem, šroubem, maticí a podložkou. Veškeré rozměry a tvary šroubů a matic jsou normalizované.

Závity můžeme rozdělit podle funkce na závity spojovací a pohybové. Nejdůležitějším prvkem šroubu je vnější závit též šroubový závit. Hlavním prvkem matice je vnitřní závit též maticový závit. Závit je na spojující součást navinut ve tvaru šroubovice a můžeme ho dělit například podle druhu, smyslu stoupání, velikosti, rozteče.

Jednotlivé šrouby rozdělujeme podle rozměru (průměr, délka těla, délka závitu, tvar hlavy), druhu závitu, materiálu šroubu a pevnostních parametrů.

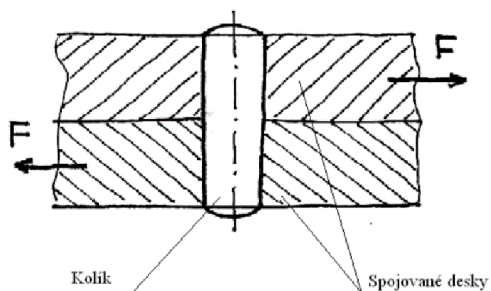
Nespornou výhodou šroubových spojení je, že šrouby, matice a i podložky jsou normalizované, tudíž jsou dle příslušné normy běžně k sehnání a je možné je jednoduše rozebrat a vyměnit. Mezi nevýhody můžeme označit nutnost pojištění spoje proti povolování, otvory pro šroub zmenšují namáhaný průřez a můžou v těchto místech vznikat hraniční hodnoty napětí s mezí pevnosti daného materiálu. [2, 3]



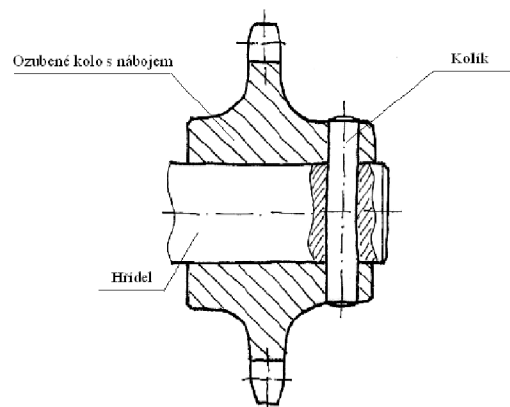
Obr. 1: Druhy šroubových spojů [4]

2.1.2 Kolíkové spoje

Spojovací kolíky se používají například na spojení dvou součástí, přesné vymezení polohy dvou na sebe dosedajících součástí nebo pojištění proti přetížení. Z důvodu velké jednoduchosti se jedná o nejstarší způsob spoje. Spojení vzniká na základě tvarového styku, kolík je montován do díry s přesahem, který způsobí předpětí. Tyto spoje se považují za rozebíratelné, ale účinnost klesá s opakovanou demontáží a následnou montáží. [5, 6]



Obr. 2: Konstrukce kolíkového spoje [7]

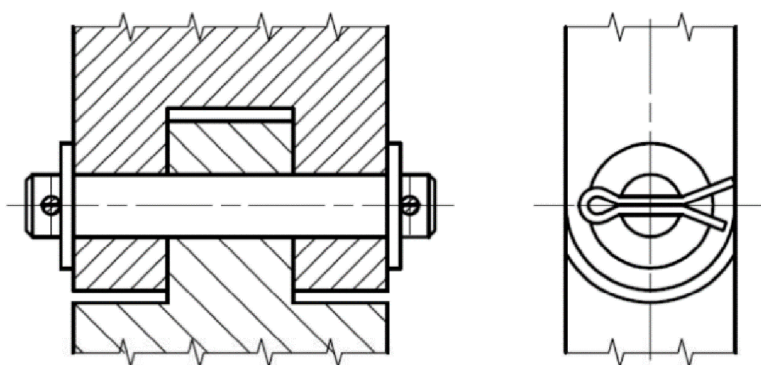


Obr. 3: Spojení ozubeného kola s hřídelí kolíkem [7]

Kolíky lze rozdělit podle namáhání na příčné, podélné a radiální nebo podle tvaru na válcové, kuželové, pružné a hřeby. Tyto tvary jsou normalizované a běžně k sehnání, což zjednodušuje případnou výměnu.[7, 8]

2.1.3 Čepové spoje

Čep si lze velmi jednoduše představit jako „tlustší“ válcový kolík, ale na rozdíl od kolíků jsou v součástech uloženy s vůlí, aby umožňovaly kloubový - rotační spoj. Rozdělují se na čepy hladké (bez otvorů, s otvory pro závlačky), čepy s hlavou (bez otvorů, s otvory pro závlačky, se závitovým koncem), duté a pružné. Až na výjimky jsou všechny čepy normalizované. [5]



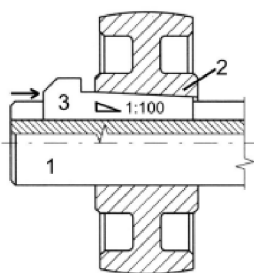
Obr. 4: Spoj vidlice a táhla hladkým čepem zajištěným závlačkami [9]

2.1.4 Perové a klínové spoje

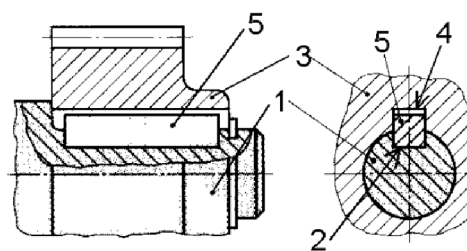
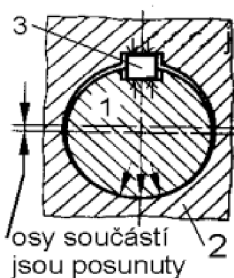
V obou případech je spojován hřídel s nábojem a vzniká rozebíratelné spojení. Při spoji perem se silové poměry přenáší přes boky pera, tudíž jde o tvarový styk. Při spoji klínem se silové účinky přenáší silovým stykem, protože klín je zaražen mezi hřídel a náboj.

Pera podle tvaru možno rozdělit na pera těsná, pera výměnná a pera úsečová (Woodruffovo). Klíny lze rozdělit podle způsobu přenosu momentu na drážkový klín, ploský klín a třecí klín. Tyto podélné klíny se vyrábí s nosem nebo bez, klíny s nosem se používají tam, kde není možné z druhé strany klín vyrazit (nos klínu se uchytí do kleští a vytáhne). Zmíněné tvary per a klínu jsou normalizované.

Velkou výhodou spoje klínem je pojištění proti osovému posunu, díky naražení klínu. Tato výhoda by nemusela být úplně výhodou, protože při větších otáčkách by se mohla projevit nesouosost hřídele a náboje házením. Z toho vyplývá, že pro větší otáčky raději volit spoj perem. [6, 10, 11]



1 - HŘÍDEL
2 - NÁBOJ
3 - KLÍN S NOSEM



1 - HŘÍDEL
2 - SLEPÁ DRÁŽKA V HŘÍDELI
3 - NÁBOJ
4 - PRŮCHOZÍ DRÁŽKA V NÁBOJI
5 - PERO

Obr. 5: Klínový spoj + řez spojem[12]

Obr. 6: Perový spoj + řez spojem[12]

2.2 Nerozebíratelná spojení

Jsou to taková spojení, které nelze rozebrat a složit bez vzájemného poškození spojovaných dílů. [1]

2.2.1 Svařování

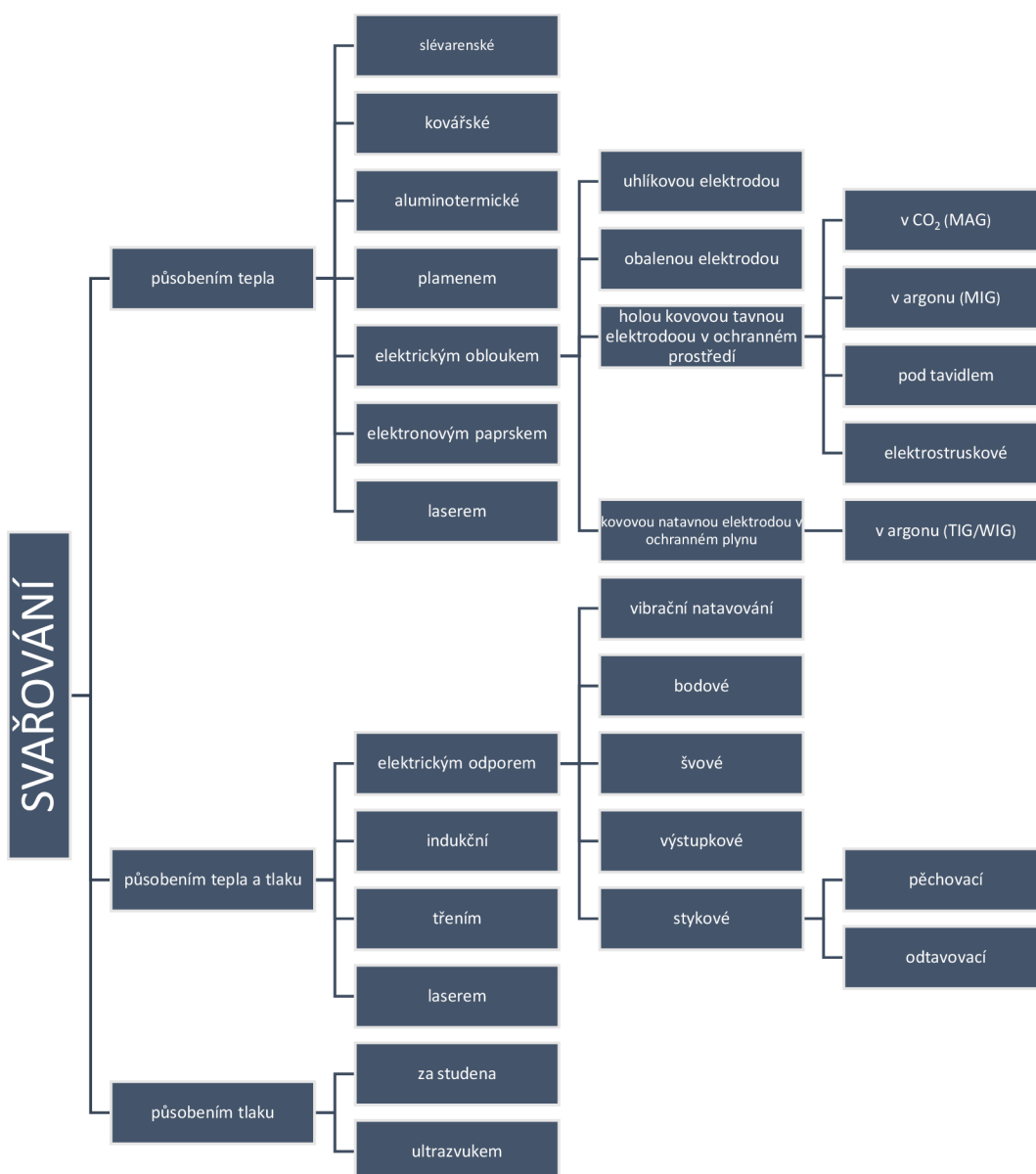
Při technologii svařování vznikají nerozebíratelné spojení, díky působení tepla, tlaku nebo kombinací obou způsobů. Dílům, které vznikly svařováním, se říká svařence nebo také svarky. Svařují se strojní součásti nebo velké konstrukce složené z jednoduchých dílů, hutních polotovarů (tyče, trubky, plechy, atd.), odlitků nebo výkovků. Svařujeme kovy stejných nebo podobných vlastností, ale je možné toutle technologií spojit i nekovové materiály. Svařováním optimalizujeme výrobu, protože dokážeme vyrobit složité konstrukce/celek svařením většího množství malých a snadno vyrobitelných dílů. Tato varianta bývá zpravidla cenově výhodnější, než vyrábět konečnou součást z jednoho kusu jinou technologií. [13]

Mezi výhody patří trvanlivost, pevnost a těsnost. Svařování jednoznačně zvyšuje produktivitu práce, zmenšuje spotřebu materiálu (proti odlitkům úspora až 50% materiálu), zjednodušuje konstrukci, významně snižuje výrobní časy. Velkou nevýhodou tohoto spoje je jeho nerozebíratelnost, změna mechanických vlastností a struktury vlivem vysokých teplot. Z důvodu těchto teplot vzniká v dílech také vnitřní pnutí, které však lze odstranit tepelným zpracováním. Ve svarech vznikají vnitřní vady, které snižují pevnost spoje. Je potřeba kvalifikovaných pracovníků, což se dá označit za nevýhodu. [13]

Rozdělení svařovacích metod:

Hlavním úkolem všech svařovacích metod je spojit materiály celistvým spojem, za působení dodávané energie, která překonává určitý termodynamický stav látky. Zmíněnou energii může být teplo (plasma, elektrický oblouk, plamen) – tavné svařování nebo plastická deformace (tření, kovářská činnost) – tlakové svařování. Během procesu svařování v materiálu probíhá velké množství chemických reakcí, díky kterým vznikne kvalitní svar.

[14]

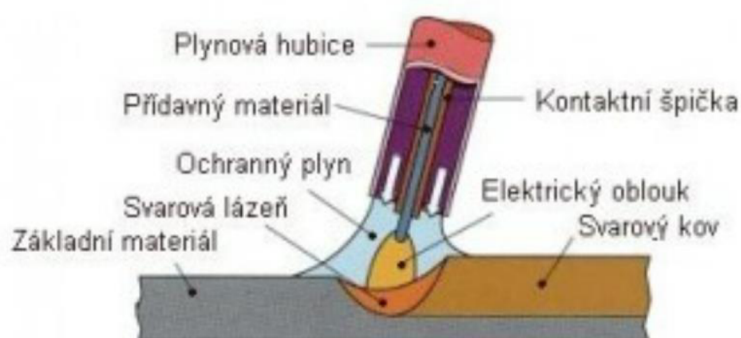


Obr. 7: Přehled a rozdělení svařovacích metod [13]

Svařování za působení tepla (tavné)

V tomto způsobu svařování dochází ke spojení místním natavením svarových ploch, bez použití tlaků nebo rázů, zpravidla se k tomu používá přídavný materiál, který má stejné nebo podobné složení jako základní materiál. Při natavování přídavného materiálu vzniká tavná/svarová lázeň. [15]

Při tavném svařování potřebné teplo vzniká například plamenem, plasmou, laserem nebo pomocí elektrického oblouku (obr. 8), který se vytvoří mezi svařovaným dílem a elektrodou. Při tomto druhu svařování se používá ochranná atmosféra pro svar, z důvodu, že roztavený kov reaguje s okolní atmosférou. Pro ochranu svarové lázně před účinky okolního prostředí se používá úmyslně dodávaný ochranný plyn (argon, helium, oxid uhličitý, kyslík) nebo tavidlo. Nečistoty odejdou ve formě strusky, která se odstraňuje ze svaru pomocí kladívka na strusku.[14]



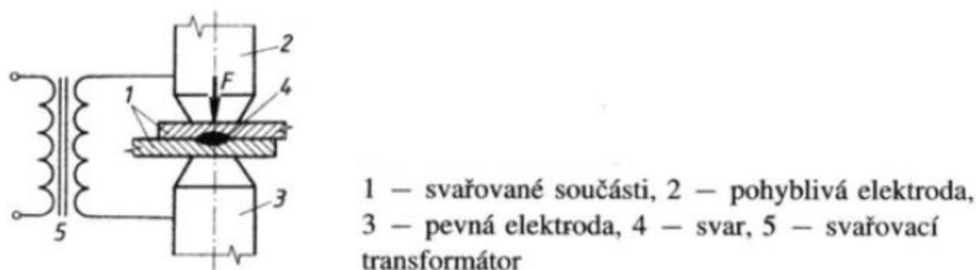
Obr. 8: Ukázka tavného svařování pomocí elektrického oblouku (MIG/MAG) [16]

Svařování za působení tlaku (tlakové)

Při této metodě svařování se spojované součásti k sobě přiblíží na vzdálenost, která odpovídá zhruba velikosti parametru krystalové mřížky. Spojení stykových ploch vznikne vlivem procesu difuze. Účinkem tohoto procesu se vytvoří vazby mezi hraničními mřížkami. [15]

Svařování za působení tepla a tlaku

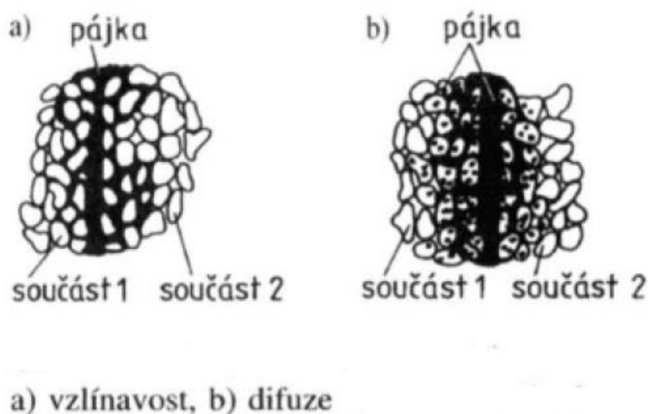
Při tomto druhu svařování se nejprve nataví stykové plochy spojovaných materiálů a následně se vyvodí potřebný tlak ke zhotovení spoje. [15]



Obr. 9: Bodové svařování [15]

2.2.2 Pájení

Pájení je definováno jako metalurgický proces, při kterém jsou spojovány součásti nebo polotovary nerozebíratelným spojem, kde pájka proniká do spojovaného materiálu nebo obvykle dochází k difuzi (obr. 10) a rozpouštění pájené plochy v tekuté pájce. Pomocí pájky (kov, který se nuceně roztaví z důvodu vytvoření spoje) je možné spojovat kovy stejného nebo rozdílného chemického složení. Na rozdíl od svařování nejsou stykové plochy natavené, ale jsou pouze smáčené použitou pájkou. Také teplota tání pájky je nižší, než teplota tání spojovaného materiálu. Pro kvalitní a pevný spoj je důležité dodržet pravidlo: Čím tenčí je mezivrstva pájky, tak tím bude větší pevnost. Tohle pravidlo platí i naopak. Druhým aspektem je, aby pájka měla dobrou zatékavost, vzlínavost, smáčivost a dostačující mechanické vlastnosti. [15]



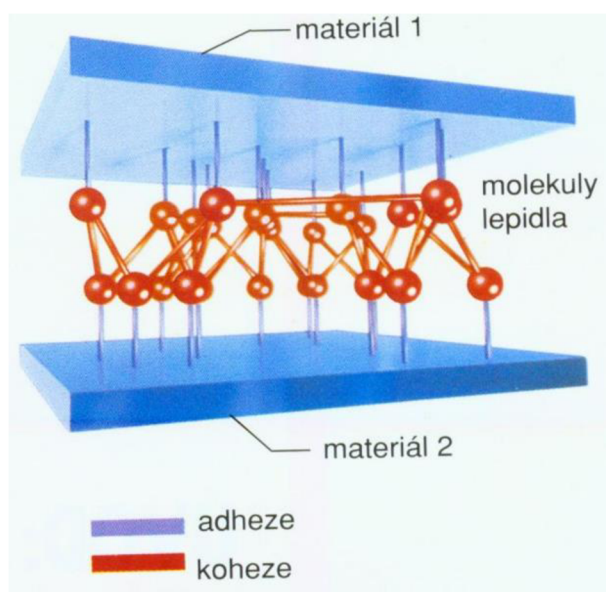
Obr. 10: Základní princip pájení [15]

Pájky se dělí podle teploty tání na měkké a tvrdé. Měkké pájky, teplota tání do 500 °C, jsou zpravidla cínové a jsou dodávány ve tvaru tyček s náplní tavidla. Těmito pájkami je možno vytvořit spoje o pevnosti v tahu přibližně v rozmezí 20 až 80 MPa a ve střihu zhruba do 40 MPa. Tvrdé pájky, teplota tání v rozmezí 500 – 1000 °C, obsahují příměsi slitin mědi, hliníku nebo stříbra. Tvrdými pájkami lze vytvořit spoj o pevnosti v tahu až 500 MPa. [15]

Jak bylo výše naznačeno, tak k pájení se používají tavidla v tekuté nebo tuhé formě. Tavidla jsou používány za účelem zabránění oxidace spoje, odstranění nečistot z pájených ploch a ke zlepšení vzlínivosti a smáčivosti pájky. [17]

2.2.3 Lepení

Spoje vzniklé lepením řadíme mezi nerozebíratelné spojení. Hlavní zastoupení mají tam, kde nelze použít například svařování, které nám vnese do spojovaných součástí nechtěné vnitřní pnutí a tepelné účinky. Lepení umožňuje spojovat různorodé materiály k sobě (kov s gumou, sklem, dřevem, keramikou). V dnešní době se začíná lepení vyrovnávat klasickým spojům svařením, nýtováním, pájením nebo spoji šrouby. Tloušťka vrstvy nanášeného lepidla mezi dvěma spojovanými součástmi by měla být v rozmezí 0,05 až 0,15 mm. Spoj vznikne za předpokladu, že lepidlo dobře přilne k materiálu (adheze) a bude mít dobrou soudržnost (kohezi) po vytvrzení. [8, 15]



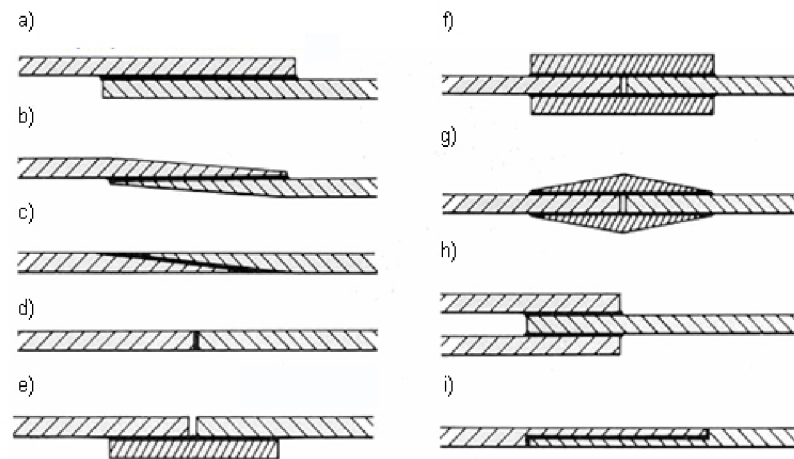
Obr. 11: Princip lepení [18]

Mezi výhody lepení jednoznačně patří:

- konstrukce není oslabena dírami pro šrouby
- možnost spojovat různorodé materiály
- těsnost lepených spojů proti plynům i kapalinám
- jednoduché docílení hladkých povrchů spoje
- nehrozí změna struktury materiálu vlivem vysokých teplot jako například u svařování

Mezi nevýhody patří:

- není možné slepit profily nebo plechy větších průřezů
- spoj ideálně namáhat pouze na smyk, potřeba úprav ploch pro slepení (obr. 12)
- nízká odolnost vůči vysokým teplotám [5]

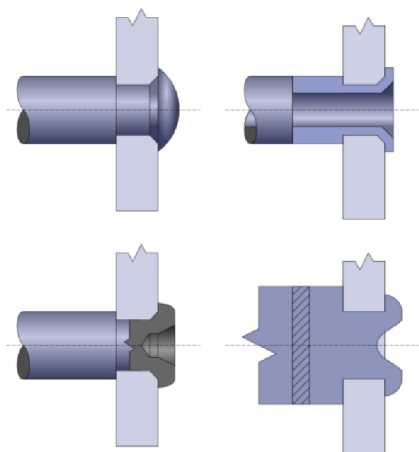


a) jednoduchý přeplátovaný spoj, b) zúžený přeplátovaný spoj, c) zkosený spoj,
d) tupý čelní spoj, e) přeplátovaný spojený pásem, f) dvojitě přeplátovaný spojený
pásem, g) dvojitě přeplátovaný spoj se zúženými pásy, h) dvojitě přeložený spoj,
i) stupňovitě přeložený spoj

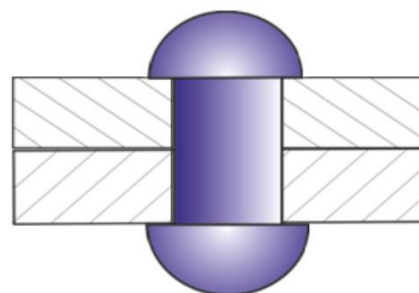
Obr. 12: Druhy lepených spojů [19]

2.2.4 Nýtové spoje

Při nýtování vzniká nerozebíratelné spojení dvou nebo více dílů. Tento spoj vzniká buď deformací části jedné ze spojovaných součástí, která je použita jako nýt (přímé nýtování) (obr. 13) nebo přetvořením normalizovaného nýtu mezi dvěma díly, které jsou zpravidla opatřeny dírou (nepřímé nýtování) (obr. 14). [5, 20]



Obr. 13: Příklady přímého nýtování [20]



Obr. 14: Nepřímý nýtový spoj [21]

Metoda nýtování je v dnešní době často vytlačována modernějšími technologiemi spojování jako například lepením nebo svařováním. Tato technologie má dnes největší uplatnění při spojování lehkých plechů a plechů s obtížnou svařitelností. Nýtování je hodně využíváno v leteckém průmyslu. [22]

Lze nýtovat ručně i strojně způsoby za tepla a za studena. Za studena je možno použít nýty do průměru 10 mm, jedná se o spoj tvarovým stykem. Při nýtování za využití tepla nýty ohřejeme na tvářecí teplotu následně provedeme samotný spoj a při následném zchladnutí se smrští, a tím dojde k zvětšení svěrné síly, jedná se o spoj silovým stykem. [23]

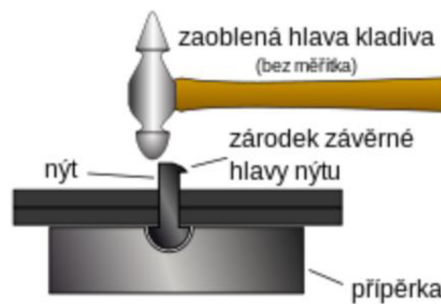
Mezi výhody nýtování patří:

- spojované materiály nejsou tepelně ovlivněny (nedochází ke změně mechanických vlastností a struktury)
- malé náklady
- spojování různých materiálů

Mezi nevýhody patří:

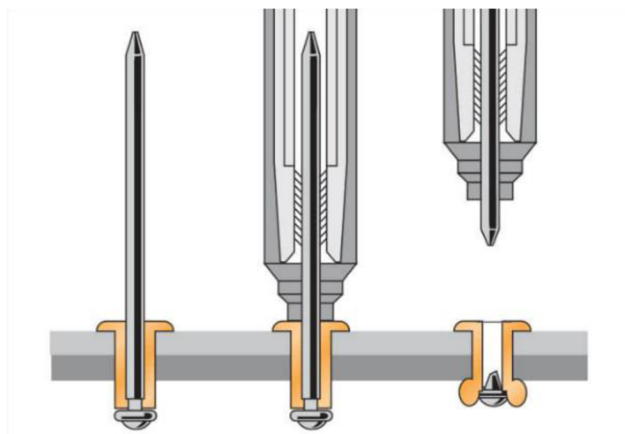
- nezaručená přesnost vzájemné polohy spojovaných dílů
- zeslabení pevnosti spojovaných materiálů vlivem děr pro nýty[23, 24]

Konstrukční nýt se skládá z dříku a připěrné hlavy. Dřík je z plného materiálu (není dutý) a celý tvar nýtu včetně hlavy je určen dle norem. Tento spoj vznikne vložení nýtu do předvrtané díry, připěrná hlava je podložena a závěrná hlava nýtu je vyformována například kladivem (obr. 15) nebo strojně. [20]



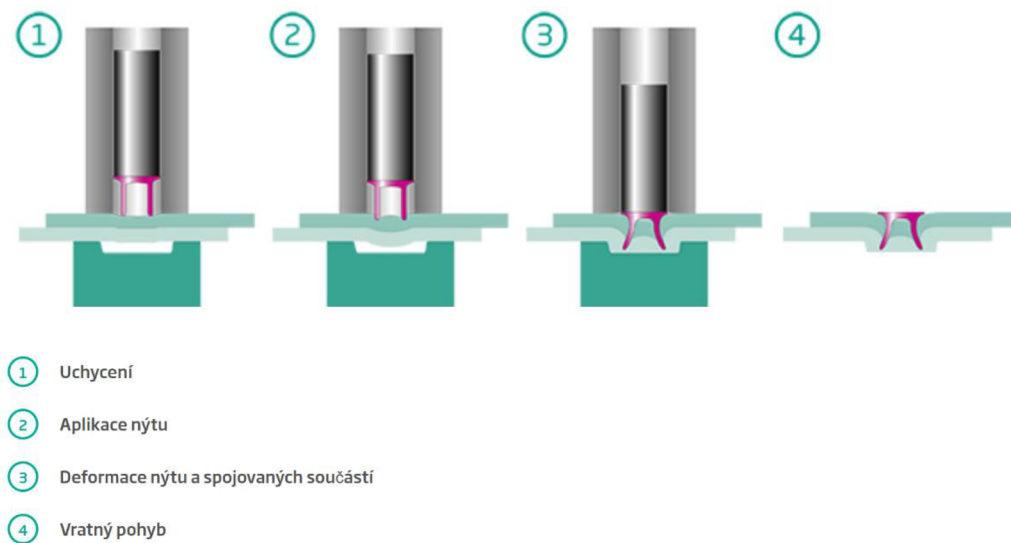
Obr. 15: Nýtování ruční kladivem [20]

Trhací nýty (obr. 16) jsou duté a obsahují trn, který je uvnitř těla nýtu. Tento nýt funguje na principu, že je nejprve prostrčen skrz předvrtanou díru, dále je uchycen za dřík do speciálních kleští pro trhací nýty a následuje zatažení za dřík, díky kterému se vytvoří hlavička. Nýt je také zakrácen. [20]



Obr. 16: Trhací nýt [25]

Samoděrovací nýtování probíhá za studena za pomoci polodutého nýtu, který umožňuje spojovat plechy bez předvrtání děr pro nýt, zde si nýt otvor vytváří sám. Spoj vznikne díky proříznutí vrstvy prvního plechu a u druhého plechu již nedochází k proděravění. Plechy jsou v přímém kontaktu nebo lze mezi jednotlivé plechy nanést vrstvu lepidla. Je možno spojovat plechy odlišných materiálů jako například ocel, hliník, měď, titan navzájem. Tato technologie se běžně používá v automobilovém a leteckém průmyslu, tento proces lze snadno automatizovat. [26]



Obr. 17: Samoděrovací nýtování [26]

Stroje pro samoděrovací nýtování jsou buď hydraulické, pneumatické nebo elektrické. Součástí každého stroje musí být agregát, trn a matrice. Aby nýtování probíhalo dostatečně rychle, tak jsou nýty dodávány do stroje v páscích nebo jsou seřazeny za sebou v trubkovém podavači.[27]



Obr. 18: Přenosné zařízení pro samoděrovací nýtování s pásovým zásobníkem nýtů [28]



Obr. 19: Lis pro samoděrovací nýtování s pásovým zásobníkem nýtů [28]

2.3 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot je mechanická vlastnost materiálu a můžeme ji definovat jako odpor materiálu vůči vnikání cizího tělesa – indentor/vnikací tělísko. Tuto mechanickou vlastnost zjistíme díky posouzení velikosti stopy, kterou za sebou nechal indentor při zkoušce. Vnikací tělísko má definovaný tvar (záleží na typu zkoušky), materiál tělíska musí být dostatečně tvrdý (kalená ocel, diamant, slinutý karbid) a do zkušební vzorku je vtlačován určitou silou po určitý čas.[29]

Měření tvrdosti je oproti ostatním mechanickým zkouškám rychlé a jednoduché. Nespornou výhodou je, že měření lze provádět na hotových dílech bez většího poškození - destrukce. [29]

Rozdělení zkoušek tvrdosti je znázorněno v tabulce (Tab.1) . Podle principu průběhu zkoušky se dělí na vrypové, vnikací, nárazové a odrazové. Dále podle rychlosti zatěžující síly jsou zkoušky rozděleny na statické a dynamické. Také dle účelu měření na zkoušky makrotvrdoti a zkoušky mikrotvrdoti.[30]

Tab. 1: Zkoušky tvrdosti [30]

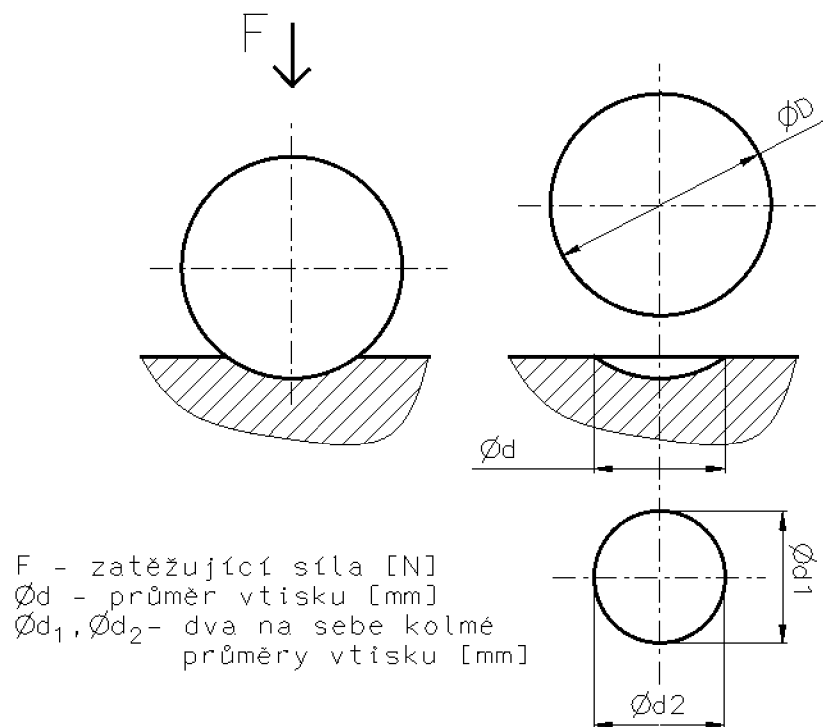
zkoušky makrotvrdoti	statické	vrypové	metoda dle Martense
		vnikací	metoda dle Brinella
			metoda dle Vickerse
	metoda dle Rockwella		
	dynamické	plastické nárazové	metoda volným pádem
			metoda stlačenou pružinou
			metoda porovnávací
elastické odrazové		metoda volným pádem (Shorova)	
	metoda kyvadlová (Duroskop)		
zkoušky mikrotvrdoti	statické	vnikací	metoda dle Vickerse
			metoda dle Knoop

2.3.1 Zkoušky makrotvrdosti

Při měření makrotvrdosti se hodnotí tvrdost materiálu jako celku. Zatěžující síly jsou při této metodě větší než u měření mikrotvrdosti. Pro potřeby této bakalářské práce zde jsou rozepsány pouze zkoušky vnikací při statickém zatížení (viz. tab 1). [31]

2.3.1.1 Zkouška dle Brinella

Hlavním principem této zkoušky je vtlačování kuličky o průměru $\varnothing D$ působením síly F kolmo k povrchu zkoušeného materiálu po určitý čas. Po odlehčení indentoru se změří průměr vtisku $\varnothing d$ (obr. 20).[30]



Obr. 20: Princip měření tvrdosti podle Brinella [zdroj vlastní]

Následná tvrdost podle Brinella se určí ze vztahu: [30]

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

kde značí: HB – tvrdost dle Brinella [1],

D – průměr intoratoru [mm],

A – plocha vtisku [mm²],

d – průměr vtisku [mm],

Průměry vnikacích kuliček jsou normalizované a používají se velikosti $D = 1; 2; 2,5; 5$ a 10 mm. Průměr tělíska D je volen tak, aby průměr vtisku d byl v rozmezí $(0,25 - 0,6) \cdot D$. Typ materiálu kuličky závisí na tvrdosti zkoušeného materiálu, do tvrdosti 400 HB se používají kuličky ocelové kalené. Pro materiály, kde se předpokládá větší tvrdost se používá kulička ze slinutých karbidů. [29, 30]

Velikost zatížení vychází ze vztahu:

$$F = K \cdot D^2 \quad (2)$$

kde značí: F – zatěžující síla [N],

K – materiállová konstanta [1],

D – průměr intoratoru [mm],

Z tohoto vztahu vycházíme proto, aby se daly navzájem porovnávat hodnoty naměřené různými průměry kuliček a při různých velikostech zatíženích. Kde K je konstanta závislá na druhu materiálu. Pro ocel $K = 30$, nezelezné kovy a slitiny $K = 10$ a pro měkké nezelezné kovy $K = 2,5$. Doba zatížení u slitin železa se pohybuje okolo 10 – 15 s, u slitin nezelezných kovů je interval delší na 10 – 180 s. [29]

Vzniklý vtisk d se měří pomocí mikroskopu, měří se dva na sebe kolmé průměry d_1 a d_2 (obr. 18). Z těchto dvou průměrů se vezme aritmetický průměr. Musí být splněna podmínka, že chyba mezi těmito dvěma průměry nesmí převýšit 5%. Pro korektní měření musí být měřený díl čistý, bez okují a očištěný. Zkoušený předmět musí mít tloušťku větší než osminásobek hloubky vtisku d . [29]

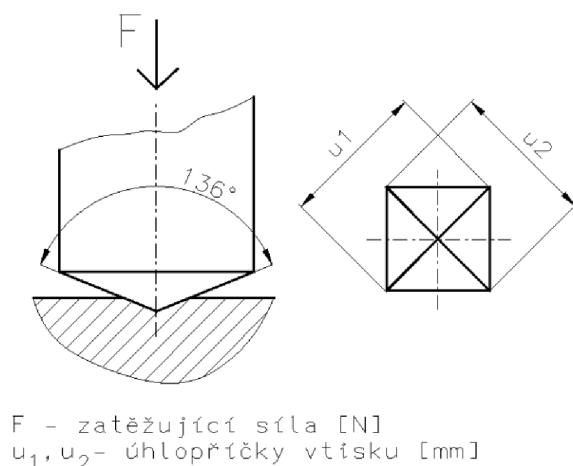
Tvrdost, která je zjištěná při běžných podmínkách ($D = 10$ mm, $F = 29430$ N = 3000 kp, $t = 10- 15$ s) je značená pouze hodnotou tvrdosti a značkou HB (např.: 360 HB). Při jiných

než běžných podmínkách se výsledná tvrdost značí dle pravidla postupně: Hodnota tvrdosti, značka HB, průměr indentoru, zatížení v kilopondech a doba zatěžování (např.: 200 HB 2/750/15). [31]

Tato metoda je zejména vhodná pro měření materiálů měkkých až středně tvrdých s heterogenním složením. Z důvodu velkých zatížení při zkoušce vznikají na povrchu zkoušených předmětů velké vtisky, které na jednu stranu ulehčují měření, ale na druhou stranu můžou díl zničit. [30]

2.3.1.2 Zkouška dle Vickerse

Průběh zkoušky tvrdosti podle Vickerse je založen na totožném principu jako zkouška podle Brinella, zde se vtlačuje do zkušebního materiálu čtyřboký jehlan (obr. 21), který svírá vrcholový úhel 136° . Materiál indetoru je diamant. [31]



Obr. 21: Princip měření tvrdosti podle Vickerse [zdroj vlastní]

K určení tvrdosti je potřebné změřit mikroskopem úhlopříčky vtisku u_1 a u_2 a následně z nich zjistit aritmetickým průměrem délku úhlopříčky u . Výsledná hodnota tvrdosti se vypočte jako poměr velikosti zatížení F k ploše vtisku dle vztahu: [29]

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{u^2} = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (2)$$

kde značí: HV – tvrdost dle Vickerse [1],

F – zatěžující síla [N],

u – délka úhlopříčky vtisku [mm],

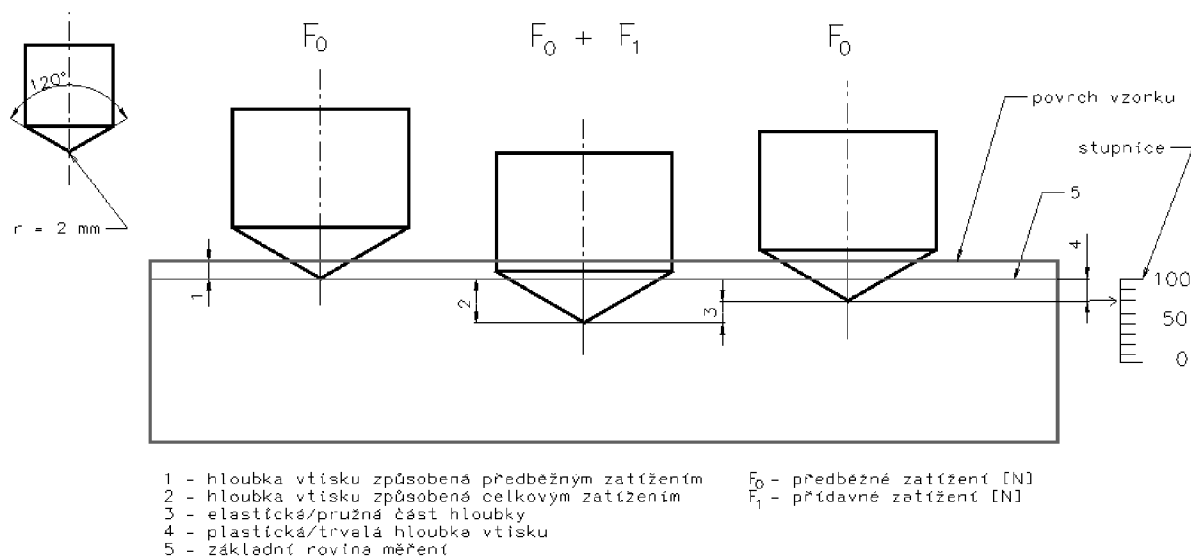
Tvrdot naměřená při běžných podmínkách ($F = 294 \text{ N} = 30 \text{ kp}$, $t = 10 - 15 \text{ s}$) se značí pouze číselnou hodnotou a značkou tvrdosti HV (např.: 360 HV). Při jiných než běžných podmínkách probíhá popis tvrdosti postupně: Číselná hodnota, značka tvrdosti podle Vickerse, velikost a doba působení zatížení (např.: 140 HV 20/15). Velikost zatížení udávaná v kilopondech. [29]

Mezi výhody této zkoušky lze označit malé vtisky, které neničí plochy na zkoušeném předmětu. Dále přibližně do tvrdosti 400 HV je závislost lineární s tvrdostí podle Brinella, tudíž do této hodnoty je tvrdost podle Vickerse stejná jako podle Brinella a opačně. Mezi nevýhody možno zařadit náročnější přípravu povrchu – broušení až leštění. Dále při měření tvrdosti heterogenního materiálu malými vtisky je riziko toho, že dojde k změření tvrdosti pouze jednoho zrna ve struktuře, nikoliv tvrdosti celku. Z tohoto důvodu je tato metoda vhodná pro materiály s jemnozrnnou strukturou, homogenním složením. [30]

2.3.1.3 Zkouška dle Rockwella

Princip měření tvrdosti dle Rockwella je zcela odlišný od předchozích dvou metod. U této zkoušky je vnikacím tělesem diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a zaoblení na vrcholu nebo ocelová kulička kalená o průměru 1,5875 mm. U této zkoušky vychází tvrdost přímo z hloubky vtisku, který vznikne po odlehčení indentoru. [29]

Průběh měření je zobrazen na obr. 22. Indentor je nejprve zatížen předběžným zatížením F_0 z důvodu odstranění možných nerovností na povrchu, v této poloze se stupnice hloubkoměru nastaví na nulu. Dále se přidá přídavné zatížení F_1 . Výsledná tvrdost je odečtena v místě, kde je odebráno přídavné zatížení F_1 a zůstane působit pouze F_0 (tento poslední krok je z důvodu eliminace pružné deformace materiálu). [29, 30]



Obr. 22: Průběh měření tvrdosti dle Rockwella [zdroj vlastní]

Tvrdost podle Rockwella je označena naměřenou tvrdostí a třemi písmeny, první dvě jsou vždy HR a třetí je závislé na metodě měření – stupnice (např.: 45 HRC). Podle tvaru vnikacího tělesa a velikosti zatěžující síly existují stupnice A, B, C, N, T (tab. 2). Pro tvrdé materiály je vhodná metoda s diamantovým kuželem, naopak pro měkké materiály se používá metoda s ocelovou kalenou kuličkou. Platí, že čím větší je tvrdost materiálu, tím je menší trvalý vtisk. [29, 30]

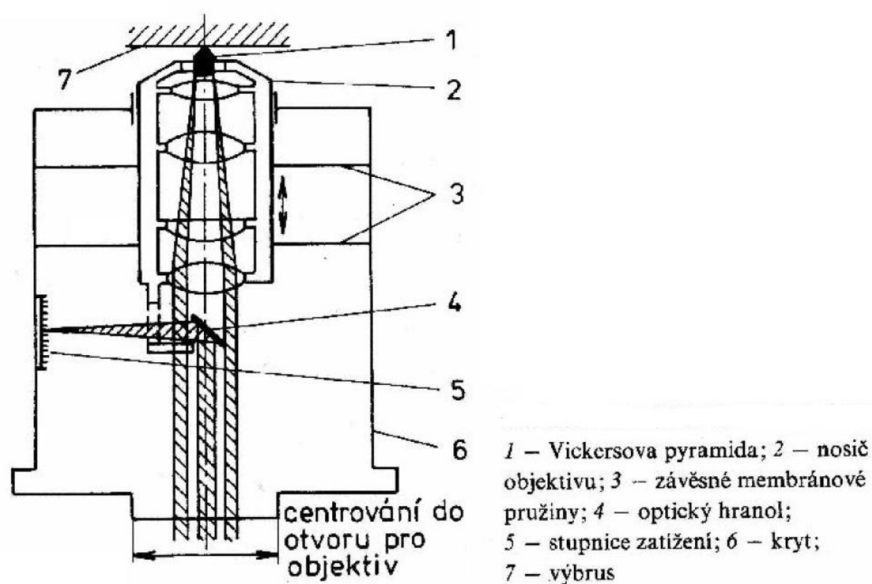
Tab. 2: Druhy a parametry zkoušek tvrdosti dle Rockwella [30]

Označení	Vnikací tělísko	Zatěžující síla [N]			Počet dílků stupnice
		F_0	F_1	$F_0 + F_1$	
HRA	Kužel	98	490	588	100
HRC		98	1373	1471	100
HRN		29,4	117,7 268,4 419,9	147,1 294,2 441,3	100
HRB	Kulička	98	883	980	130
HRT		29,4	117,7 268,4 419,9	147,1 294,2 441,3	130

2.3.2 Zkoušky mikrotvrdomosti

Při měření mikrotvrdomosti stanovujeme lokální vlastnosti materiálu (např.: tvrdost jednotlivých složek ve struktuře). Hlavním rozdílem je velikost zkušebního zatížení, které je oproti zkouškám makrotvrdomosti daleko nižší. Z důvodu malých zatížení jsou i vtisky velmi malé. Používá se při měření tvrdosti drobných dílů, tenkých vrstev a povlaků. [31]

Pro tuhle metodu měření tvrdosti musí být povrch vzorku velmi jemný, toho docílíme nejlépe procesem metalografického výbrusu. Potřebný vtisk je vytvořen přímo mikrotvrdoměrem (metalografický mikroskop osazený vnikacím tělískem), potřebná síla pro měření mikrotvrdomosti musí být přesná, tudíž je vyvozena například závažím nebo kalibrovanou pružinkou. Po odlehčení se výsledný tvrdost vypočte dle vztahu 2. nebo z tabulek podle velikosti úhlopříčky vtisku. Mikrotvrdoměry využívají vnikací těleso Vickersovo nebo Knoopovo, které má největší uplatnění při měření povrchových vrstev. [29, 32]



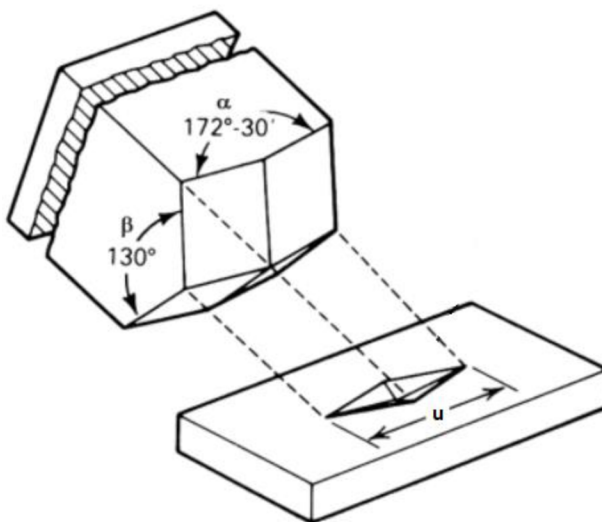
Obr. 23: Schéma Hanemannova mikrotvrdoměru

Zkouška mikrotvrdomosti dle Knoopa

Při této metodě měření tvrdosti je indentorem diamantový jehlan s kosočtvercovou základnou a vrcholovými úhly α a β (obr. 24). Zkušební zatížení je dáno normou a pohybuje se řádově od 0,0098807 N do 19,613 N. Po odlehčení se měří pouze delší úhlopříčka vtisku u , potřebná hodnota hodnota tvrdosti je stanovena buď podle tabulek nebo dle vztahu: [33]

$$HK = 1,451 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (3)$$

kde značí: HK – tvrdost dle Knoopu [1],
 F – zatěžující síla [N],
 u – délka úhlopříčky vtisku [mm],

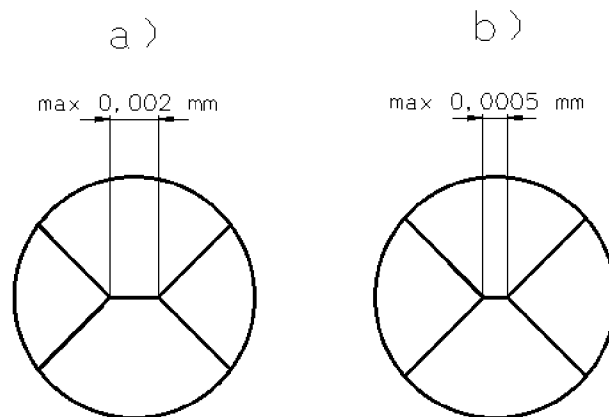


Obr. 24: Vnikací těleso dle Knoopu [33]

Při značení tvrdosti je nejprve uvedena naměřená tvrdost, značka zkoušky podle Knoopu HK, zatěžující síla v kilopondech a doba zatížení (není uvedena pokud zatěžujeme v intervalu 10 – 15s). Výsledek měření může vypadat například: 600 HK 0,2/25 (doba zatížení 25s). [33]

Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Princip zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse se nijak neliší od zkoušky makrotvrdosti, hlavním rozdílem je použití menší zatěžující síly, přibližně od 0,0098 N do 4,905 N, s tím jsou spojeny menší vtisky. Povrch zkoušeného dílu musí být vyleštěný. Tvar diamantového indentoru je stejný jako při zkoušce makrotvrdosti, ale hrot je zde zhotoven s větší rozměrovou přesností (obr. 25). Hledanou mikrotvrdost zjistím ze změřené délky vtisku u , buď z tabulek nebo dle vztahu 2. Značení je identické jako při metodě makrotvrdosti dle Vickerse. [30]



Rozměrová přesnost hrotu pro zkoušku a) makrotvrdosti
b) mikrotvrdosti

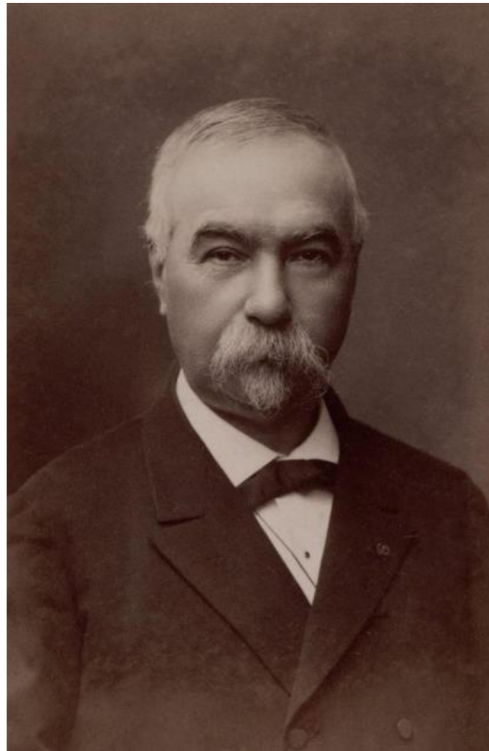
Obr. 25: Porovnání hrotů indentorů pro měření makro a mikrotvrdosti [zdroj vlastní]

2.4 Fotogrammetrie

Je věda zabývající se zpracováním fotografických snímků, z kterých lze získat informace o rozměrech nebo například deformaci daného tělesa. Jedná se o nepřímé měření, protože hodnoty získáváme z fotografických snímků, nikoliv přímým měřením daných objektů. [34]

2.4.1 Historie

Vývoj fotogrammetrie se píše od 30. let 19. století, kdy francouzský vědec Louis Jacques Mandé Daguerre vynalezl první fotografii. Poté byla provedena první měření pomocí fotografie francouzským badatelem Laussedetem a nezávisle na něm provedl první měření i německý architekt Meydebauer. V těchto letech se nejvíce fotogrammetrie požívala k topografii a k vyměřování staveb. [35]



Obr. 26: Aimé Laussedat [36]

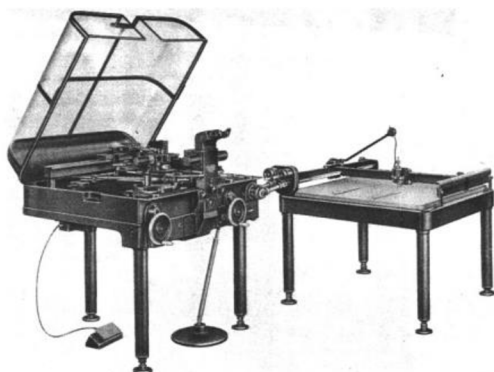
2.4.2 Základní rozdělení fotogrammetrie

Podle místa odkud byl pořízen snímek : [34, 35, 37, 38]

- pozemní - je nejvíce uplatňována ve stavebnictví, architektuře (vyměřování fasád) dopravě, kriminalistice nebo například při určování objemu těžby v dolech (povrchových). Snímky jsou zachyceny pomocí přístroje fototeodolit. Lze do této kategorie zařadit i blízkou fotogrammetrii, kde je snímek pořízen z dálky maximálně 30 m.
- leteckou - snímky pořizovány za pohybující se ho stanoviště – letadlo, díky fotokomorám. Zpracování je obtížnější, protože není známé přesné místo, odkud byl snímek pořízen. Největší uplatnění má v oboru topografie.
- satelitní
- makro

Podle druhu vyhodnocování fotografie : [37]

- analogové vyhodnocení – pro vyhodnocování využívají opticko-mechanické zařízení(obr. 25)



Obr. 27: Analogový stereoplottér [39]

- analytické vyhodnocení – vyhodnocování probíhá na počítačích (obr. 26), vstup je analogový snímek



Obr. 28: Analytický stereoplottér [38]

-
- digitální vyhodnocení – vstupem je digitální obraz, který je vytvořen naskenováním nebo přímo fotoaparátem, vyhodnocení počítačem se speciální SW

Podle počtu vyhodnocovaných snímků: [37]

- jednosnímková fotogrammetrie – pouze rovinné souřadnice, pro rovinné objekty–fasády staveb
- dvousnímková – z dvojice snímků lze vyhodnotit prostorové souřadnice
- vícesnímková

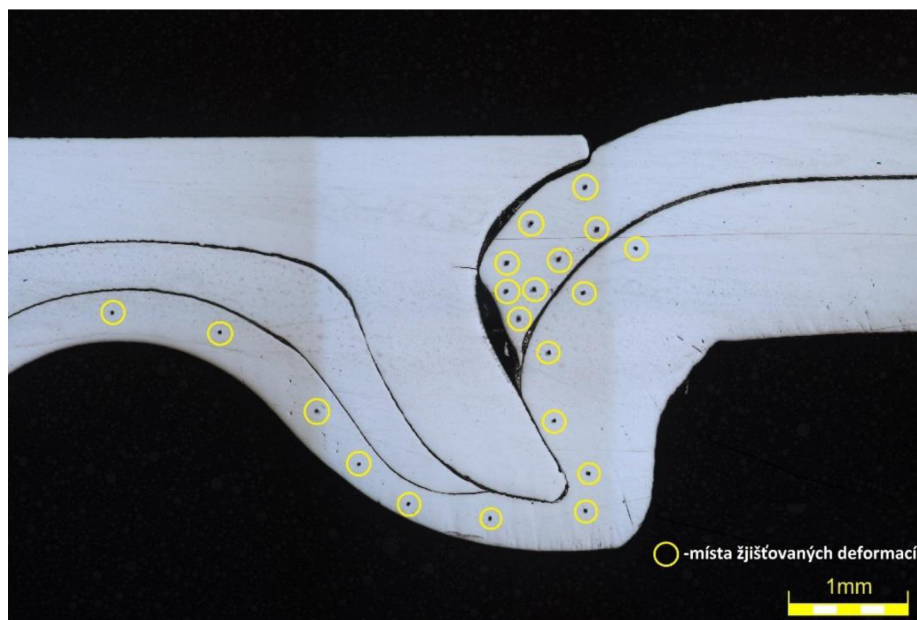
Podle typu výstupních hodnot: [37]

- grafický výstup – vyhodnocení pro tento typ výstupu probíhá například na kreslicím stole
- číselný výstup – vzniká při digitálním vyhodnocování na počítači

3 Praktická část

V praktické části této práce jsou deformace vzniklé zalisováním nýtu analyzovány ze dvou různých perspektiv.

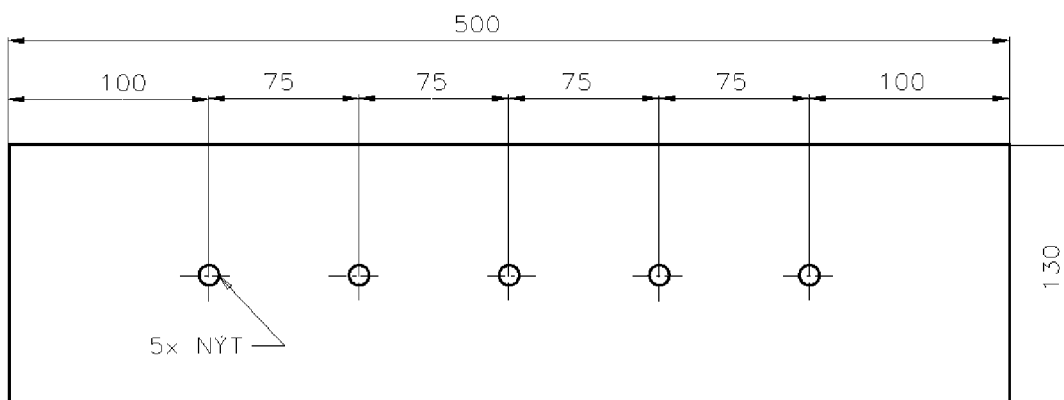
- a) V bezprostředním okolí kolem nýtu (obr. 29)



Obr. 29: Místa zjišťovaných deformací v okolí nýtu [zdroj vlastní]

Vzniklé deformace materiálu budou zjištěny nepřímo prostřednictvím měření mikrotvrdosti v okolí nýtu. Následně budou hledané hodnoty deformací dopočítány pomocí kalibračních rovnic (tab. 13), kde je zachycena závislost mezi změřenou mikrotvrdostí a hledanou deformací.

- b) Na snýtovaném vzorku pěti nýty (obr. 30)



Obr. 30: Vzorek pro zkoušku rovinné deformace [zdroj vlastní]

Průhyb vzorku, který vzniká v důsledku deformace, je analyzován pomocí měřicího zařízení Atos 3 triplescan. Toto zařízení využívá principů fotogrammetrie.

Pro oba experimenty jsou deformace získány ze vzorků kombinací materiálů ocel – ocel a ocel – hliník. Celé měření probíhalo v laboratořích TU v Liberci na katedře strojírenské technologie.

3.1 Určení vlastností použitých materiálů

Označení jednotlivých materiálů bylo zjištěno výčtem z technických norem a dále proběhlo zjištění mechanických vlastností při jednoosém namáhání při statické zkoušce tahem dle normy EN ISO 6892-1 pro 3 směry odebrání vzorku s ohledem na směr válcování tabule plechu – 0°, 45° a 90°. Pro každý směr bylo vystřiženo a odzkoušeno 5 zkušebních vzorků od každého materiálu.

Vstupní parametry vzorků byly určeny s ohledem na výše zmíněnou normu. Rychlost posuvu ve všech případech byla 0,5 mm/min, nad mezi kluzu 15 mm/min.

Statická zkouška tahem byla provedena na trhací stroji TIRA test 2300, zatížení snímal tenzometrický snímač KAF 100kN (maximální snímatelné zatížení je 100kN, největší přesnost měření je v rozmezí 1-99% tohoto povoleného zatížení). Zkušební vzorky byly uchyceny do hydraulických upínacích čelistí. Celý průběh trhací zkoušky zpracoval software Labtest 4.9 včetně vyhodnocení dat.

V rámci této trhací zkoušky byl vytvořen pro každý zkoušený materiál jeden komplexní graf, na kterém jsou zobrazeny tři spojnice pro tři směry odebrání vzorku. Kromě toho byla sestavena tabulka s naměřenými mechanickými vlastnostmi pro každý zkoušený materiál. Podrobné protokoly z jednoosé statické tahové zkoušky jsou v příloze této práce (P1 až P9).

3.1.1 Ocel DC05+ZE 75/75 BP

Ocel DC05+ZE 75/75 BP dále označována jako DC05 je popsána normou ČSN EN 10152 a jedná se o hlubokotažnou ocel. [40]

Vlastnosti dle normy:

- DC05:
 - $R_m = 270-330$ MPa
 - $A_{80} = 39$ %
 - maximální obsah chemických prvků ve slitině: C=0,06%; Mn=0,35%; P=0,025%; S=0,025%
 - **DC** – plochá ocel válcovaná za studena
 - **05** – jakost

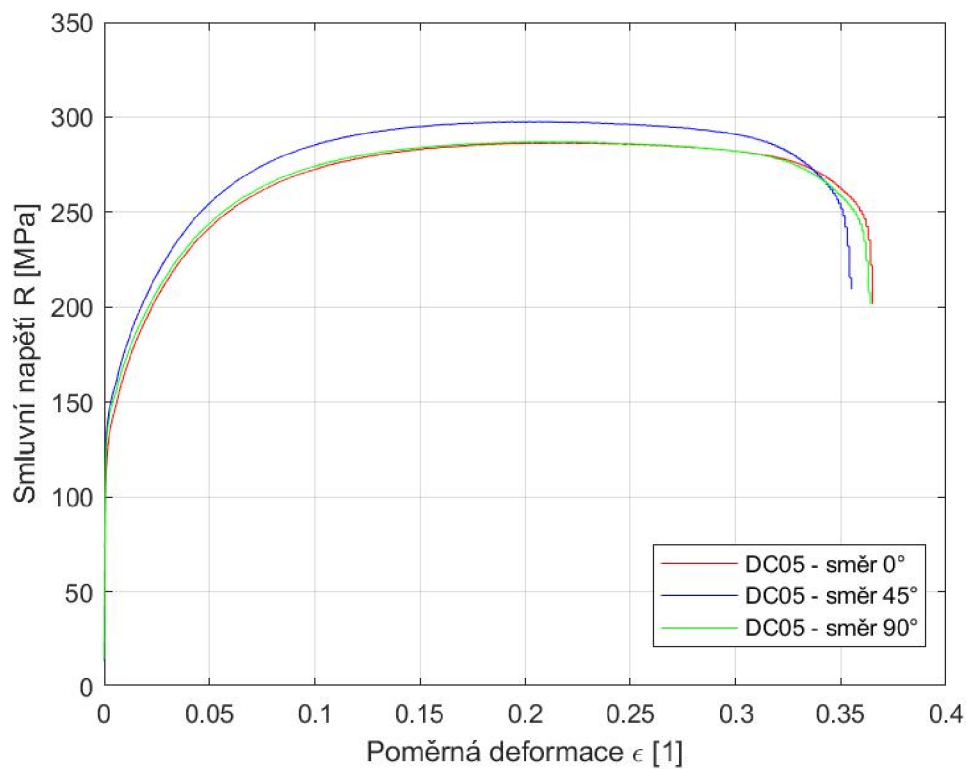
- ZE 75/75 :
 - jmenovitá tloušťka zinkového povlaku na každé straně 7,5 μm o hmotnosti 54 g/m^2
 - minimální tloušťka zinkové povlaku na každé straně 6,6 μm o hmotnosti 47 g/m^2

- B – druh jakosti povrchu

- P – fosfátovaný povrch

Zvolená tloušťka plechu pro experimenty byla 0,7 mm.

Naměřené mechanické hodnoty materiálu DC05 jsou uvedeny v tabulce 3. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky sledovaných veličin. Grafické znázornění průběhu zkoušky je vidět na obr. 31.



Obr. 31: Komplexní graf ze statické zkoušky tahem pro materiál DC05 [zdroj vlastní]

Tab. 3: Naměřené mechanické hodnoty pro materiál DC05

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]
Směr 0°	$133,2 \pm 2,5$	$287 \pm 1,8$	$27,2 \pm 0,46$	$46,6 \pm 0,93$
Směr 45°	$142,8 \pm 0,5$	$296,3 \pm 0,1$	$25,4 \pm 0,49$	$44,3 \pm 0,01$
Směr 90°	$139,5 \pm 0,3$	$285,5 \pm 0,3$	$26,5 \pm 0,24$	$45,6 \pm 0,42$

3.1.2 Ocel HX260BD+Z100MB

Ocel HX260BD+Z100MB dále označována jako HX260 je popsána normou ČSN EN 10346 a jedná se o ocel mikrolegovanou žárově pozinkovanou. [41]

Vlastnosti dle normy:

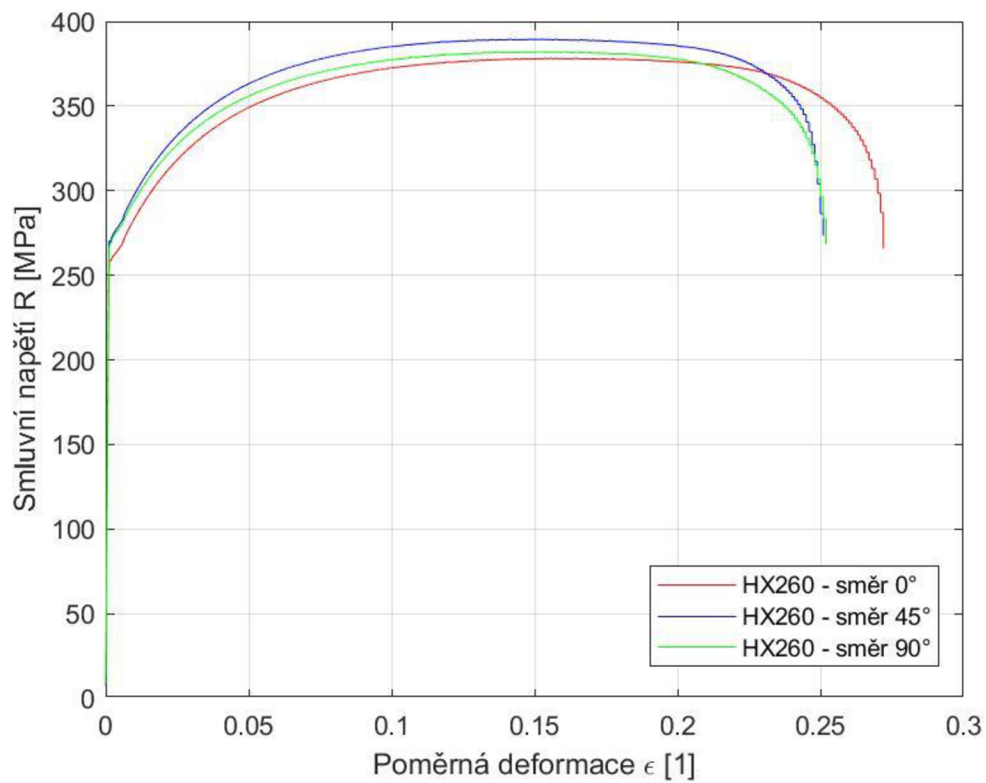
- HX260BD :
 - $R_m = 360-440$ MPa
 - $A_{80} = 28$ %
 - maximální obsah chemických prvků ve slitině: C=0,1%; Mn=0,1%; P=0,1%; Si=0,5%
 - H** - ocel plochá s vysokou pevností určená pro tváření za studena
 - X** – způsob válcování, za tepla/studena, nespecifikováno
 - 260** – mez kluzu $R_{p0,2}$ v MPa
 - B** – vypalovací ocel při ohřátí na 170° po určitý čas zvyšuje svoji pevnost
 - D** – možno žárově upravovat povrch

- Z100 :
 - popisuje množství zinkového povlaku v tomto případě 100 g/m^2 a tloušťka vrstvy $7 \mu\text{m}$

- MB – zkvalitněný povrch

Zvolená tloušťka plechu pro experimenty byla 1,3 mm.

Naměřené mechanické hodnoty materiálu HX260 jsou uvedeny v tabulce 4. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky sledovaných veličin. Grafické znázornění průběhu zkoušky je vidět na obr. 32.



Obr. 32: Komplexní graf ze statické zkoušky tahem pro materiál HX260 [zdroj vlastní]

Tab. 4: Naměřené mechanické hodnoty pro materiál HX260

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]
Směr 0°	262,2 ± 0,8	378,5 ± 0,4	19,2 ± 0,18	33,8 ± 0,35
Směr 45°	274,6 ± 0,3	390,1 ± 0,6	18,3 ± 0,26	31,2 ± 0,58
Směr 90°	273,5 ± 0,3	382,4 ± 0,4	18,9 ± 0,25	31,4 ± 0,29

3.1.3 Slitina hliníku EN AW 6082

Slitina hliníku EN AW 6082 (chemické označení AlMg1Si1Mn1) dále označována pouze jako AW6082 je popsána normou ČSN 42 4400 a jedná se o středně pevný hliník. Slitina je ve stavu O, tzn. vyžíhaný stav po tváření za tepla není nijak dále zpracována. [42]

Vlastnosti dle normy:

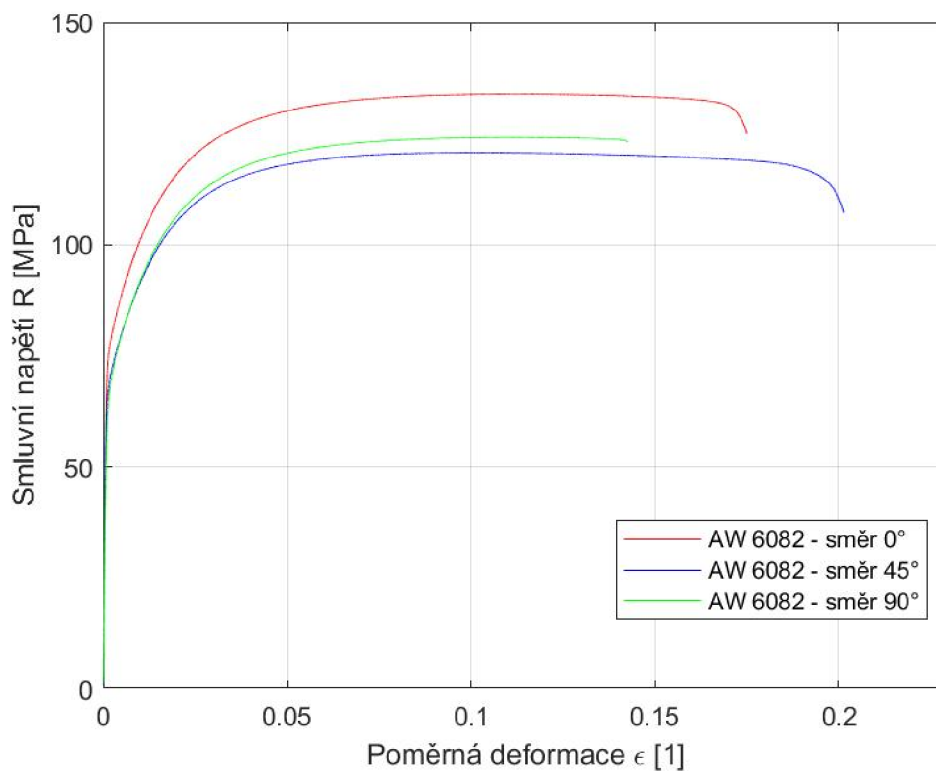
- Minimální pevnost v tahu $R_m = 100$ MPa
- Nejnižší tažnost $A_{10} = 16$ %

Tab. 5: Chemické složení slitiny EN AW 6082

Chemické složení		Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Ti	Zn	Ostatní		celkem	Al
									jednotlivě	celkem		
%	min.	0,70	0,70	0,40	-	-	-	-	-	-	-	zbytek
	max.	1,20	1,40	1,00	0,50	0,10	0,05	0,20	0,10	0,15	0,80	

Zvolená tloušťka plechu pro experimenty byla 2 mm.

Naměřené mechanické hodnoty materiálu AW 6082 jsou uvedeny v tabulce 6. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky sledovaných veličin. Grafické znázornění průběhu zkoušky je vidět na obr. 33.



Obr. 33: Komplexní graf ze statické zkoušky tahem pro materiál AW 6082 [zdroj vlastní]

Tab. 6: Naměřené mechanické hodnoty pro materiál AW 6082

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]
Směr 0°	$83,5 \pm 0,4$	$136,9 \pm 0,3$	$13,5 \pm 0,08$	$21 \pm 0,77$
Směr 45°	$74,5 \pm 0,2$	$123,2 \pm 0,2$	$12,7 \pm 0,11$	$25 \pm 0,23$
Směr 90°	$74,8 \pm 0,8$	$127 \pm 0,3$	$13,5 \pm 0,22$	$16,6 \pm 0,83$

3.2 Příprava vzorků

V této společné části obou experimentů budou vzorky nastříhány a snýtovány.

3.2.1 Stříhání vzorků

Pro vystřížení vzorků z tabule plechu byly využity elektromechanické tabulové nůžky od výrobce Durma označení MS 2504 (obr. 34).



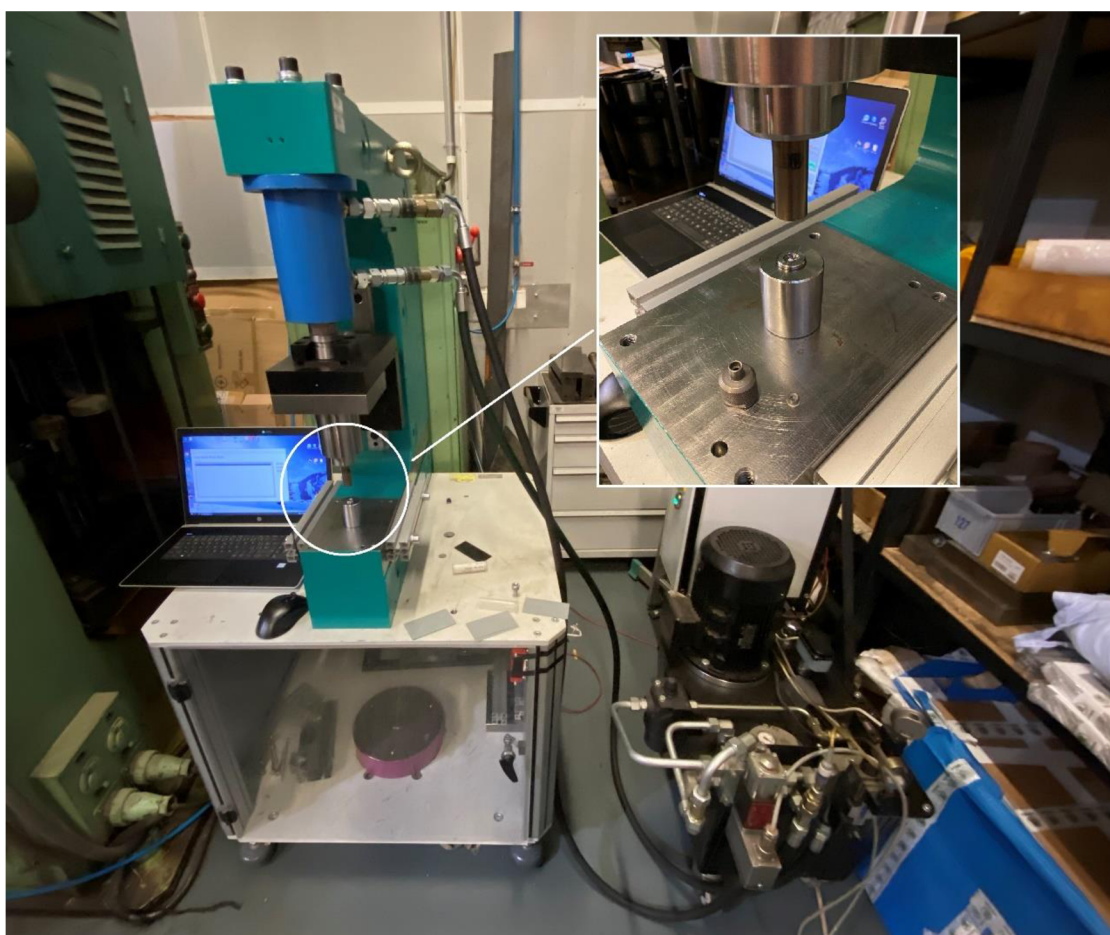
Obr. 34: Tabulové nůžky Durma MS 2504 [zdroj vlastní]

Pro zkoušku zjišťování deformace materiálu okolo nýtu bylo nastříháno celkem 12 ks přístřihů o rozměru 100 x 50 mm (3 ks AW 6082, 3 ks DC05, 6 ks HX260).

Pro druhou zkoušku zjišťování deformace-průhybu vlivem spojením plechů 5ti nýty bylo nastříháno také 12 ks plechů o rozměru 130 x 500 mm (3 ks AW 6082, 3 ks DC05, 6 ks HX260).

3.2.2 Nýtování vzorků

Po nastříhání požadovaných počtů plechů daných rozměrů se přešlo k samotnému nýtování. Nýtování proběhlo na nýtovačce od firmy TOX PRESSOTECHNIK (obr. 35). Mezi hlavní části stroje patří hydraulický agregát s čidlem, který přes servoventil umožňuje přesné nastavení tlaku v oběhu. Díky tlaku z agregátu poháníme přes tlakové hadice dvojčinný hydraulický válec, který je uložen v rámu tvaru „C“. Do prostoru pod válcem v přídržovači (vedení) je vložen nýt, který působí přes spojované plechy do matrice, která docílí správného rozevření nýtu. Celý průběh nýtování byl nastaven a sledován prostřednictvím softwaru v počítači.



Obr. 35: Nýtovací stroj TOXX PRESSOTECHNIK [zdroj vlastní]

Pro naše měření byly použity dva druhy nástrojů (matic). Nástroj se významně podílí na tvorbě spoje. Pro pevnější materiály (ocel) je nutné použít nástroj s vedením/hrotem (obr. 36), aby došlo ke správnému rozevření nýtu. Pro měkčí materiály, v našem případě hliník, byl použit nástroj bez vedení (obr. 37).



Obr. 36: Nástroj pro ocel [zdroj vlastní]

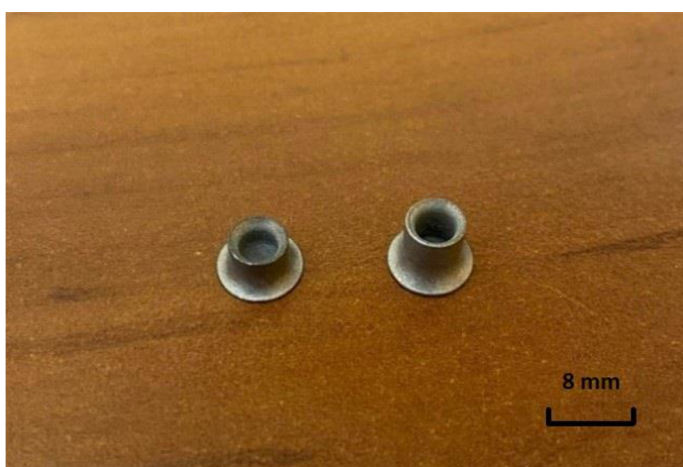


Obr. 37: Nástroj pro hliník [zdroj vlastní]

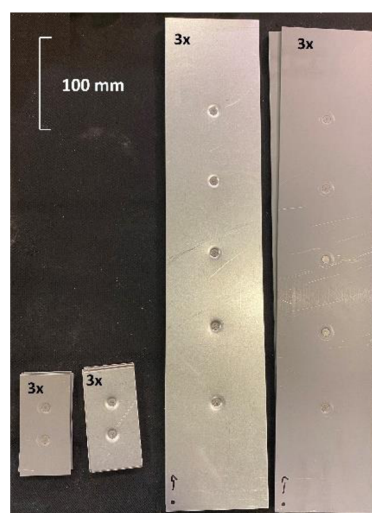
Při nýtování dvou ocelových plechů byl použit kratší nýt o průměru 5 mm a délce 3 mm. Pro druhou kombinaci plechů byl z důvodu větší tloušťky spojovaných plechů vybrán nýt delší také o průměru 5 mm a délce 5 mm.

Do kratších vzorků o rozměru 100x50 mm byly nalisovány dva nýty, v tomto případě na vzdálenosti od kraje a rozteči nýtů nezáleželo, protože bylo zkoumáno pouze okolí nýtu. Celkem bylo zhotoveno 3x DC05 – HX260 a 3x HX260 – AW 6082. Do větších vzorků 130x500 mm bylo nalisováno 5 samoděrovacích nýtů ve vzdálenosti 100 mm od kraje a pak s roztečí nýtů 75 mm (obr. 39). Dohromady byly také vyrobeny 3 ks od obou kombinací.

Při kombinaci DC05 – HX260 byl horní plech DC05 a dolní HX260, při kombinaci HX260 – AW 6082 byl horní plech HX260 a dolní AW 6082.



Obr. 38: Vlevo nýt kratší a vpravo nýt delší



Obr. 39: Připravené vzorky

3.3 Zkoumání deformace materiálu okolo nýtu

Pro nalezení deformací kolem nýtu bylo nejprve potřeba si připravit metalografické výbrusy. Protože změření deformace materiálu v okolí nýtu napřímo je problematické, postup byl následovný:

- 1) Naměření mikrotvrdosti v okolí nýtu na metalografických výbrusech (obr. 49, 50).
- 2) Statická tahová zkouška referenčních materiálů (DC05, HX260 a AW 6082), pomocí bezkontaktního měření deformace systémem Sobriety byla naměřena závislost deformace na vzdálenosti od trhliny vzorku. Jinak řečeno, jsou známé hodnoty deformací na určité vzdálenosti od trhliny (obr. 60).
- 3) Měření mikrotvrdosti na utržených vzorcích z tahové zkoušky. Ke vzdálenosti od trhliny, ke které se váže z předchozího bodu hodnota deformace, nyní lze přiřadit i hodnotu mikrotvrdosti \Rightarrow nalezení rovnic popisujících hledanou závislost $HV_{0,1} - \varphi$ (tab.13).
- 4) Přirazení hodnot deformací okolo nýtu do míst vpichů (obr. 62, 63).

3.3.1 Příprava metalografického výbrusu

Pro zkoušku, kde byla zjišťována deformace materiálu v bezprostřední blízkosti nýtu, využijeme kratší vzorky 3x HX260 – AW 6082 a 3x DC05 – HX260 viz obr. 39. Nejdříve byl nýt ořezán nahrubo dokola na pile Buehler Delta Abrasimet (obr. 40). Poté byly vzorky (obr. 41) rozříznuty načisto středem nýtu na stolní automatické metalografické rozbrušovací pile Metalco Brilliant 220 (obr. 42).



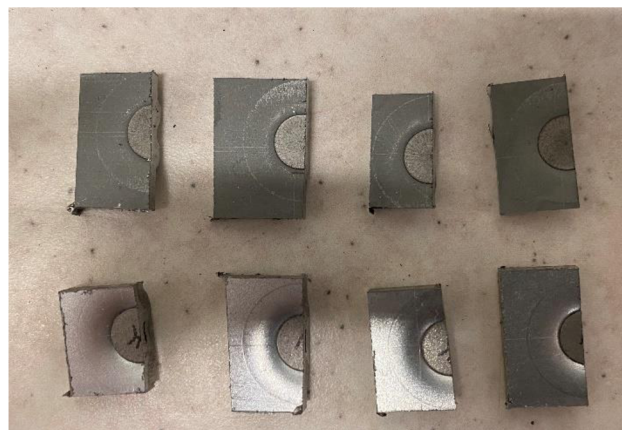
Obr. 40: Pila Buehler Delta Abrasimet [zdroj vlastní]



Obr. 41: Nahrubo ořezané vzorky [zdroj vlastní]



Obr. 42: Automatická rozbrušovací pila [zdroj vlastní]



Obr. 43: Načisto rozříznuté vzorky [zdroj vlastní]

Aby se se vzorky lépe manipulovalo při následujícím měření, byly zality ve formičce VariDurem. VariDur je druh technické pryskyřice, která se využívá při upevňování metalografických výbrusů a dá se dobře brousit a leštit. Smísením práškové a tekuté složky vznikla kašovitá hmota. Do jedné formičky se vešly tři rozříznuté vzorky (obr. 43), tudíž v jedné formičce byly vzorky DC05 – HX260 a v druhé HX260 – AW 6082, které byly zality zmíněnou hmotou.

Po vytvrdnutí pryskyřice byly zalité výbrusy vyndány z formiček a zhotoveny metalografický výbrusy standardním postupem (obr. 45).

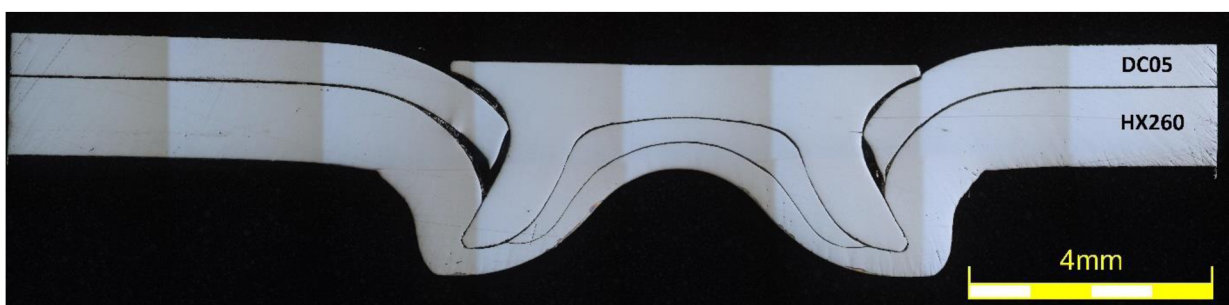


Obr. 44: Leštička Buehler Phoenix 4000 [zdroj vlastní]



Obr. 45: Metalografický výbrus po vyleštění [zdroj vlastní]

Vzorky musí být po vyleštění zbavené veškerých vrypů a drobných škrábanců, které vznikly při řezání. Stav výbrusu jsme si ověřili na digitálním mikroskopu Olympus DSX500, snímali jsme makrostrukturu výbrusů objektivem při 100 násobném zvětšení. (obr. 46, obr. 47)



Obr. 46: Spoj DC05-HX260 100x zvětšení [zdroj vlastní]



Obr. 47: Spoj HX260-AW 6082 100x zvětšení [zdroj vlastní]

3.3.2 Měření mikrotvrdomosti v okolí nýtu

Mikrotvrdomost v okolí nýtu byla změřena plně automatickým digitálním mikrotvrdoměrem Qness Q30A (obr. 48). Na 6 násobné revolverové hlavě je přístroj opatřen třemi vnikacími tělesy a třemi objektivy (4x, 40x a 65x zvětšení). Tento mikrotvrdoměr umožňuje měření tvrdosti metodami dle Vickerse, Brinella a Knoop. Rozsah zkušebního zatížení je od 0,25g až do 31,25kg.



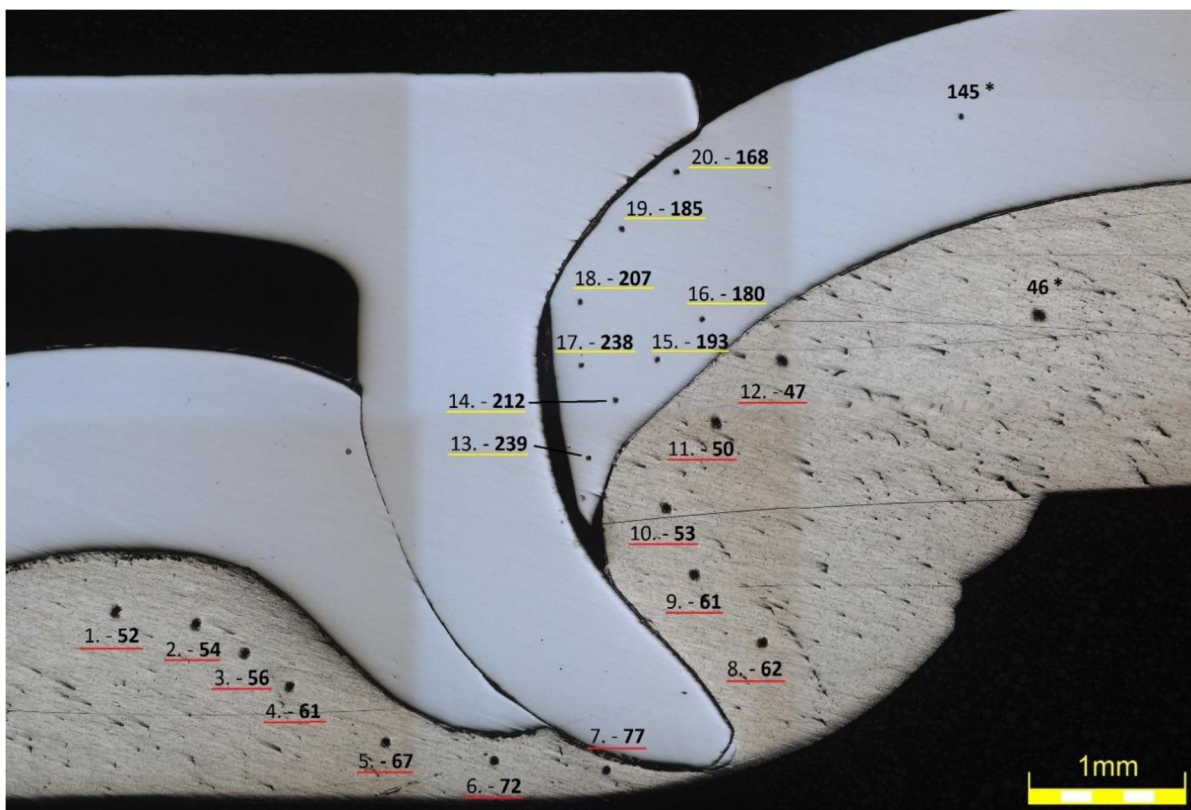
Obr. 48: Mikrotvrdoměr Qness s upnutými vzorky [zdroj vlastní]

Nejprve byly zkoumané výbrusy upevněny do čtyřpozicového držáku na stolu přístroje. Poté se připojil mikrotvrdoměr k počítači a přes program Qpix byl ovládán celý přístroj. Měřená byla mikrotvrdoměr metodou dle Vickerse při zatížení 100g po dobu 5s – HV 0,1.

Na jednom vzorku byla tvrdost kolem nýtu změřena na 20 místech, snaha byla o co největší přesnost udržení stejných míst vpichů okolo nýtu na dalších vzorcích, aby naměřené hodnoty měly vypovídající smysl k vzájemnému porovnávání. Vtisky byly umístěovány v hliníku přibližně 0,4 mm a v oceli 0,2 mm od okraje materiálu, tato vzdálenost je daná normou a je nutné tuhle podmínku dodržet, aby nedocházelo k ovlivnění naměřené hodnoty tvrdosti zborcením materiálu na okraji.

Měřených vzorků byly dohromady tři pro obě kombinace. Ze tří změřených vzorků HX260-AW 6082 (tab. 7) a tří vzorků DC05-HX260 (tab. 8) byl vypočítán aritmetických průměr, který eliminuje nepřesnosti polohy vpichu.

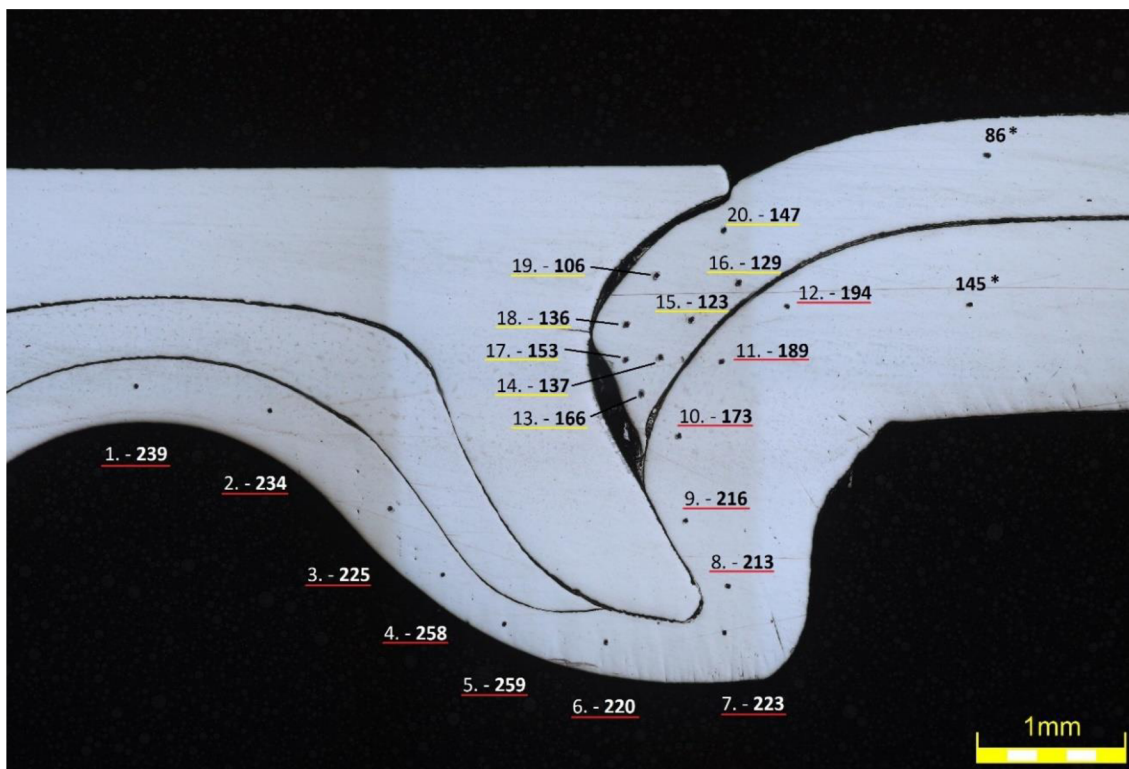
Na makroskopickém snímku výbrusu (obr. 49, obr. 50) jsou vidět místa vpichů a k nim jsou připsány jednotlivá pořadová čísla měření od 1 do 20 včetně jejich střední hodnoty mikrotvrdoměru okolo nýtu dle tab. 7 a tab. 8 přesně do míst vtisků měření 1.-20. Oba spojované materiály jsou pro lepší názornost rozlišeny barevným podtržením, kde červeně podtržené hodnoty náleží spodnímu materiálu a žlutě podtržené hodnoty náleží vrchnímu materiálu.



Obr. 49: Makroskopický snímek vtisků s hodnotami tvrdosti pro spoj HX260-AW 6082 [zdroj vlastní]

Tab. 7: Naměřené hodnoty tvrdosti pro kombinaci materiálů HX260-AW 6082

Tvrdost HV 0,1 pro kombinaci HX260-AW 6082					
Měření	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Střední hodnota tvrdosti	Tvrdost základního materiálu
<u>1.</u>	54,1	50,4	52,3	<u>52</u>	46 *
<u>2.</u>	53,4	53,4	54	<u>54</u>	
<u>3.</u>	56,9	55,5	55,7	<u>56</u>	
<u>4.</u>	62,1	60,3	61,5	<u>61</u>	
<u>5.</u>	65	69	67,4	<u>67</u>	
<u>6.</u>	72,3	72,7	72,4	<u>72</u>	
<u>7.</u>	76	78,4	78	<u>77</u>	
<u>8.</u>	62,6	60,4	61,5	<u>62</u>	
<u>9.</u>	61,8	59,3	62	<u>61</u>	
<u>10.</u>	52,9	53,9	53,5	<u>53</u>	
<u>11.</u>	49,5	49	50	<u>50</u>	
<u>12.</u>	46,3	49,1	47	<u>47</u>	
<u>13.</u>	233	244	241	239	145 *
<u>14.</u>	221	202	212	212	
<u>15.</u>	200	188	190	193	
<u>16.</u>	179	180	182	180	
<u>17.</u>	249	227	238	238	
<u>18.</u>	209	205	206	207	
<u>19.</u>	185	183	187	185	
<u>20.</u>	168	167	170	168	



Obr. 50: Makroskopický snímek vtisků s hodnotami tvrdosti pro spoj DC05-HX260 [zdroj vlastní]

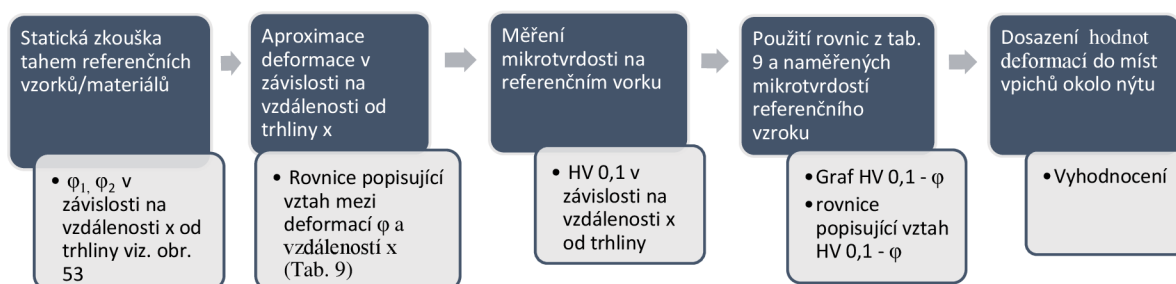
Tab. 8: Naměřené hodnoty tvrdosti pro kombinaci materiálů DC05-HX260

Tvrdost HV 0,1 pro kombinaci DC05-HX260					
Měření	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Střední hodnota tvrdosti	Tvrdost základního materiálu
<u>1.</u>	237	240	241	<u>239</u>	145 *
<u>2.</u>	224	242	235	<u>234</u>	
<u>3.</u>	218	233	225	<u>225</u>	
<u>4.</u>	249	268	258	<u>258</u>	
<u>5.</u>	260	256	261	<u>259</u>	
<u>6.</u>	215	226	220	<u>220</u>	
<u>7.</u>	215	231	223	<u>223</u>	
<u>8.</u>	217	210	212	<u>213</u>	
<u>9.</u>	212	217	220	<u>216</u>	
<u>10.</u>	177	170	173	<u>173</u>	
<u>11.</u>	186	192	190	<u>189</u>	
<u>12.</u>	192	194	196	<u>194</u>	
<u>13.</u>	171	155	173	166	
<u>14.</u>	135	137	140	<u>137</u>	
<u>15.</u>	120	127	122	<u>123</u>	
<u>16.</u>	123	133	130	<u>129</u>	
<u>17.</u>	151	155	153	153	
<u>18.</u>	131	138	140	136	
<u>19.</u>	106	108	105	<u>106</u>	
<u>20.</u>	151	144	146	<u>147</u>	

3.3.3 Získání závislosti mezi tvrdostí a deformací

V této fázi jsou známy tvrdosti kolem nýtu a pro zjištění závislosti mezi deformací a naměřenou tvrdostí je postupováno následovně (obr. 51):

- 1) Statická zkouška tahem referenčních vzorků/materiálů (DC05, HX260 a AW 6082), kde byla při bezkontaktním snímání jednoosého zatěžování získána skutečná deformace v závislosti na vzdálenosti od trhliny pouze v určitých místech (je potřeba znát změny v libovolném místě) (obr. 54-59).
- 2) Získání rovnic, které popisují závislost mezi deformací a vzdáleností od trhliny, v libovolném místě. Požadované vztahy byly získány aproximací naměřených hodnot z předchozího bodu (tab. 9). V této části je tedy známa míra deformace na vzdálenosti od trhliny.
- 3) Měření mikrotvrdostí na utržených referenčních vzorcích z tahové zkoušky. Zde byly zjištěny hodnoty tvrdosti na vzdálenosti od trhliny. Spojením předchozí a této části jsou výstupem tab. 10-12, ve kterých jsou spárovány hodnoty tvrdosti-vzdálenosti od trhliny-deformace.
- 4) Vytvoření grafů požadované závislosti mikrotvrdosti na deformaci (obr. 61).
- 5) Získání finálních rovnic popisujících změnu deformace na tvrdosti v jednotlivých materiálech (tab. 13), tyto rovnice byly zjištěny z grafu následným aproximováním hodnot vhodným polynomem.



Obr. 51: Metodika pro zkalibrování deformace s tvrdostí - schématicky

Statická zkouška tahem referenčních vzorků

Před trhací zkouškou byly nastříhány 3 referenční vzorky, s rozměry a tvary dle normy EN ISO 6892-1 z materiálu DC05, HX260 a EN AW 6082. V dalším kroku bylo potřeba na zkušební vzorky nanést patern-vzor (obr. 52), kterého se bude chytat skenovací zařízení. Patern byl aplikován černý sprejem, pomocí rozstříku kapiček. Pro tuhle bezkontaktní analýzu deformace byl použit dvoukamerový systém Sobriety se dvěma světly (obr. 53).



Obr. 52: Zkušební vzorek s paternem [zdroj vlastní]

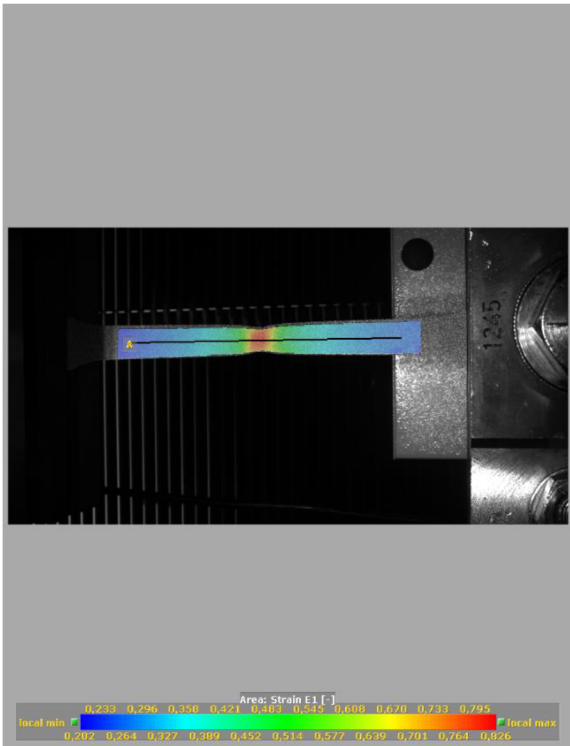


Obr. 53: Skenovací zařízení Sobriety [zdroj vlastní]

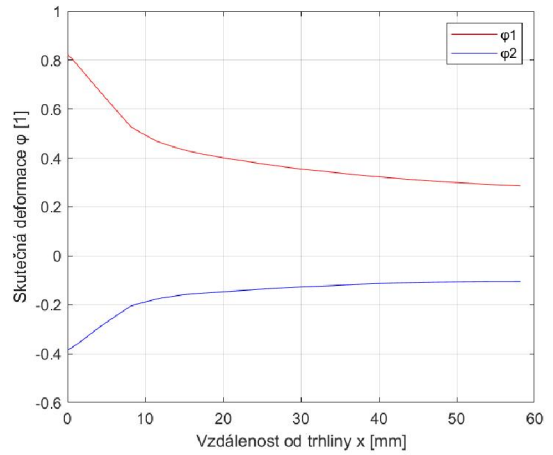
Průběh statické tahové zkoušky probíhal v souladu s normou EN ISO 6892-1 a je popsán v kapitole 3.1. Rychlost posuvu příčnicku byla nastavena na 15mm/min. Výstupem nebyla závislost napětí na prodloužení, ale závislost skutečné deformace na vzdálenosti, kterou nám změřil skenovací systém. Následný výpočet proběhl v programu MercuryRT.

Výstupem ze softwaru byl pro každý vzorek-materiál graf skutečné deformace na vzdálenosti a vizuální průběh deformace v celém vzorku. Hodnoty pro graf byly vygenerovány z posledního snímku před trhlinou (místo největší skutečné deformace) a z místa řezu A viz. obr. 54. Graf byl zhotoven pouze pro jednu polovinu vzorku, protože deformace v materiálu jsou na obě strany od trhliny symetrické (obr. 55).

Materiál DC05:

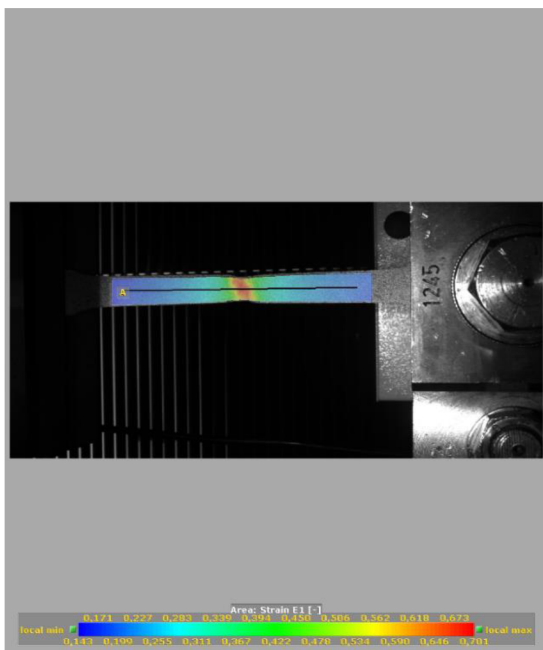


Obr. 54: Průběh deformace v DC05 [zdroj vlastní]

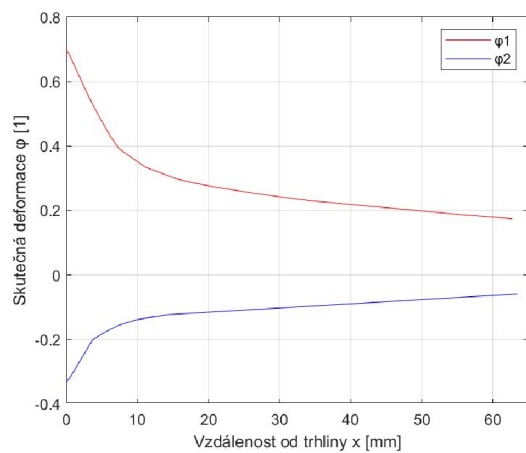


Obr. 55: Graf závislosti deformace na vzdálenosti v DC05 [zdroj vlastní]

Materiál HX260:

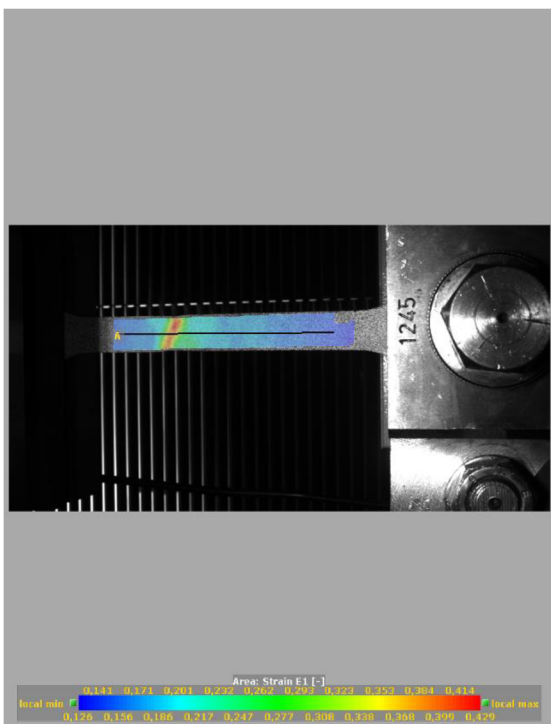


Obr. 56: Průběh deformace v HX260 [zdroj vlastní]

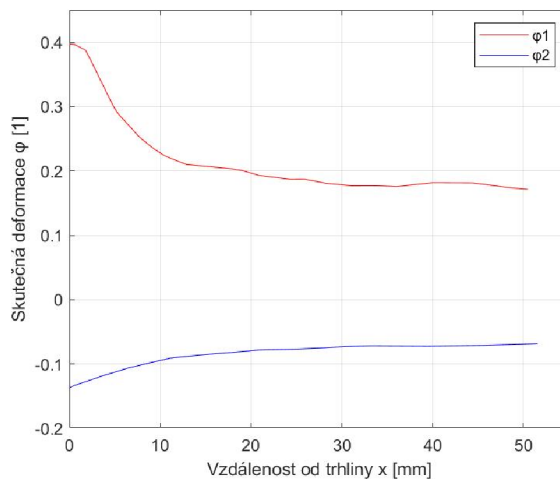


Obr. 57: Graf závislosti deformace na vzdálenosti v HX260 [zdroj vlastní]

Materiál AW 6082:



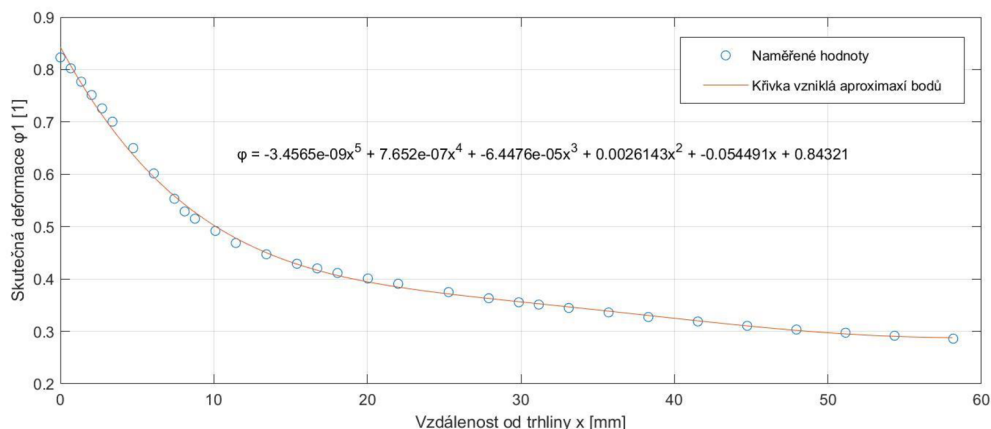
Obr. 58: Průběh deformace v AW 6082 [zdroj vlastní]



Obr. 59: Graf závislosti deformace na vzdálenosti v AW 6082 [zdroj vlastní]

Rovnice popisující vztah mezi deformací a vzdáleností od trhliny

Nyní máme 3 grafy pro 3 zkoušené materiály, ale z těchto grafů nelze přiřadit na libovolné vzdálenosti x od trhliny odpovídající skutečnou deformaci ϕ_1 a ϕ_2 . To je nutné protože na vzorku po statické zkoušce tahem byla zjišťována mikrotvrdost v libovolné vzdálenosti x od trhliny, ke které je právě potřeba přiřadit hodnotu deformace. Tento problém byl vyřešen proložení naměřených hodnot polynomickou křivkou n -tého stupně, která nejlépe pasovala do naměřených hodnot. Pro polynomickou křivku byla vytvořena i její rovnice, kterou potřebujeme pro popis vztahu mezi skutečnou deformací a vzdáleností od trhliny v libovolném místě. Na obr. 60 je uveden příklad pro materiál DC05 pro křivku ϕ_1 . Ostatní byly vytvořeny stejným způsobem a jsou zapsány v tab. 9.



Obr. 60: Aproximace bodů křivkou v DC05 na křivce φ_1 [zdroj vlastní]

Tab. 9: Rovnice popisující vztah mezi φ -x pro materiály DC05, HX260 a AW 6082

Materiál	Deformace	Vztah mezi φ a x
DC05	φ_1	$\varphi_1 = -3,4565 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 + 7,652 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 - 6,4476 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,0026143 \cdot x^2 - 0,054491 \cdot x + 0,84321$
	φ_2	$\varphi_2 = 3 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 - 6 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,0018 \cdot x^2 + 0,0343 \cdot x - 0,3982$
HX260	φ_1	$\varphi_1 = -8 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 - 0,0001 \cdot x^3 + 0,0038 \cdot x^2 - 0,0639 \cdot x + 0,7107$
	φ_2	$\varphi_2 = -3 \cdot 10^{-6} \cdot x^6 + 5 \cdot 10^{-8} \cdot x^5 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 0,0002 \cdot x^3 - 0,0042 \cdot x^2 + 0,0467 \cdot x - 0,3366$
AW 6082	φ_1	$\varphi_1 = -9 \cdot 10^{-10} \cdot x^6 + 10^{-7} \cdot x^5 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 0,0001 \cdot x^3 - 0,0006 \cdot x^2 - 0,0215 \cdot x + 0,4118$
	φ_2	$\varphi_2 = 3 \cdot 10^{-10} \cdot x^5 - 7 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0003 \cdot x^2 + 0,0063 \cdot x - 0,1374$

Měření mikrotvrdomosti na vzorku ze statické zkoušky tahem

Měření proběhlo na utržené půlce vzorku z tahové zkoušky (půlka, protože předpokládáme na obě strany od trhliny symetrický vývoj deformace) pro 3 zkoumané materiály. Nejprve byl ze vzorků vytvořen metalografický výbrus, vzorek byl pro preparaci rozříznut v místě řezu A dle obr. 54 o délce 50 mm. Podrobný popis tvorby metalografického výbrusu viz kapitola 3.3.1.

Hodnoty mikrotvrdomosti na metalografickém výbrusu pro materiály DC05, HX260 a AW 6082 byly změřeny ve vzdálenosti x od trhliny na mikrotvrdoměru Qness viz kapitola 3.3.2. V blízkosti trhliny byly vtisky umisťovány blíže k sobě, protože v této oblasti dochází k velkým změnám deformace. Naopak dále od trhliny jsme rozteč vtisků zmenšovali, protože zde už k takovým razantním změnám nedocházelo viz obr. 60.

Ze statické zkoušky tahem referenčních vzorků byly získány hodnoty deformace φ_1 a φ_2 na vzdálenosti x , ale po následujícím měření mikrotvrdomosti na referenčním vzorku nelze spárovat hodnoty φ_1 a φ_2 s mikrotvrdomostí, protože tyto deformace jsou v různých směrech, a to při měření tvrdosti na metalografickém výbrusu není rozeznáno. Z tohoto důvodu byl proveden přepočít na intenzitu deformace φ_i pomocí vztahů (4) a (5), výsledky jsou zapsány v tab. 10-12.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (4)$$

kde značí: φ_1 – skutečná deformace ve směru šířky vzorku [1],

φ_2 – skutečná deformace ve směru tloušťky vzorku [1],

φ_3 – skutečná deformace ve směru délky vzorku [1],

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \quad (5)$$

kde značí: φ_i – intezita deformace [1],

V tabulkách 10-12 jsou uvedeny změřené hodnoty mikrotvrdomosti HV 0,1 a vzdálenost od trhliny x , na které byly jednotlivé vtisky měření umístěny. Dále se v tabulce nachází vypočtené hodnoty deformace φ_1 a φ_2 dle vztahů z tab. 9, φ_3 dle rovnice (4) a φ_i dle rovnice (5)

Tab. 10: Naměřené a vypočtené hodnoty pro materiál DC05

DC05					
Naměřené hodnoty		Spočítané hodnoty			
HV 0,1	x [mm]	$\phi 1$ [1]	$\phi 2$ [1]	$\phi 3$ [1]	ϕi [1]
195	0,2	0,8420	-0,39	-0,452	0,8429
194	0,4	0,8456	-0,38	-0,466	0,8456
193	0,6	0,8392	-0,37	-0,469	0,8392
190	0,8	0,8220	-0,3719	-0,450	0,8220
189	1	0,8206	-0,3657	-0,455	0,8206
187	1,2	0,7898	-0,3595	-0,430	0,7898
185	1,4	0,7909	-0,3536	-0,437	0,7909
183	1,6	0,7681	-0,3477	-0,420	0,7681
180	1,8	0,7510	-0,342	-0,409	0,7510
176	2	0,7210	-0,3364	-0,385	0,7210
173	4	0,6619	-0,2868	-0,375	0,6619
170	6	0,5953	-0,2472	-0,348	0,5953
168	8	0,5736	-0,2158	-0,358	0,5736
166	10	0,5246	-0,1909	-0,334	0,5246
165	12	0,4656	-0,1711	-0,294	0,4656
164	14	0,4464	-0,155	-0,291	0,4464
162	19	0,4048	-0,1461	-0,259	0,4048
161	24	0,3807	-0,138	-0,243	0,3807
161	29	0,3817	-0,126	-0,256	0,3817
160	34	0,3490	-0,121	-0,228	0,3490
160	39	0,3434	-0,113	-0,230	0,3434
158	41,5	0,3210	-0,1108	-0,210	0,3210
157	50	0,2735	-0,1057	-0,168	0,2735
156	60	0,2632	-0,103	-0,160	0,2632

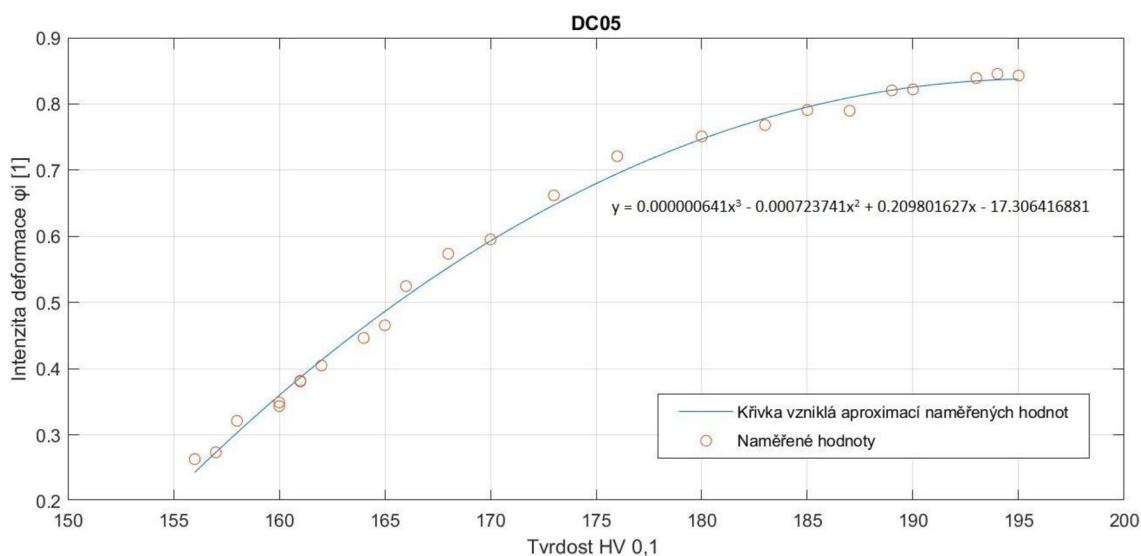
Tab. 11: Naměřené a vypočtené hodnoty pro materiál HX260

HX260					
Naměřené hodnoty		Spočítané hodnoty			
HV 0,1	x [mm]	$\phi 1$ [1]	$\phi 2$ [1]	$\phi 3$ [1]	ϕi [1]
258	0,2	0,6981	-0,3274	-0,3707	0,6985
254	0,4	0,6857	-0,3186	-0,3671	0,6863
248	0,6	0,6737	-0,31	-0,3637	0,6744
238	0,8	0,662	-0,3018	-0,3602	0,6629
231	1	0,6505	-0,2939	-0,3566	0,6515
224	1,2	0,6393	-0,2863	-0,353	0,6405
223	1,4	0,6284	-0,2789	-0,3495	0,6297
220	1,6	0,6178	-0,2719	-0,3459	0,6193
217	1,8	0,6074	-0,2651	-0,3423	0,6090
214	2	0,5973	-0,2587	-0,3386	0,5991
210	4	0,51	-0,2177	-0,2923	0,5118
209	6	0,445	-0,175	-0,27	0,4484
209	8	0,3994	-0,155	-0,2444	0,4027
208	10	0,37	-0,138	-0,232	0,3740
206	12	0,35	-0,131	-0,219	0,3537
205	14	0,31	-0,129	-0,181	0,3115
202	19	0,28	-0,11	-0,17	0,2821
202	24	0,25	-0,101	-0,149	0,2515
200	29	0,24	-0,09	-0,15	0,2425
199	34	0,2301	-0,085	-0,1451	0,2327
199	39	0,228	-0,08	-0,148	0,2314
198	41,5	0,2	-0,079	-0,121	0,2015
198	50	0,185	-0,07	-0,115	0,1868
198	60	0,175	-0,06	-0,115	0,1779

Tab. 12: Naměřené a vypočtené hodnoty pro materiál AW 6082

AW 6082					
Naměřené hodnoty		Spočítané hodnoty			
HV 0,1	x [mm]	$\phi 1$ [1]	$\phi 2$ [1]	$\phi 3$ [1]	ϕi [1]
62,8	0,5	0,4	-0,1343	-0,2657	0,4071
59,1	1	0,3898	-0,1314	-0,2584	0,3966
58,7	1,5	0,3785	-0,1286	-0,2499	0,3849
56,3	2	0,3671	-0,126	-0,2411	0,3731
56,3	2,5	0,3556	-0,1234	-0,2322	0,3611
56,3	3	0,3441	-0,121	-0,2231	0,3491
56,1	3,5	0,3325	-0,1188	-0,2137	0,3370
55,7	4	0,3209	-0,1166	-0,2043	0,3249
55,5	4,5	0,309	-0,1146	-0,1944	0,3124
55,1	5	0,2977	-0,111	-0,1867	0,3009
53,2	7	0,251	-0,1001	-0,1509	0,2527
53,2	9	0,23	-0,096	-0,134	0,2310
52,5	11	0,22	-0,0907	-0,1293	0,2211
52,4	13	0,21	-0,0897	-0,1203	0,2107
52,3	15	0,207	-0,088	-0,119	0,2078
52,3	17	0,205	-0,083	-0,122	0,2062
52,3	22	0,19	-0,077	-0,113	0,1911
52,1	27	0,182	-0,075	-0,107	0,1829
51,9	32	0,177	-0,0716	-0,1054	0,1781
51,5	37	0,1814	-0,0724	-0,109	0,1826
51,4	42	0,181	-0,0718	-0,1092	0,1823
51,4	50	0,171	-0,0682	-0,1028	0,1722
50,8	60	0,1701	-0,061	-0,1091	0,1724

Po naměření mikrotvrdotí na třech referenčních vzorcích a spočítání deformací byl vytvořen graf popisující závislost mezi tvrdostí HV 0,1 a intenzitou deformace pro jednotlivé materiály. Naměřené hodnoty aproximujeme vhodným stupněm polynomické křivky a necháme si zobrazit rovnici, která určuje numerickou závislost mezi tvrdostí a intenzitou deformace. Rovnice jsou potřeba pro popis vztahu mezi intenzitou deformace a tvrdostí v libovolném místě na zkoumaném výbrusu kolem nýtu. Na obr. 61 je uveden příklad pro materiál DC05. Ostatní byly vytvořeny stejným způsobem a jejich rovnice jsou zapsány v tab. 13.



Obr. 61: Graf ϕ_i - HV 0,1 [zdroj vlastní]

Tab. 13: Rovnice popisující vztah mezi HV- ϕ pro materiály DC05, HX260 a AW 6082

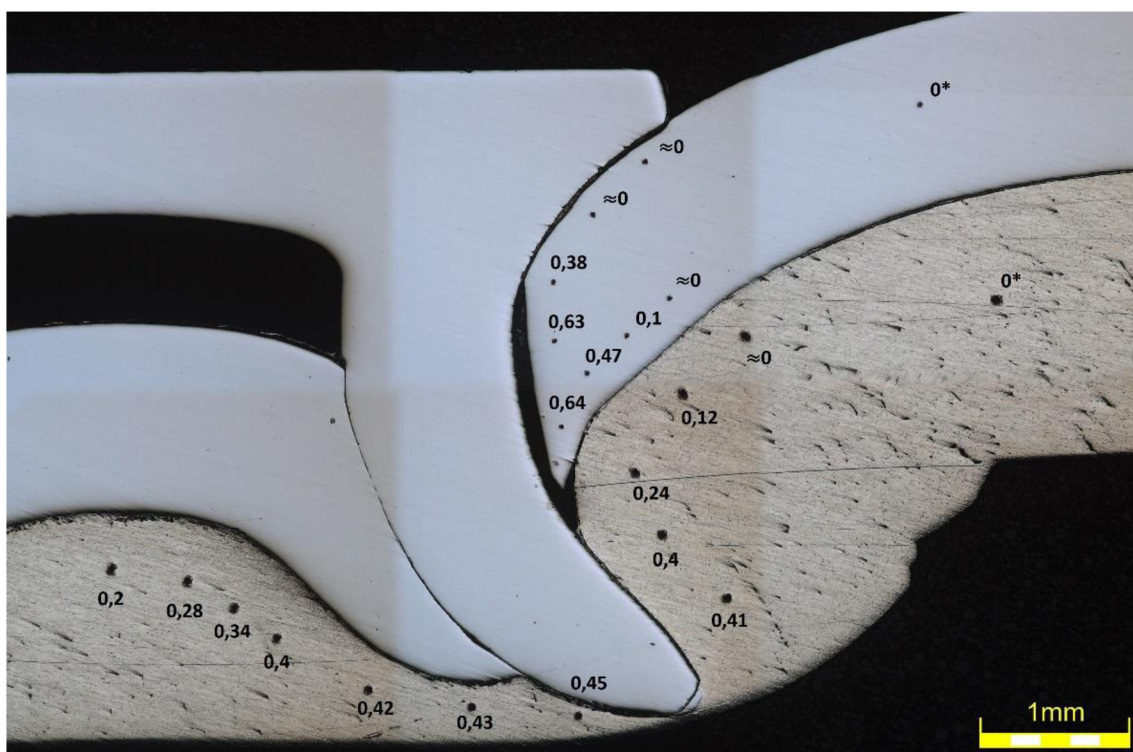
Materiál	Vztah mezi HV a ϕ
DC05	$\phi_i = 0,000000641 \cdot HV^3 - 0,000723741 \cdot HV^2 + 0,20980163 \cdot HV - 17,306416881$
HX260	$\phi_i = 0,00000423 \cdot HV^3 - 0,00314469 \cdot HV^2 + 0,77849891 \cdot HV - 63,5421356$
AW 6082	$\phi_i = -0,00216984 \cdot HV^2 + 0,2689477 \cdot HV - 7,92052647$

3.3.4 Určení deformace materiálu okolo nýtu

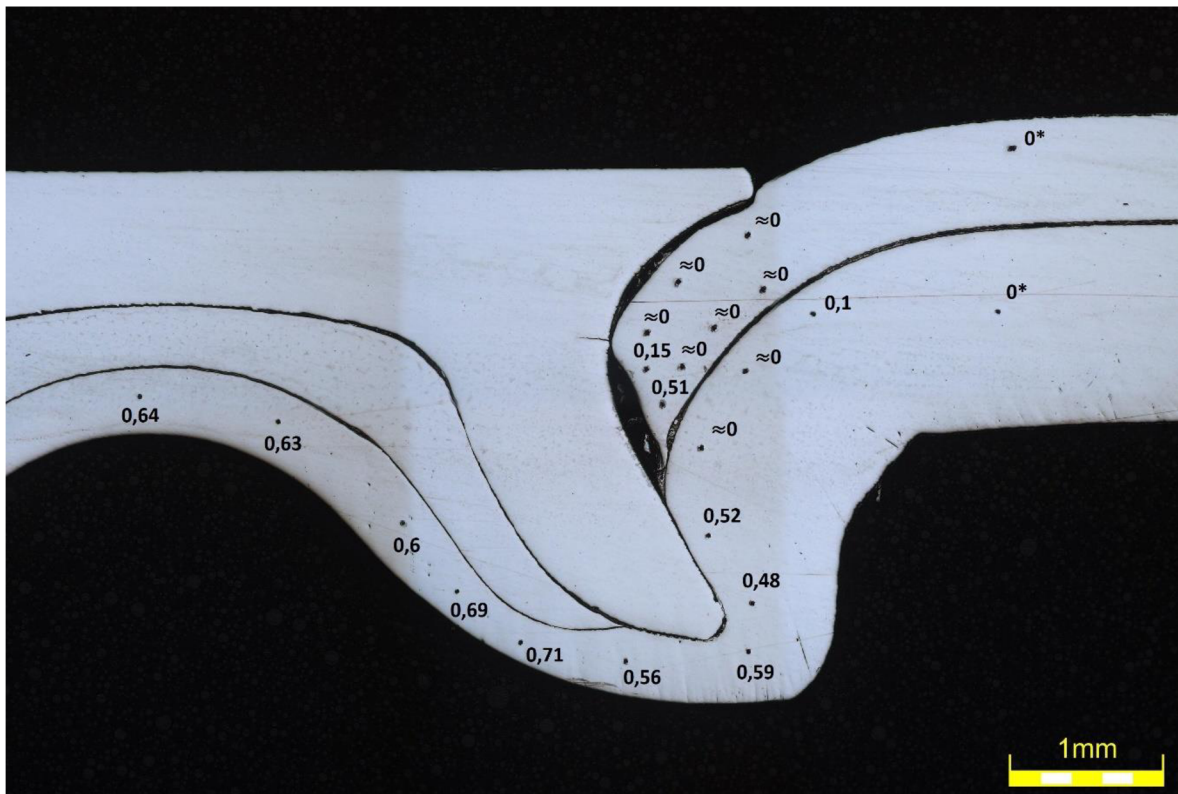
Způsobené deformace v materiálu kolem zalisovaného nýtu byly zjištěny dosazením naměřených tvrdostí z tab. 7 a tab. 8 do rovnic určujících závislost mezi tvrdostí HV a deformací φ_i z tab. 13, kde jsou 3 rovnice pro 3 materiály. Podle kapitoly 3.2.2 je určen správný druh materiálu.

Vypočítané deformace jsou zapsány do makroskopického snímku těsného okolí kolem nýtu pro spoj DC05 – HX260 (obr. 63) a pro spoj HX260 – AW 6082 (obr. 62). Tyto zjištěné hodnoty vychází z dříve naměřených tvrdostí, tudíž velikosti deformací jsou zapsány do míst vpichů.

Ze zkoušky tahem referenčních vzorků nebyl zjištěn celý potřebný interval tvrdostí pro popis deformace kolem nýtu, okolí nýtu bylo namáháno tlakem. Mimo tento interval nelze použít rovnice závislosti deformace na tvrdosti (tab. 13), protože není známo, jakým směrem se mimo tyto hodnoty zakřivuje polynomická křivka. Problém vznikl, při menších velikostech tvrdostí, kde tyto hodnoty nebyly obsáhlé z měření referenčního vzorku. Tudíž při těchto malých hodnotách tvrdostí, které se limitně blížily k tvrdostem neovlivněného materiálu, je deformace zapsána jako přibližně nula „ ≈ 0 “. Hvězdičkou jsou označeny deformace neovlivněných míst v materiálu.



Obr.62: Makroskopický snímek vtisků s hodnotami deformací pro spoj HX260 – AW 6082 [zdroj vlastní]



Obr.63: Makroskopický snímek vtisků s hodnotami deformací pro spoj DC05 – HX260 [zdroj vlastní]

Jak lze vidět na popsaných makroskopických snímcích (obr. 62, obr. 63), tak k největším deformacím došlo ve spodním plechu v oblasti, kde se materiál přetvořil vlivem zalisování do matrice. K větší deformaci v této oblasti došlo u kombinace materiálů DC05-HX260, protože matrice pro ocel má výstupek-vedení pro správné rozevření nýtu a tento výstupek výrazně zvětšil deformace v materiálu. U kombinace DC05 – HX260 $\varphi_{HX260} = 0,56 - 0,71$ a u HX260 – AW 6082 $\varphi_{AW6082} = 0,2 - 0,45$.

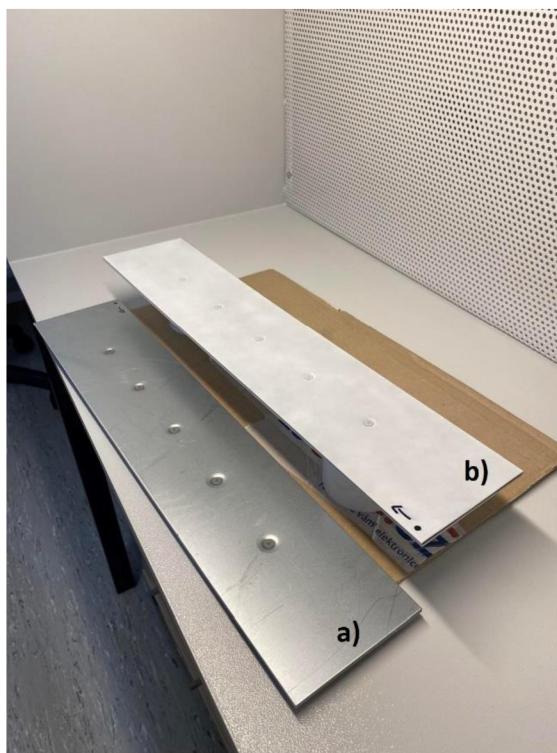
Další oblastí výrazných deformací pro obě kombinace, ve spodním plechu, je místo kolem špičky nýtu. Zde byl materiál z jedné strany deformován samotným nýtem a z druhé obvodovou hranou matrice. U kombinace DC05 – HX260 došlo k deformaci v tomto místě přibližně $\varphi_{HX260} = 0,59$ a při HX260 – AW 6082 došlo k přerušení materiálu a nejbližší změřená deformace byla zhruba $\varphi_{AW6082} = 0,45$.

Poslední významnou oblastí vysokých hodnot deformací je místo ve vrchním plechu, kde došlo k přerušení materiálu průnikem nýtu. Ve špičce odděleného materiálu deformace vystoupaly k hodnotám u DC05 – HX260 na $\varphi_{DC05} = 0,51$ a u HX260 – AW 6082 na $\varphi_{HX260} = 0,64$.

3.4 Zkouška rovinné deformace

3.4.1 Skenování povrchu

Příprava vzorků pro zkoušku rovinné deformace je popsána v kapitole 3.2. Před skenováním bylo nutné zmatnit povrch vzorků, protože kov má poměrně lesklý vzhled. Pro tuhle zkoušku využijeme delší vzorky 130x500 mm, které byly na pěti místech snýtovány v kombinaci 3x DC05 – HX260 a 3x HX260 – AW 6082. Zmatňování se provádí z důvodu ulehčení skenování povrchu. Mezi těžce skenovatelné povrchy, které je potřeba opatřit zmatňovací vrstvou patří například černé, lesklé nebo průhledné povrchy. Nástřík křídovým sprejem proběhl v odsávací komoře (obr. 64). Použitelnou alternativou pro křídový nástřík může být sublimační nebo titanový nástřík.

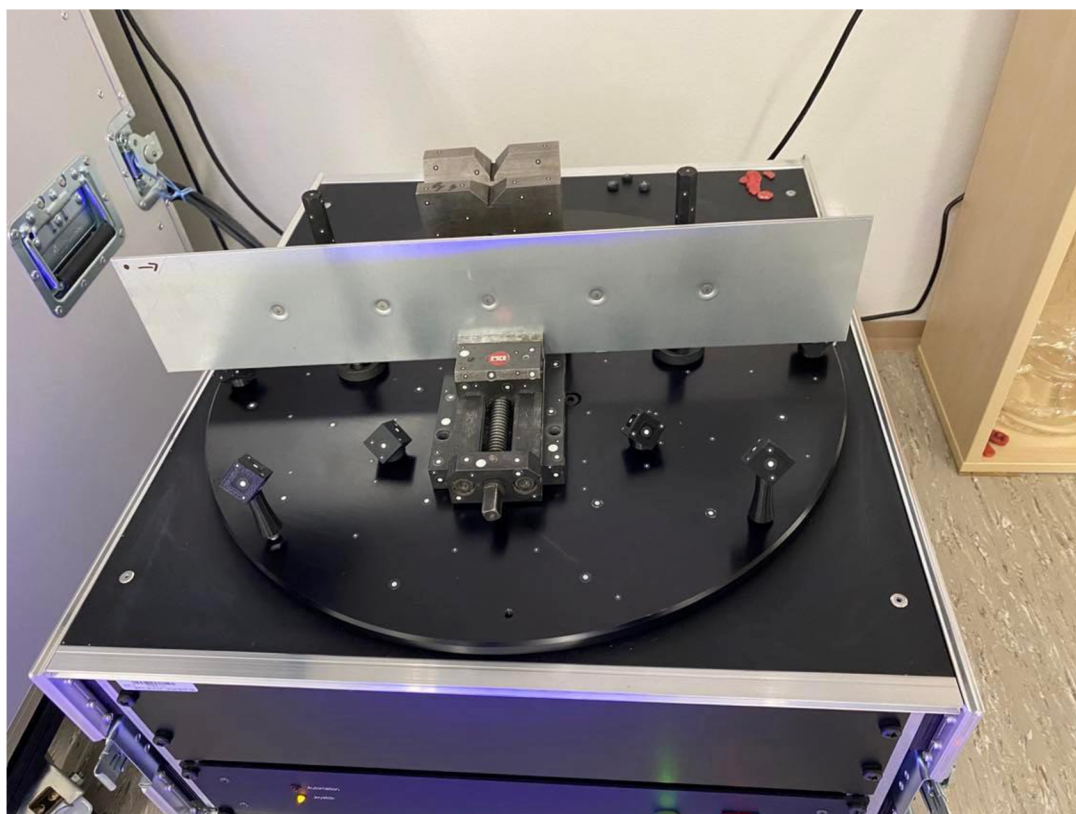


a) povrch před zmatněním
b) zmatněný povrch

Obr. 64: Vzorky před a po nástříku v odsávací komoře

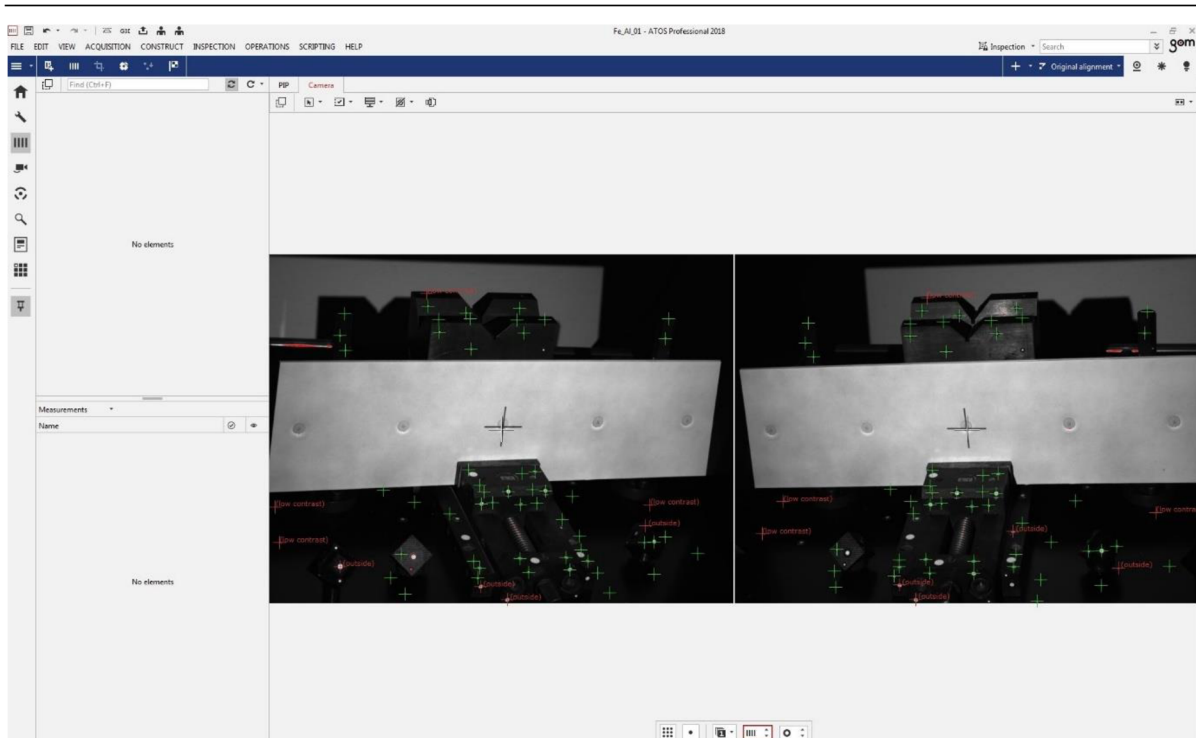
Naskenování povrchu proběhlo za použití dvou kamerového zařízení Atos 3 triplexscan s objektivy MV 320. Tento systém je určen zejména pro statické úlohy. Skenování bylo nutné provést z důvodu, že deformace povrchu vzorku byly zkoumány bezkontaktně. Měřený vzorek je zdigitalizován.

Nakřídované vzorky byly lehce upnuty – položeny do svěráku na otočném stole měřicího zařízení. V dalším kroku bylo nutné opatřit měřené vzorky fotoreferenčními body o průměru 1,5 mm. Pro dostačující přesnost musí být při otočení kamery alespoň 1/3 vzorku v překrytu s předchozím snímkem, aby bylo možné naskládat snímky. Toto skládání je umožněno díky zmíněným fotoreferenčním bodům, kterých se chytá kamera. Avšak v našem případě nebyly body lepeny přímo na vzorky, ale body byl opatřen svěrák a otočný stůl, protože vzorků bylo dohromady 6 a tímto došlo k zjednodušení a zrychlení pro následující vzorky (obr. 65).

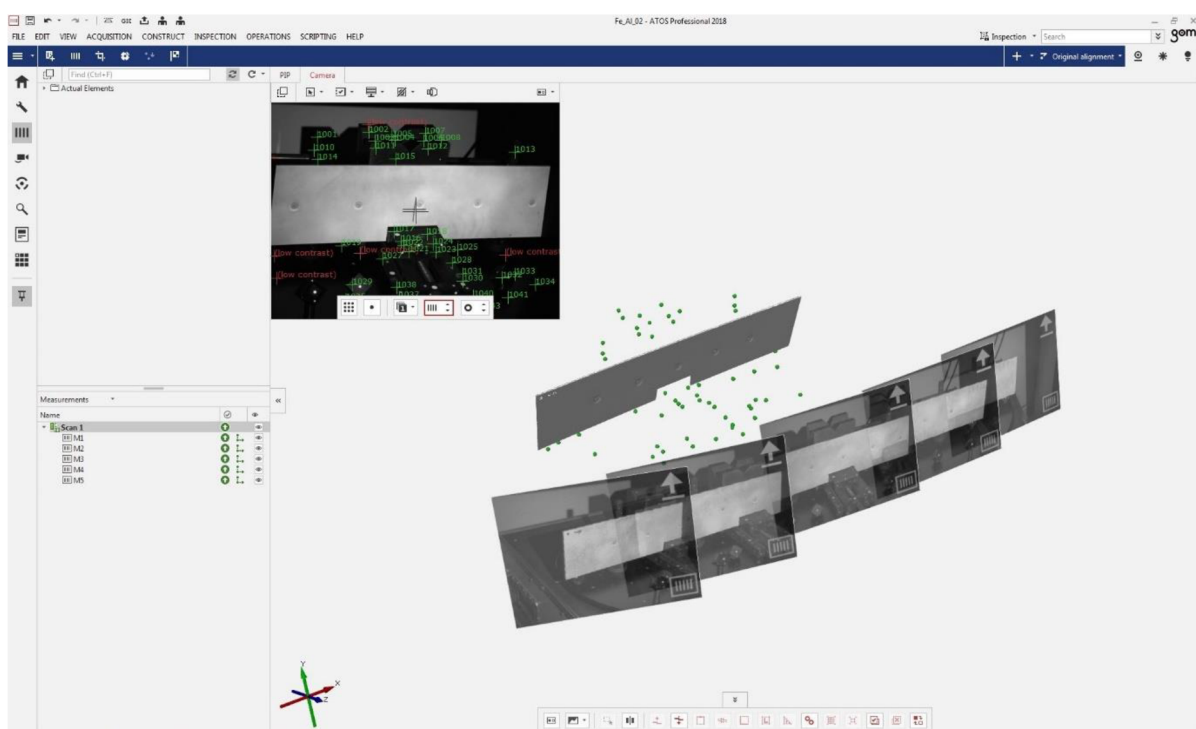


Obr. 65: Upnutý vzorek na otočném stole opatřený fotoreferenčními body [zdroj vlastní]

Dále už měření probíhalo pouze přes program Atos Professional, kde byla nejdříve nastavena správná expozice (obr. 66) a poté začalo samotné skenování. Jeden vzorek byl naskenován pomocí 5 snímků (obr. 67), kdy po každém snímku je nutné manuálně poposunout kameru na další část vzorku. Tímto způsobem byly zdigitalizovány 3 vzorky pro kombinaci DC05 – HX260 a 3 vzorky pro HX260 – AW 6082.



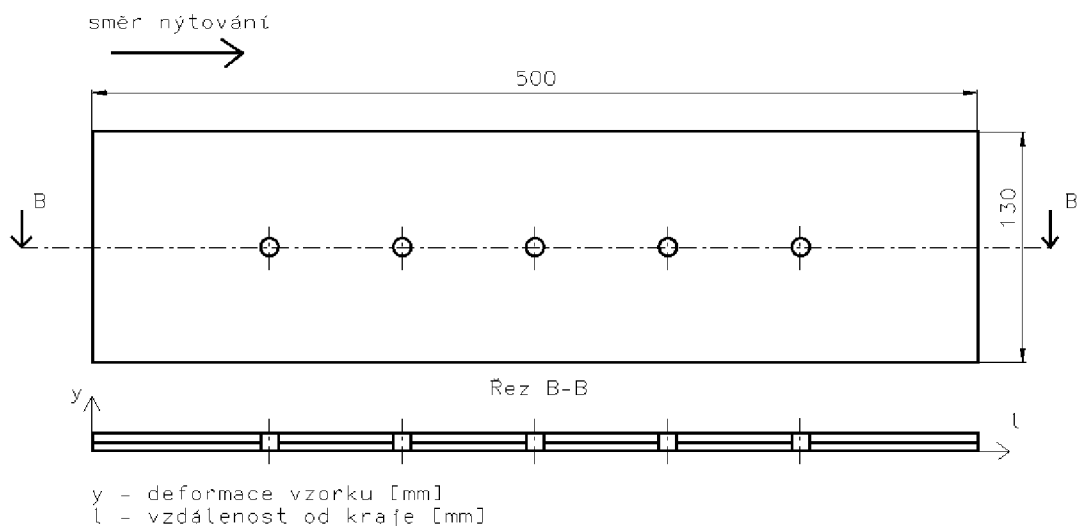
Obr. 66: Nastavení expozice měření [zdroj vlastní]



Obr. 67: Rozložení snímků na vzorku [zdroj vlastní]

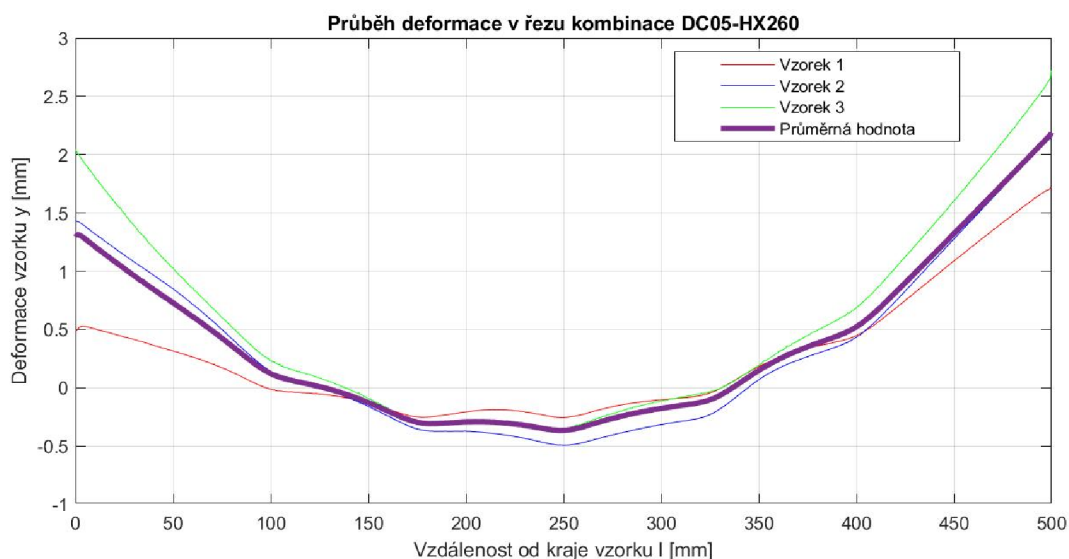
3.4.2 Srovnání naměřených deformací

Z naskenovaných dat jednotlivých vzorků byl vytvořen řez B-B, dále označováno pouze jako řez, středem vzorku skrz nýty (obr. 68) a z tohoto řezu program Atos Professional vygeneroval hodnoty deformace – průhybu vzorku y [mm] v závislosti na vzdálenosti l [mm] od kraje, směr nýtování byl zleva doprava.

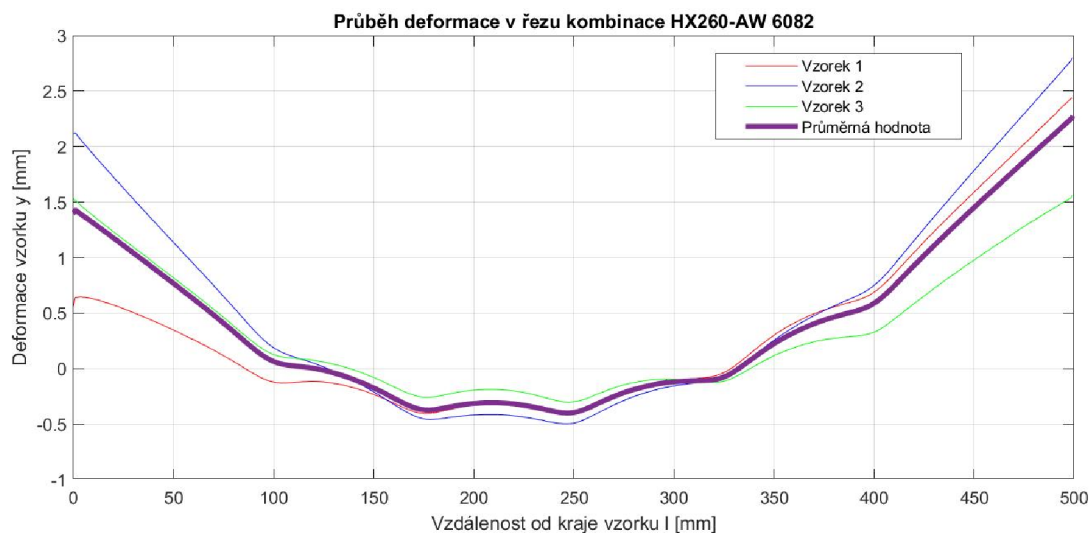


Obr. 68: Vzorek pro zkoušku rovinné deformace se zkoumaným řezem [zdroj vlastní]

Z vygenerovaných hodnot deformace na vzdálenosti od kraje vzorku byly v dalším kroku vytvořeny srovnávací grafy pro 3 zkušební vzorky s jejich průměrnou hodnotou deformace kombinace DC05 – HX260 (obr. 69) a pro kombinaci HX260 – AW 6082 (obr. 70).

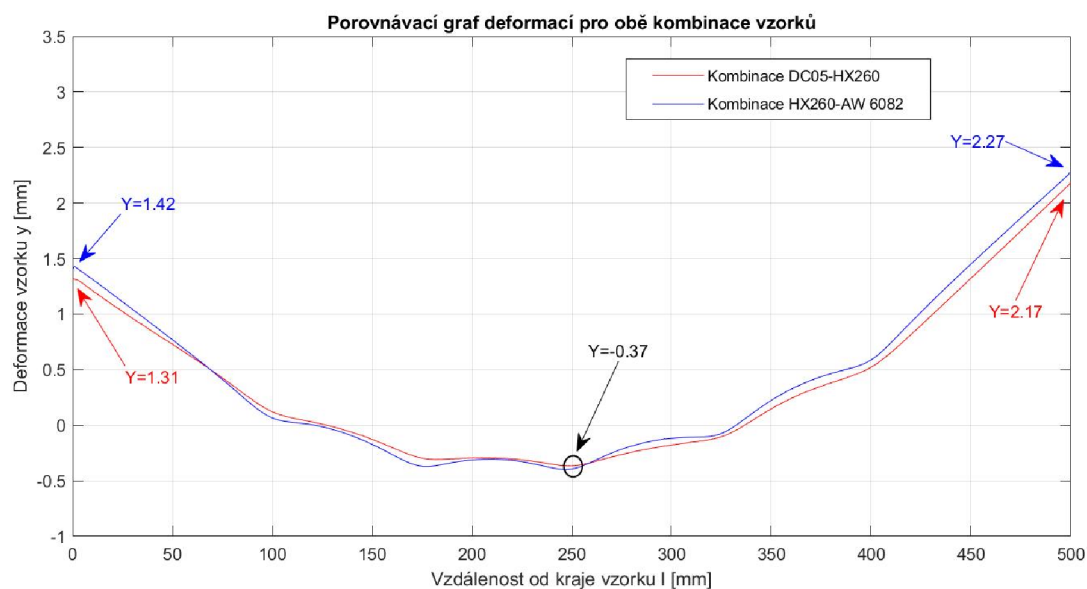


Obr. 69: Průběh deformace v řezu pro kombinaci DC05 – HX260 [zdroj vlastní]



Obr. 70: Průběh deformace v řezu pro kombinaci HX260 – AW 6082 [zdroj vlastní]

V posledním kroku bylo zapotřebí vytvořit jeden porovnávací graf, ve kterém bude zachycena průměrná hodnota deformací z obou zkoumaných kombinací (obr. 71). Následně je možné vizuálně porovnat průhyby těchto kombinací. V grafu jsou rovněž označeny a vypsány hodnoty extrémů deformací jednotlivých vzorků.

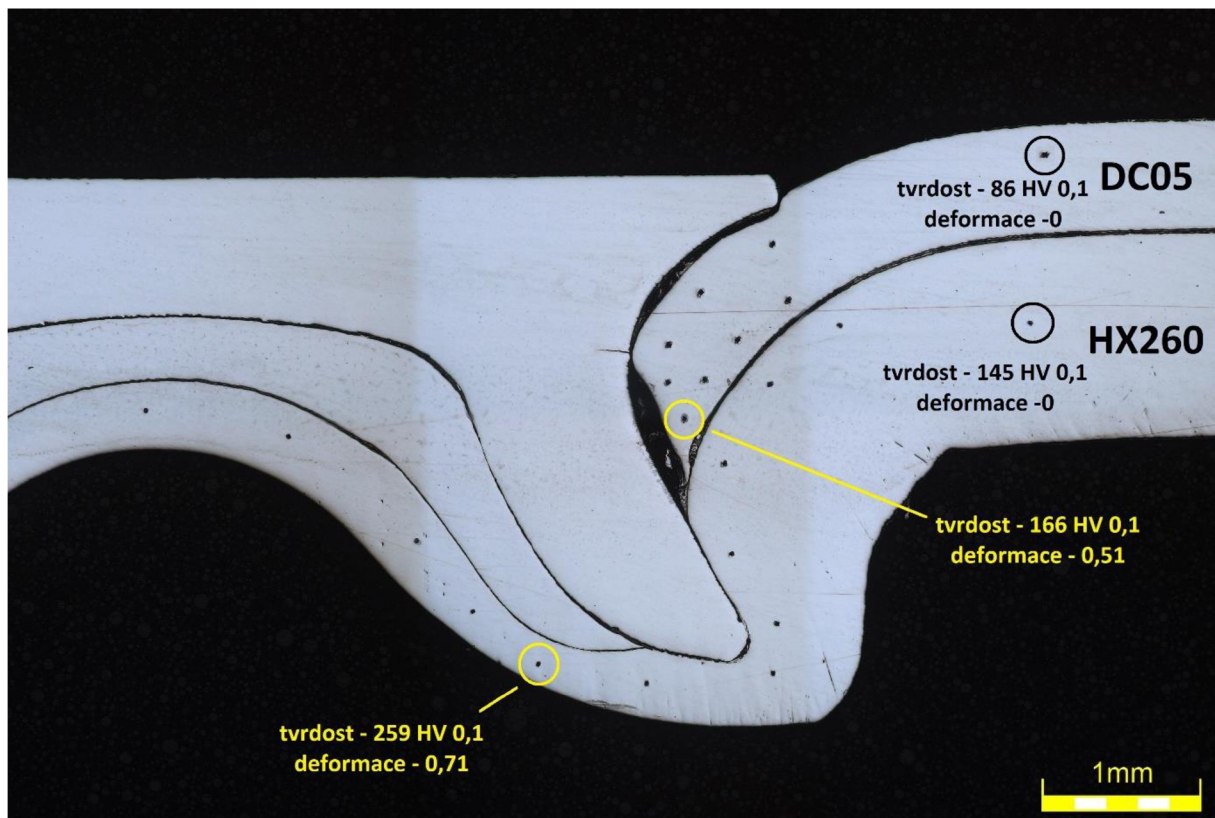


Obr. 71: Porovnávací graf deformací v řezu pro obě kombinace [zdroj vlastní]

4 Diskuze

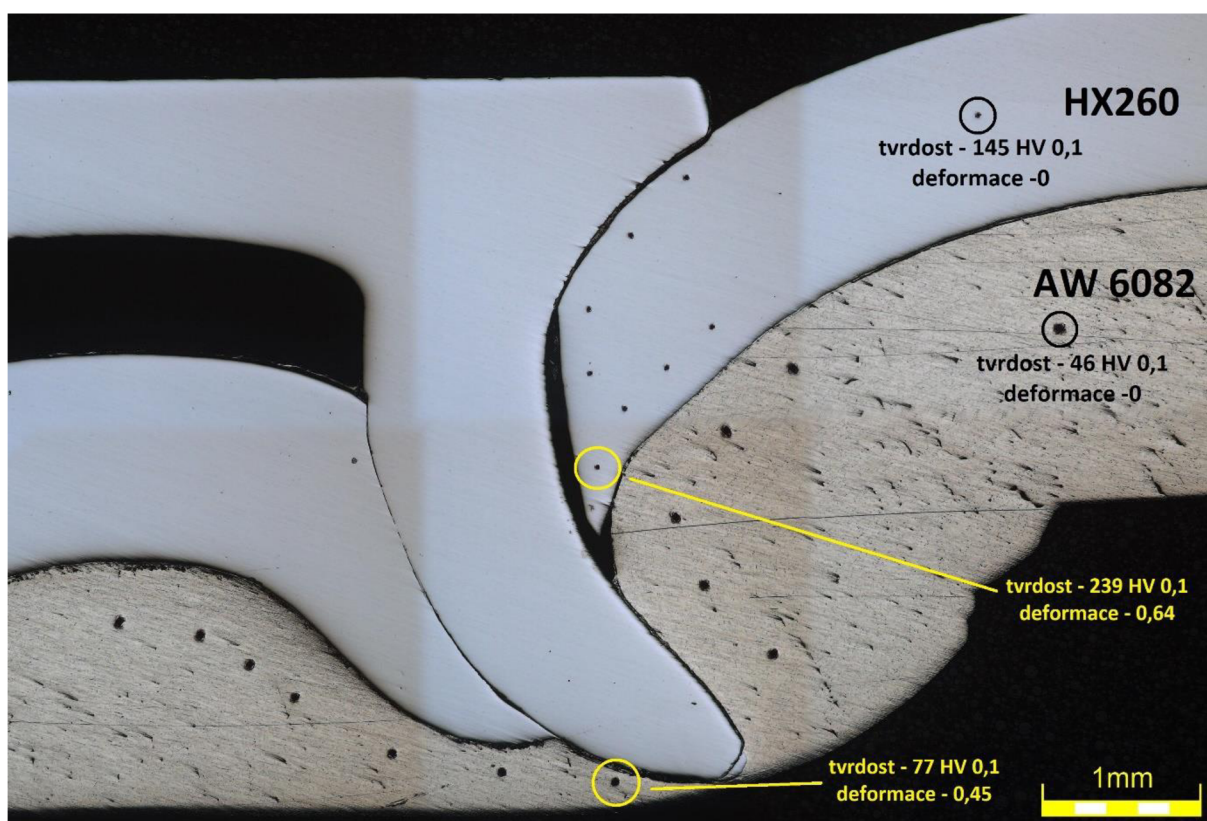
V první části experimentální práce byly pomocí statické zkoušky tahem zjišťovány mechanické vlastnosti testovaných materiálů HX260, DC05 a AW 6082. Naměřené hodnoty byly následně porovnávány s tabulkovými hodnotami deklarovanými výrobcí těchto materiálů. Vzájemným porovnáním tabulkových a naměřených hodnot nebyly zjištěny zjevné rozdíly. V souladu se zadáním bakalářské práce byly následně nastříhány a sýťovány vzorky pro deformační analýzy. Vzorky byly zhotoveny ve dvou kombinacích DC05 – HX260 a HX260 – AW 6082. Pro každou kombinaci byly zhotoveny 3 sady vzorků a vyhodnocení naměřených veličin deformace nýtových spojů bylo provedeno na základě vypočtených průměrných hodnot z těchto 3 měření.

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, v prvním případě byla deformace analyzována v bezprostředním okolí nýtového spoje. Pro tuto analýzu byla využita nepřímá metoda pomocí měření mikrotvrdomosti na metalografickém výbrusu. Z dostupných výsledků měření lze říci, že ve spoji kombinací materiálů DC05 – HX260 došlo ve spodním materiálu HX260 k největším deformacím v oblasti pod a kolem špičky nýtu tak jak je vidět na obrázku 63. V těchto místech byla zjištěna největší deformace $\varphi_{HX260} = 0,71$, což odpovídá naměřené tvrdosti 259 HV 0,1 (pro srovnání tvrdost neovlivněného - základního materiálu HX260 je 145 HV 0,1, tomu odpovídá ovlivnění vůči základnímu materiálu o 179%). Další oblast kritických deformací je v místě, kde došlo k přerušení vrchního plechu z materiálu DC05 vlivem zalisování nýtu, deformace v tomto cípu $\varphi_{DC05} = 0,51$ a tomu odpovídá naměřená tvrdost 166 HV 0,1 (tvrdost základního materiálu DC05 je 86 HV 0,1, ovlivnění v tomto místě vůči základnímu materiálu je o 193%). Místa největších deformací jsou uvedeny na obr. 72, celý průběh deformací kolem nýtu je vyobrazen na obr. 63.



Obr. 72: Místa největších deformací ve spoji DC05-HX260 [zdroj vlastní]

V druhé kombinaci HX260 – AW 6082 byly naměřeny největší hodnoty deformace ve dvou místech. Prvním kritickým místem je oblast kolem špičky nýtu, největší hodnota dosahovala velikosti $\varphi_{AW6082} = 0,45$, což odpovídá naměřené tvrdosti 77 HV 0,1 (tvrdost základního materiálu AW 6082 je 46 HV 0,1, ovlivnění materiálu v tomto vybraném místě vůči základnímu materiálu je o 167%). Druhým významným místem zvětšených deformací je podobně jako u předchozí kombinace oblast cípu, který vznikl přerušением horního plechu nýtem. Na špičce cípu byla zjištěna deformace $\varphi_{HX260} = 0,64$ a tomu odpovídá velikost naměřené tvrdosti 239 HV 0,1 (tvrdost základního materiálu HX260 je 145 HV 0,1, tomu odpovídá ovlivnění v tomto místě o 165%). Místa největších deformací jsou uvedeny na obr. 73, celý průběh deformací kolem nýtu je vyobrazen na obr. 62.



Obr. 73: Místa největších deformací ve spoji HX260 – AW 6082 [zdroj vlastní]

V druhé části experimentální práce bylo hlavním úkolem provést analýzu makrodeformací na vzorcích, do kterých bylo zalisováno 5 ks nýtů, tak jak je vidět obr 68. Makrodeformace testovaných vzorků byla analyzována bezkontaktní fotogrammetrickou metodou pomocí systému Atos 3 triplescan. Makrodeformace takto snýtovaných vzorků byla hodnocena pomocí průhybu vzorků. Při pohledu na obr. 71 je zjevné, že průhyby obou kombinací snýtovaných vzorků nejsou středově symetrické, ale vůči sobě určitou společnou symetrii vykazují. Tato středová nesymetrickost obou kombinací je způsobená lisováním nýtů od jednoho kraje ke druhému, nikoliv od středu ke krajům.

Z porovnávacího grafu obr. 71 je patrné, že obě kombinace se vlivem zalisování samoděrovacích nýtů více deformují, na pravé straně (pravá strana – konec nýtování). Pokud budeme brát průhyb vzorku jako rozdíl nejvyššího a nejnižšího bodu, tak pro kombinaci DC05 – HX260 činil maximální průhyb 2,54 mm a pro kombinaci HX260 – AW 6082 to bylo 2,64 mm. Při procentuálním porovnání obou testovaných kombinací je vidět, že vzorek DC05 – HX260 vykazuje o 5% větší průhyb.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat deformace v materiálu, které vznikly vlivem zalisování samoděrovacího nýtu pro kombinace materiálů DC05 – HX260 a HX260 – AW 6082.

V teoretické části práce byly uvedeny různé alternativy nýtového spoje, včetně rozebíratelných i nerozebíratelných spojů. Dále byly uvedeny možnosti měření tvrdosti a základy fotogrammetrie.

Praktická část byla rozdělena na tři fáze. V první společné fázi proběhla příprava vzorků pro následující experimenty. V druhé části byla zjišťována deformace materiálu v těsném okolí nýtu na metalografickém výbrusu. V poslední fázi bylo nahlíženo na deformace od nýtu z jiného úhlu pohledu. Zde bylo zjištěno, že použití metody bezkontaktního měření deformace k jakému průhybu vzorku došlo. Následně byly společně porovnány deformace od obou kombinací zkoumaných vzorků.

Na základě provedených experimentů lze dojít k závěru, že deformace kolem nýtu v obou kombinacích se soustřeďují v jeho extrémní blízkosti. Přibližně 1 mm a dále od kraje nýtu je zbytečné sledovat jakékoliv změny materiálu, protože v těchto oblastech již nedochází k žádným ovlivněním. Při zkoušce průhybu, který vznikl jako důsledek zalisování 5 ks nýtů, lze konstatovat, že vzorek o kombinaci materiálů HX260 – AW 6082 se přibližně o 5 % víc deformuje než spoj z ocelových plechů. Vzorek DC05 – HX260 z ocelových plechů vykazuje menší průhyb z důvodu větších pevností zvolených materiálů. Pro obě kombinace platí, že průhyb není středově symetrický, avšak je vidět společná symetrie obou vzorků při pohledu ve směru lisování nýtů.

Použitá literatura

- [1] *Rozebíratelné a nerozebíratelné spoje* | *Studijni-svet.cz* [online]. 4. říjen 2021 [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://studijni-svet.cz/rozebiratelne-a-nerozebiratelne-spoje/>
- [2] HUDEČEK, Marek. *SPOJOVÁNÍ DÍLCŮ TECHNOLOGIÍ TVÁŘENÍ - PDF Stažení zdarma* [online]. [vid. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/31696579-Spojovani-dilcu-technologie-tvareni.html>
- [3] SHIGLEY, Joseph E, Charles R MISCHKE a Thomas Hunter BROWN JR. *Standard handbook of machine design*. B.m.: McGraw-Hill Education, 2004. ISBN 0-07-144164-6.
- [4] PAGÁČ, Marek. Základní druhy šroubových spojů a jejich zobrazení na výkrese. *MujSolidworks.cz* [online]. 11. září 2013 [vid. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://www.mujsolidworks.cz/zakladni-druhy-sroubovych-spoju-a-jejich-zobrazeni-na-vykrese-2/>
- [5] KRŮŽ, Rudolf, Jiřina AUDYOVÁ, Karel WEIGNER a Rudolf DVOŘÁK. *Stavba a provoz strojů*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977. ISBN (Váz.).
- [6] ZELENÝ, Jiří. *Stavba strojů - strojní součásti: učebnice pro střední průmyslové školy*. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 2000. ISBN 80-7226-311-0.
- [7] ŠLUPINA, Miloš. *Spoje ve strojírenství. Kopřivnice [cit. 2019-02-24]*. 2019.
- [8] MÁLIK, Ladislav a Štefan MEDVECKÝ. *Části a mechanismy strojov*. 1. vyd. V Žiline: Žilinská univerzita, 2003. ISBN 80-8070-043-5.
- [9] SVOBODOVÁ, Magdalena. *Spoje a spojovací součásti* [online]. Dostupné z: https://www.sokolska.cz/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_13-09.pdf
- [10] JAGOŠOVÁ, Helena. *PERA A KLÍNY - přehled* [online]. [vid. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2920904/>
- [11] PAVLÍČEK, Zdeněk. *Perové spoje* [online]. Dostupné z: https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/01_Sada_spoje_a_spojovaci_soucasti/VY_32_INOVACE_01_08_Perove_spoje_druhy_per.pdf
- [12] *Spoje strojnictví* [online]. Dostupné z: http://www.79401.cz/strojnictvi/zkousky_pdf/zkousky_strojnictvi_B.pdf
- [13] BENEŠ, Libor. *Přehled svařování* [online]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
- [14] RAYNOCH, Jindřich. *Svařování* [online]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/SVA%C5%98OV%C3%81N%C3%8D-UT.pdf>

-
- [15] HLUCHÝ, M KOLOUCH a J PAŇÁK. R. Strojírenská technologie 2. Díl 1, Polotvary a jejich technologičnost. 2001.
- [16] *Metoda svařování MIG/MAG | Schinkmann s.r.o.* [online]. [vid. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>
- [17] RUŽA, Viliam. *Pájení*. B.m.: SNTL, Alfa, 1988.
- [18] *Lepení materiálů. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. - PDF Free Download* [online]. [vid. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11320650-Lepeni-materialu-rndr-libor-mrna-ph-d.html>
- [19] *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. [vid. 2022-11-23]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm#121
- [20] Nýt, nýtování. *oneindustry – průmyslový portál, výroba a technologie* [online]. [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/nyt-nytovani/>
- [21] ČERNOBILA, Luboš. *NÝTOVÁNÍ – VLASTNOSTI A DRUHY NÝTOVÝCH SPOJŮ* [online]. [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2593766/>
- [22] *13) Nýtování* [online]. [vid. 2022-11-26]. Dostupné z: <http://zak.iss-slany.cz/?id=220&action=detail&presenter=Material>
- [23] *Spoje a spojovací součásti* [online]. [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/208/02.html#1-2-1>
- [24] SVOBODOVÁ, Magdalena. *Nýtové spoje* [online]. Dostupné z: https://www.sokolska.cz/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_13-18.pdf
- [25] *Technické informace pro trhací nýty* [online]. [vid. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.heyman.cz/technicke-informace-trhaci-nyty>
- [26] *Polodutý nýt* [online]. [vid. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://cz.tox-pressotechnik.com/aplikace/spojovani-s-prvky/poloduty-nyt/>
- [27] KARATHANASOPOULOS, N., Kedar S. PANDYA a D. MOHR. An experimental and numerical investigation of the role of rivet and die design on the self-piercing riveting joint characteristics of aluminum and steel sheets. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, **69**, 290–302. ISSN 1526-6125. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jmapro.2021.07.049](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.07.049)
- [28] *RIVSET® self-pierce riveting systems for perfect joints | Böllhoff* [online]. [vid. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.boellhoff.com/de-en/products/assembly-technology/rivset-self-pierce-riveting-systems/>
- [29] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. B.m.: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [30] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. B.m.: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
-

-
- [31] MACEK, Karel, Petr ZUNA a KOLEKTIV. *Nauka o materiálu*. B.m.: Vydavatelství ČVUT, nedatováno.
- [32] *Zkoušky tvrdosti* [online]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [33] *Metoda Knoop | JD Dvořák - Zkušební technika* [online]. [vid. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/metoda-knoop>
- [34] *Fotogrammetrie, laserové skenování* [online]. Dostupné z: http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/geodezie/geodezie_2018/fotogrammetrie.pdf
- [35] VOLEK, Aleš. Dostupné z: https://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/240/Ales_Volek_DP.pdf
- [36] *Laussedat Biography* [online]. Dostupné z: <https://www.clge.eu/wp-content/uploads/2019/04/Laussedat-Biography.pdf>
- [37] BOHM, Jozef. *Fotogrammetrie* [online]. Dostupné z: <https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galerie-souboru/skripta/Fotogrammetrie.pdf>
- [38] *Fotogrammetrie základní pojmy, rozdělení, metody a využití* [online]. Dostupné z: <http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/kartografie/prednaska12.pdf>
- [39] *Fotogrammetrie* [online]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2009/Z8101/um/9030264/Fotogrammetrie_8.pdf
- [40] ČSN EN 10152: *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tvářeni za studena - Technické dodací podmínky*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [41] ČSN EN 10346: *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky pro tvářeni za studena - Technické dodací podmínky*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [42] ČSN 42 4400: *Slitina hliníku tvářená 42 4400 AlMgSi1Mn*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1981.

Seznam příloh

Příloha P1: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál AW 6082 pro směr odebrání 0°

Příloha P2: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál AW 6082 pro směr odebrání 45°

Příloha P3: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál AW 6082 pro směr odebrání 90°

Příloha P4: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál DC05 pro směr odebrání 0°

Příloha P5: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál DC05 pro směr odebrání 45°

Příloha P6: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál DC05 pro směr odebrání 90°

Příloha P7: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál HX260 pro směr odebrání 0°

Příloha P8: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál HX260 pro směr odebrání 45°

Příloha P9: Protokol statické zkoušky tahem pro materiál HX260 pro směr odebrání 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

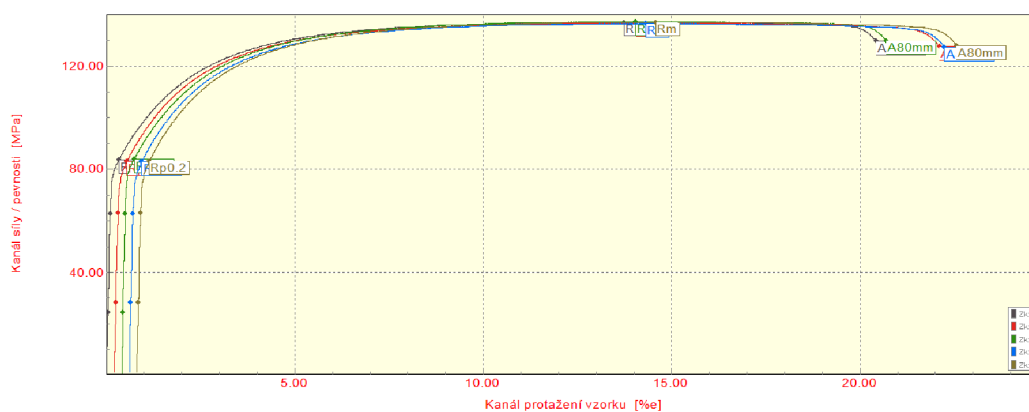
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : EN AW6082-O
Rozměry vzorku : [2 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 0°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
Vypracoval : Petr Grosman
Datum provedení testu : 18.1.2023
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	1.96	20.00	83.7	137.0	13.53	20.22
2	1.96	20.00	82.9	136.7	13.64	21.69
3	1.96	19.97	83.8	137.2	13.44	20.10
4	1.96	20.03	82.9	136.5	13.47	21.42
5	1.96	19.95	83.1	137.0	13.55	21.56

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	1.96	19.99	83.3	136.9	13.52	21.00
Směrodatná odchylka	0.00	0.03	0.4	0.3	0.08	0.77
Minimální hodnota	1.96	19.95	82.9	136.5	13.44	20.10
Maximální hodnota	1.96	20.03	83.8	137.2	13.64	21.69



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

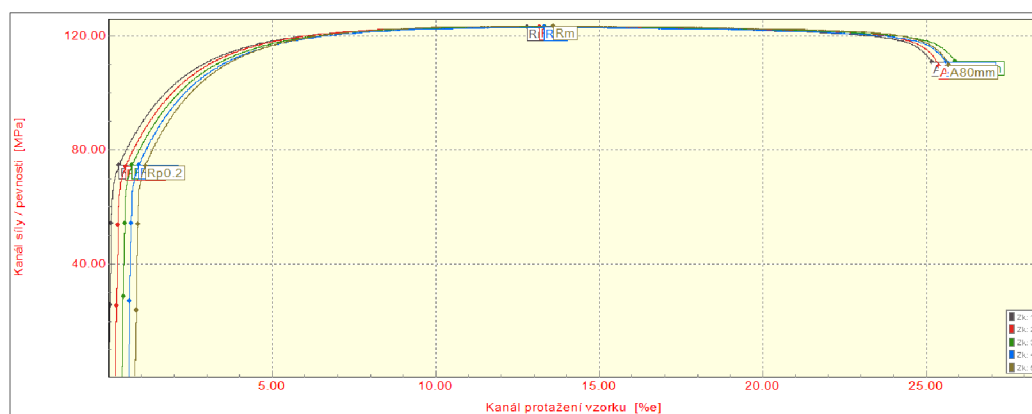
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : EN AW6082-O
Rozměry vzorku : [2 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 45°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
Vypracoval : Petr Grosman
Datum provedení testu : 18.1.2023
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	1.96	20.00	74.6	123.1	12.59	25.00
2	1.96	20.00	74.3	123.2	12.78	25.02
3	1.96	19.97	74.6	123.3	12.75	25.31
4	1.96	20.02	74.6	123.0	12.52	24.84
5	1.96	19.96	74.5	123.5	12.62	24.71

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	1.96	19.99	74.5	123.2	12.65	24.98
Směrodatná odchylka	0.00	0.02	0.2	0.2	0.11	0.23
Minimální hodnota	1.96	19.96	74.3	123.0	12.52	24.71
Maximální hodnota	1.96	20.02	74.6	123.5	12.78	25.31



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

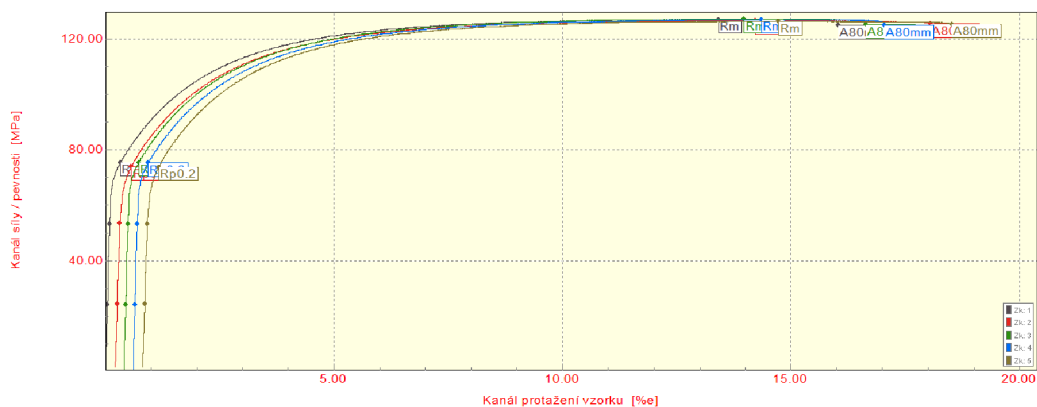
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : EN AW6082-O
Rozměry vzorku : [2 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
Vypracoval : Petr Grosman
Datum provedení testu : 18.1.2023
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	1.96	20.00	75.5	127.2	13.20	15.83
2	1.96	20.00	74.0	126.8	13.75	17.57
3	1.96	19.97	75.5	127.4	13.36	16.03
4	1.96	20.02	75.2	127.1	13.53	16.23
5	1.96	20.03	73.9	126.6	13.66	17.46

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	1.96	20.00	74.8	127.0	13.50	16.62
Směrodatná odchylka	0.00	0.02	0.8	0.3	0.22	0.83
Minimální hodnota	1.96	19.97	73.9	126.6	13.20	15.83
Maximální hodnota	1.96	20.03	75.5	127.4	13.75	17.57



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

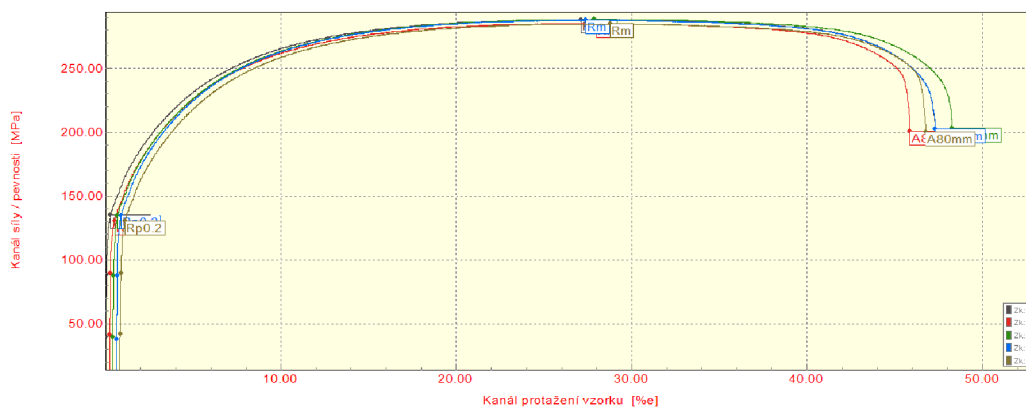
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC05 ZE 75/75 BP
Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 0°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
Vypracoval : Petr Grosman
Datum provedení testu : 18.1.2023
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	0.70	20.10	135.2	288.3	26.92	47.15
2	0.70	20.10	130.6	285.2	27.55	45.52
3	0.70	20.08	134.8	288.6	27.26	47.75
4	0.70	20.13	135.0	287.9	26.59	46.57
5	0.70	20.12	130.3	284.9	27.72	45.80

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.70	20.11	133.2	287.0	27.21	46.56
Směrodatná odchylka	0.00	0.02	2.5	1.8	0.46	0.93
Minimální hodnota	0.70	20.08	130.3	284.9	26.59	45.52
Maximální hodnota	0.70	20.13	135.2	288.6	27.72	47.75



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

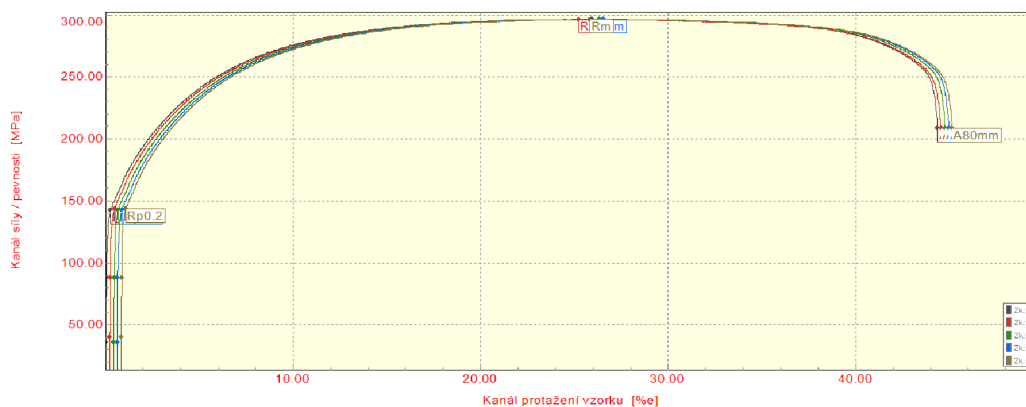
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC05 ZE 75/75 BP
 Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 45°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
 Vypracoval : Petr Grosman
 Datum provedení testu : 18.1.2023
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	0.70	20.10	142.5	296.4	25.78	44.26
2	0.70	20.10	143.4	296.2	24.88	44.24
3	0.70	20.10	142.5	296.4	25.78	44.26
4	0.70	20.10	142.5	296.4	25.78	44.26
5	0.70	20.10	143.4	296.2	24.88	44.24

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.70	20.10	142.8	296.3	25.42	44.25
Směrodatná odchylka	0.00	0.00	0.5	0.1	0.49	0.01
Minimální hodnota	0.70	20.10	142.5	296.2	24.88	44.24
Maximální hodnota	0.70	20.10	143.4	296.4	25.78	44.26



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
 Katedra strojírenské technologie
 Oddělení tváření kovů a plastů
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

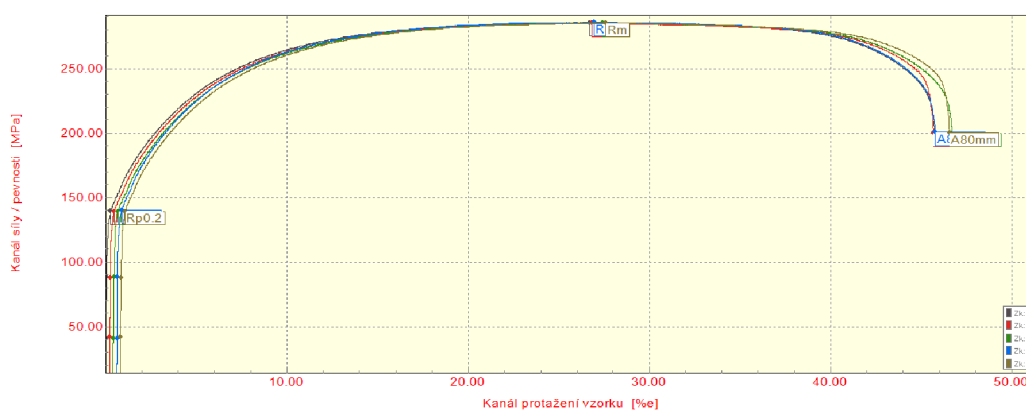
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC05 ZE 75/75 BP
Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
Vypracoval : Petr Grosman
Datum provedení testu : 18.1.2023
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	0.70	20.10	139.7	285.6	26.50	45.61
2	0.70	20.14	139.3	285.1	26.45	45.36
3	0.70	20.12	139.3	285.3	26.84	46.18
4	0.70	20.07	140.0	286.0	26.17	45.04
5	0.70	20.13	139.2	285.3	26.62	45.65

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.70	20.11	139.5	285.5	26.52	45.57
Směrodatná odchylka	0.00	0.03	0.3	0.3	0.24	0.42
Minimální hodnota	0.70	20.07	139.2	285.1	26.17	45.04
Maximální hodnota	0.70	20.14	140.0	286.0	26.84	46.18



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

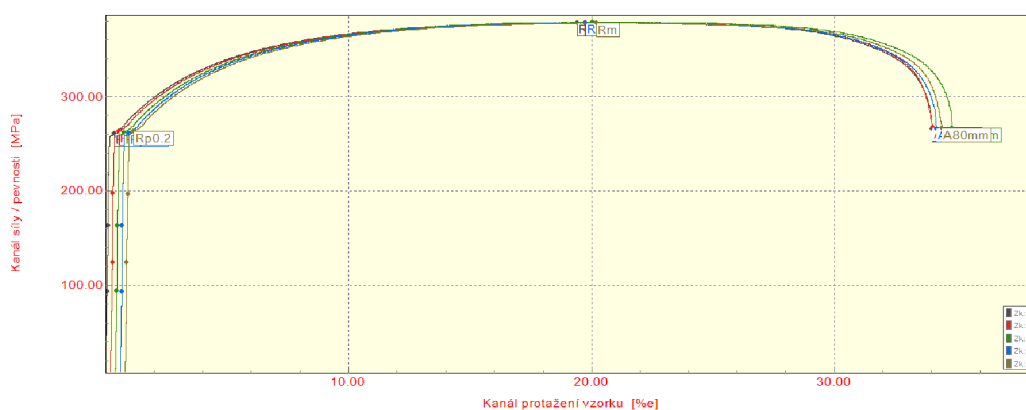
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX260 BD+Z100MB
Rozměry vzorku : [1,3 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 0°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
Vypracoval : Petr Grosman
Datum provedení testu : 18.1.2023
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	1.29	20.15	261.5	378.4	19.20	33.88
2	1.29	20.14	263.2	378.6	19.31	33.69
3	1.29	20.11	262.1	379.2	19.44	34.31
4	1.29	20.16	261.5	378.2	18.96	33.46
5	1.29	20.17	262.9	378.0	19.20	33.48

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	1.29	20.15	262.2	378.5	19.22	33.76
Směrodatná odchylka	0.00	0.02	0.8	0.4	0.18	0.35
Minimální hodnota	1.29	20.11	261.5	378.0	18.96	33.46
Maximální hodnota	1.29	20.17	263.2	379.2	19.44	34.31



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

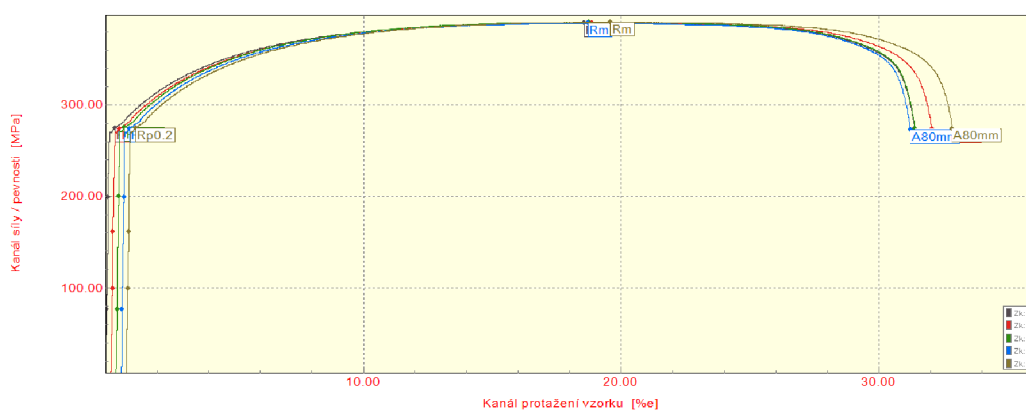
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX260 BD+Z100MB
Rozměry vzorku : [1,3 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 45°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
Vypracoval : Petr Grosman
Datum provedení testu : 18.1.2023
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	1.29	20.15	274.5	389.7	18.37	31.25
2	1.29	20.16	274.3	390.3	18.46	31.71
3	1.29	20.11	275.2	390.5	18.14	30.86
4	1.29	20.17	274.4	389.3	17.92	30.49
5	1.29	20.14	274.5	390.7	18.57	31.90

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	1.29	20.15	274.6	390.1	18.29	31.24
Směrodatná odchylka	0.00	0.02	0.3	0.6	0.26	0.58
Minimální hodnota	1.29	20.11	274.3	389.3	17.92	30.49
Maximální hodnota	1.29	20.17	275.2	390.7	18.57	31.90



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

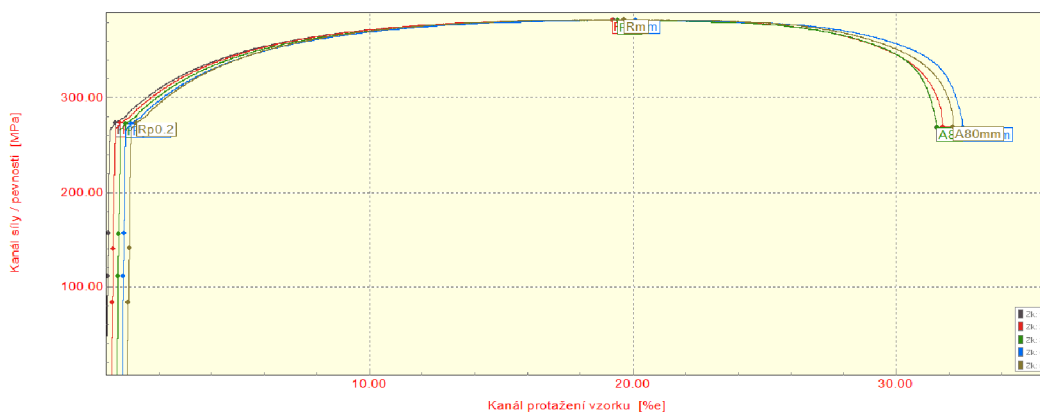
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX260 BD+Z100MB
Rozměry vzorku : [1,3 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.
Vypracoval : Petr Grosman
Datum provedení testu : 18.1.2023
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	1.29	20.15	273.0	382.3	19.07	31.41
2	1.29	20.13	273.1	382.6	18.81	31.43
3	1.29	20.17	272.8	381.9	18.84	31.02
4	1.29	20.16	272.8	382.1	19.32	31.81
5	1.29	20.11	273.5	383.0	18.69	31.23

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	1.29	20.14	273.0	382.4	18.94	31.38
Směrodatná odchylka	0.00	0.02	0.3	0.4	0.25	0.29
Minimální hodnota	1.29	20.11	272.8	381.9	18.69	31.02
Maximální hodnota	1.29	20.17	273.5	383.0	19.32	31.81



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ