

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Faktory ovlivňující výsledky zkoušky tahem na miniaturních vzorcích

Autor: **Miroslava ŠINDELÁŘOVÁ**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Ján DŽUGAN, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Miroslava ŠINDELÁŘOVÁ
Osobní číslo: S12B0002K
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie
Název tématu: Faktory ovlivňující výsledky zkoušky tahem na miniaturních vzorcích
Zadávací katedra: Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod do problematiky, klasické měření mechanických vlastností
2. Metody využívající miniaturní zkušební vzorky
3. Měření deformací při mechanických zkouškách se zaměřením na zkoušku tahem
4. Provedení zkoušek - experimentální výsledky (vliv měření deformace vzorku, vliv velikosti zrn mikrostruktury)
5. Vyhodnocení výsledků, porovnání výsledků klasických a netradičních zkoušek
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah pracovní zprávy: 30-40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- Skálová, J., Kovařík, R., Benedikt, V.: Základní zkoušky kovových materiálů. ZČU Plzeň
- Hodnocení degradace mechanických vlastností vlivem provozu - přehled zkušebních metod prováděných na miniaturizovaných zkušebních těles
- Mentl, V., Kanta, V., Džugan, J.: Rozvoj metodik měření mechanických vlastností kovových materiálů pomocí klasických a miniaturních zkušebních těles. Výzkumná zpráva VZU Plzeň, VYZ 0824/2005
- Procházka, R.: Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků. Diplomová práce KMM ZČU 2013.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Jan Džugan, Ph.D.**

COMTES FHT, a. s.

Konzultant bakalářské práce: **Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.**

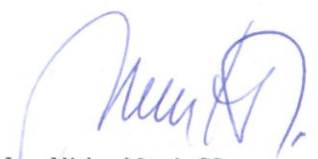
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: **22. září 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 22. září 2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne 25. 6. 2015



.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Šindelářová	Jméno Miroslava	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Materiálové inženýrství a strojní metalurgie“		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Džugan Ph.D.	Jméno Ján	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Faktory ovlivňující výsledky zkoušky tahem na miniaturních vzorcích		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	54	TEXTOVÁ ČÁST	33	GRAFICKÁ ČÁST	21
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce se zabývá faktory ovlivňujícími výsledky zkoušky tahem na miniaturních vzorcích. Měření deformací vzorku bylo provedené digitální obrazovou korelací. Prováděné experimenty byly zaměřené na vliv způsobu výroby miniaturních vzorků pro zkoušku tahem. Dále byl zkoumán vliv velikosti zrna na výsledky zkoušky tahem na miniaturních vzorcích. Veškeré výsledky byly porovnány s klasickou zkouškou v tahu.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Zkouška tahem, deformace, optické snímáče deformace, digitální obrazová korelace, miniaturní vzorky, způsob výroby, velikost zrna.

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Šindelářová	Name Miroslava
FIELD OF STUDY	B2301 "Materials Engineering and Engineering Metallurgy"	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Džugan Ph.D.	Name Ján
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Factors influencing tensile test results of miniature specimens	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	54	TEXT PART	33	GRAPHICAL PART	21
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with factors influencing the results of tensile tests of miniature specimens. Strain measurement was performed using digital image correlation. Performed experiments were focused on the influence of manufacturing method for miniature tensile specimens. Furthermore, the influence of grain size on the results of miniature tensile specimens was investigated. All results were compared with standard tensile tests results.
KEY WORDS	Tensile test, strain, optical extensometer, digital image correlation, miniature specimens, manufacturing method, grain size

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat všem, kteří se podíleli na vzniku této bakalářské práce. Především svým spolupracovníkům ve společnosti COMTES FHT a.s. za pomoc a rady při provádění odborných částí experimentů, doc. Ing. Janu Džuganovi, Ph.D. za odborné vedení práce a v neposlední řadě též své rodině, která se na vzniku této bakalářské práce sice nepodílela přímo, ale bez jejich podpory by nebylo možné práci vytvořit.

Obsah

1. Seznam použitých zkratk a symbolů	2
2. Úvod do řešené problematiky	3
3. Tahová zkouška.....	3
3.1. Zkušební vzorek	4
3.2. Tahový diagram.....	5
3.3. Vyhodnocení základních charakteristik.....	8
4. Způsoby měření deformace při zkoušce tahem.....	9
4.1. Mechanické snímače.....	9
4.2. Optické snímače	10
5. Zkouška tahem na miniaturních vzorcích	13
6. Experimentální část.....	15
6.1. Experimentální materiál	15
7. Posouzení vlivu technologie výroby těles.....	16
7.1. Zkoušky standardních vzorků.....	16
7.2. Měření na miniaturních vzorcích.....	18
7.2.1. Výroba polotovarů pro miniaturní vzorky	19
7.2.2. Výroba miniaturních vzorků	20
7.2.3. Zkoušky tahem.....	20
7.3. Porovnání výsledků a následná volba nejvhodnějšího způsobu výroby.....	25
8. Posouzení vlivu velikosti původního austenitického zrna	27
8.1. Tepelné zpracování polotovarů	27
8.2. Zkoušky tahem	29
9. Vyhodnocení vlivu velikosti zrn	34
9.1. Návrh termomechanického zpracování	34
9.2. Zkoušky tahem	36
10. Vyhodnocení experimentálního programu.....	42
11. Závěr.....	43
12. Seznam tabulek:	44
13. Seznam obrázků:	45
14. Seznam zdrojů:.....	46

1. Seznam použitých zkratk a symbolů

A [%]	tažnost
DIC	Digital Image Correlation (digitální obrazová korelace)
E [MPa]	modul pružnosti
F_{\max} [N]	hodnota maximální síly
k_p [-]	součinitel proporcionality
L_0 [mm]	počáteční měřená délka
L_C [mm]	zkoušená délka
L_t [mm]	celková délka zkušebního tělesa
L_U [mm]	konečná měřená délka
R_{eH} [MPa]	horní mez kluzu
R_{eL} [MPa]	dolní mez kluzu
R_m [MPa]	mez pevnosti
R_p [MPa]	smluvní mez kluzu
S [mm ²]	plocha průřezu v daném okamžiku
S_0 [mm ²]	počáteční průřezová plocha vzorku
S_U [mm ²]	konečná průřezová plocha vzorku
Z [%]	kontrakce
ε [-]	poměrné prodloužení
ΔL [mm]	prosté prodloužení
σ [MPa]	smluvní napětí
σ_{sk} [MPa]	okamžité napětí

2. Úvod do řešené problematiky

Důvod pro zkoušení pomocí miniaturních vzorků může být různý. Pravdou je, že zájem o tento způsob zkoušení stále roste. Pomocí této metody lze měřit aktuální mechanické vlastnosti materiálů provozovaných zařízení bez jeho odstavení, za účelem například odhadu zbytkové životnosti (zejména v energetickém odvětví). Další výhodou této metody je, že díky velmi malým rozměrům se zkouší pouze lokální vlastnosti materiálů. To může být ovšem někdy i nevýhoda, zejména u testů velmi heterogenních materiálů, u kterých je nutné velmi dobře zvážit místo odběru a obvykle je nutné udělat více odběrových míst i testů. Nicméně výhodou zůstává, že miniaturní vzorek může být cíleně odebrán z oblastí, jež jsou pro porušení materiálu krizová, např. přechodové oblasti u svarových spojů. S úspěchem mohou být tyto testy využity při zkoušení tenkostěnných trubek, pokud je třeba měřit tahové vlastnosti v jiném než v axiálním směru (pro axiální směr lze využít standardní tahovou zkoušku). Další využití nalezneme při vývoji nových materiálů, kde se často pracuje s malým množstvím materiálu, tudíž jsou miniaturní vzorky ideálním řešením.

Cílem této práce je sledování zejména vlivu technologie výroby zkušebních těles na dosahované výsledky v porovnání s výsledky získanými na standardních zkušebních tělesech. Další sledovaný parametr je vliv velikosti zrna na výsledky zkoušek tahem. V případě miniaturních zkoušek tahem je nutné, aby v objemu vzorku byl přítomen dostatečný počet zrn pro získání reprezentativních výsledků v porovnání se standardními vzorky. Na základě studie dosavadních výsledků, bylo zjištěno, že by v tloušťce vzorku mělo být minimálně 15 zrn pro dosažení relevantních výsledků [15]. Veškeré výše uvedené parametry jsou v této práci uvažovány a jejich vliv na výsledky zkoušek tahem vyhodnocen, přičemž výsledkem je návrh technologie výroby miniaturních vzorků a prokázání spolehlivosti měření miniaturních vzorků na materiálech s různými velikostmi zrn.

3. Tahová zkouška

Tahová deformační zkouška je jednou z metod, vedoucích k poznání mechanických vlastností materiálů. Její historie sahá až do 15. století, kdy Leonardo da Vinci zkoušel pevnost konopných lan jednoduchou tahovou zkouškou. První zkušební tahový stroj byl postaven roku 1729 a systematicky začalo zkoušení pevnosti od poloviny 19. století.

Při studiu mechanických vlastností je výhodné volit vzorky jednoduchého geometrického tvaru, které namáháme jednoosým napětím. Nejčastěji používané tvary vzorků jsou válce nebo hranoly. Střední část vzorku je tvarována tak, aby na ni působilo homogenní napětí. Konce vzorku jsou uzpůsobeny pro uchycení do zkušebního stroje.

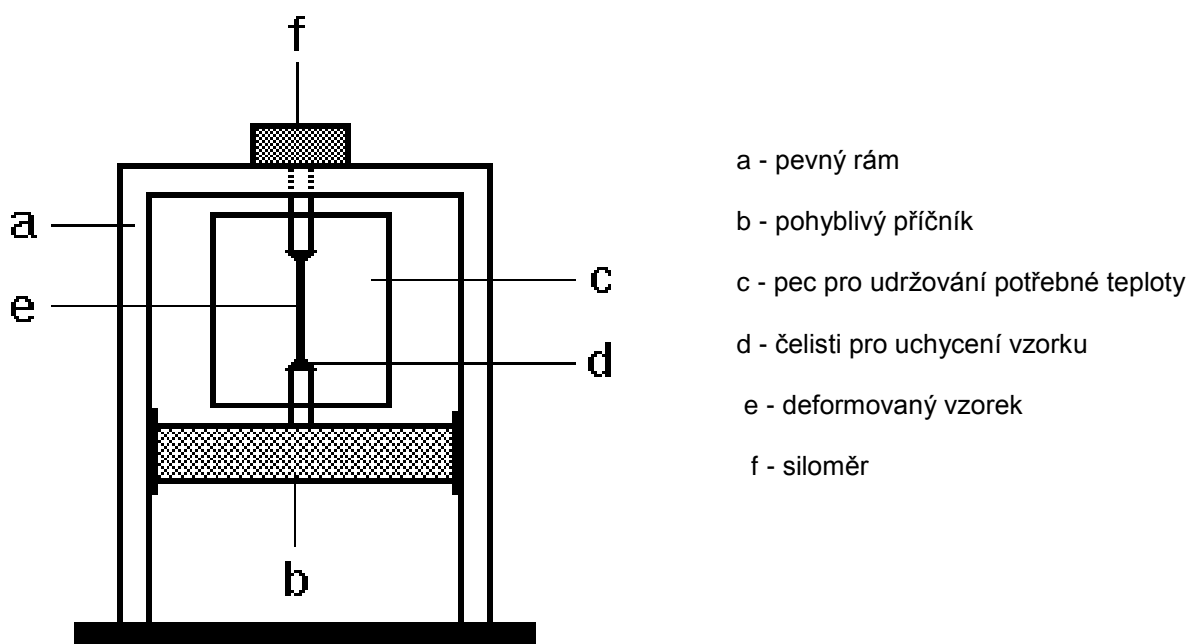
Při samotné zkoušce nás zajímají tři proměnné: napětí, deformace a rychlost pohybu příčnicku deformačního stroje. Jednu z těchto veličin držíme na konstantní hodnotě. Zkoušku provádíme při zvolené teplotě, kterou rovněž udržujeme na stálé hodnotě.

Testovaný vzorek se prodlužuje konstantní rychlostí příčnicku. Schéma tohoto stroje je znázorněno na **Obr. 1**. Jeden konec vzorku je upevněn pomocí čelistí k posuvnému příčnicku, který se posouvá předepsanou rychlostí. Druhý konec je spojen se siloměrem, pomocí něhož měříme zatěžovací sílu. Vzorek s čelistmi může být umístěn v peci, z důvodu měření při vyšších, či nižších teplotách.

Tyče se upínají mezi čelisti zkušebního, tak zvaného trhacího, stroje. Zkušební vzorky jsou zatíženy dvěma stejně velkými silami (F), působícími tahem v podélné ose vzorku. Zatěžující

síla se vyvozuje hydraulicky, nebo mechanicky (například pomocí šroubu a matice). Stroj je vybaven záznamovým zařízením pro sběr dat v průběhu zkoušky.

Provedení standardní zkoušky tahem se v současnosti řídí normou ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 6892-2 [1,2].



Obr. 1 Schéma zkušebního stroje [16]

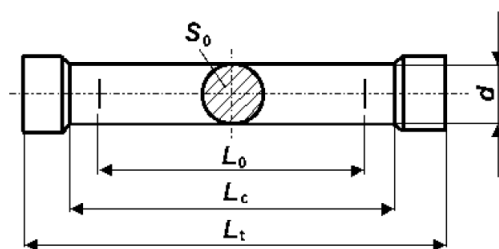
3.1. Zkušební vzorek

Zkušební vzorky se liší tvarem a velikostí dle sledovaného polotovaru či komponentu. Vzorky mohou být buď obráběné, nebo mohou být vlastní polotovary či komponenty. V případě obráběných vzorků se jedná buď o vzorky, válcové, ploché anebo případně tvarové jako např. v případě zkoušení segmentů trubek. Vzorky neobráběné se používají při zkoušení drátů, lan, či případně trubek. Z geometrického úhlu pohledu dělíme vzorky pro zkoušku tahem na poměrné a nepoměrné.

Poměrná zkušební tělesa jsou upřednostňována a mají přímý vztah mezi počáteční měřenou délkou a počátečním průřezem vyjádřený rovnicí

$$L_0 = k_p \cdot \sqrt{S_0} \quad (1).$$

Mezinárodně přijatá norma uvádí součinitel proporcionality rovný 5,65, jestliže je průřezová plocha zkušební tyče příliš malá, může se použít hodnota 11,3. Příklad tělesa neznázorněn na Obr. 2.



Obr. 2 Příklad poměrného zkušební vzorku

U nepoměrných zkušebních těles nezávisí počáteční měřená délka na počátečním průřezu vzorku. Jsou to např. zkušební tělesa vyrobená z plechů o tloušťce do 3mm [1,2].

3.2. Tahový diagram

Záznamové zařízení trhačích stroje vytvoří diagram závislosti prostého prodloužení Δl zkušební tyče, vyjádřené vztahem

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2),$$

kde l je délka měřené části tyče v daném okamžiku zkoušky, na zatěžující síle F .

Protože síla F a prosté prodloužení Δl jsou závislé na rozměrech zkušební vzorku, je vhodnější posuzovat změřené výsledky pomocí poměrných hodnot, to jest napětí (poměru zatěžující síly k zatěžované ploše průřezu) a poměrného prodloužení (prodloužení délkové jednotky měřené délky).

Pro určení skutečného napětí v libovolném okamžiku zkoušky by bylo třeba znát skutečnou plochu průřezu v tomto okamžiku. Tyč se totiž se zatěžováním nejen prodlužuje, ale také zužuje, její průřez se z původní hodnoty S_0 zmenšuje. Zpočátku probíhá zúžení rovnoměrně v celé délce tyče. Později se v některém místě začne tyč zužovat výrazněji, než jinde. Tvoří se tak zvaný krček, ve kterém později dojde k prasknutí tyče.

Označíme-li velikost plochy průřezu v daném okamžiku S , je skutečné napětí dáno vztahem:

$$\sigma_{sk} = \frac{F}{S} \quad (3).$$

Běžné zkušební stroje však změnu příčných rozměrů a tedy ani plochy průřezu nejsou schopny zaznamenat.

Z uvedených důvodů je zavedena veličina označená „smluvní napětí“, vyjádřená vzorcem:

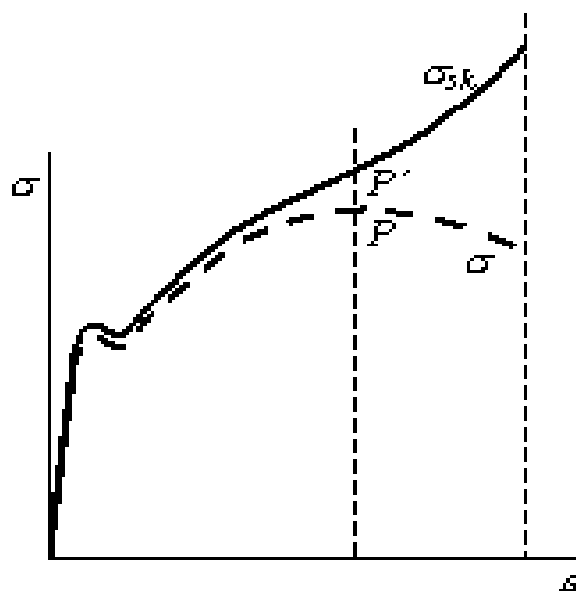
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (4).$$

Protože je vždy $S < S_0$, je vždy $\sigma_{sk} > \sigma$.

Poměrné prodloužení je dáno vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (5).$$

Je zřejmé, že smluvní napětí σ i poměrné prodloužení ε jsou přímo úměrné zatěžující síle F a prostému prodloužení Δl . Proto je možno v příslušném měřítku z diagramu zakresleného trhacím strojem odečítat i poměrné hodnoty. Protože diagram neurčuje průběh skutečného napětí, ale pouze napětí smluvního, nazývá se diagramem smluvním.



Obr. 3 Srovnání průběhu skutečného a smluvního napětí během zkoušky tahem

Srovnání průběhu skutečného a smluvního napětí během zkoušky je naznačeno na **Obr. 3**. Tím je také vysvětlena skutečnost, proč zdánlivě zkoušený vzorek praská při menším napětí než je napětí příslušející vrcholu smluvního diagramu σ - ε .

Obr. 3 a **Obr. 4** znázorňují záznam zkoušky houževnaté oceli. Na záznamové čáře **Obr. 4** je několik charakteristických bodů. Od počátku zkoušky až do bodu U je závislost mezi zatížením a deformací lineární, za tímto bodem se čára zakřivuje. Do bodu E vznikají v materiálu pouze pružné deformace. Při dosažení bodu K dojde ke zvláštnímu jevu. Až dosud bylo pro zvětšení deformace nutno zvětšit zatížení. Zde je zřejmé, že za bodem K bude po určité době probíhat deformace, i když se zatížení bude snižovat. Později však opět čára začíná stoupat. Bod P odpovídá vrcholu záznamové čáry. V tomto okamžiku se začíná v některém místě tyč prudce zužovat, vzniká krček. V bodě L dochází k prasknutí vzorku, lomu.

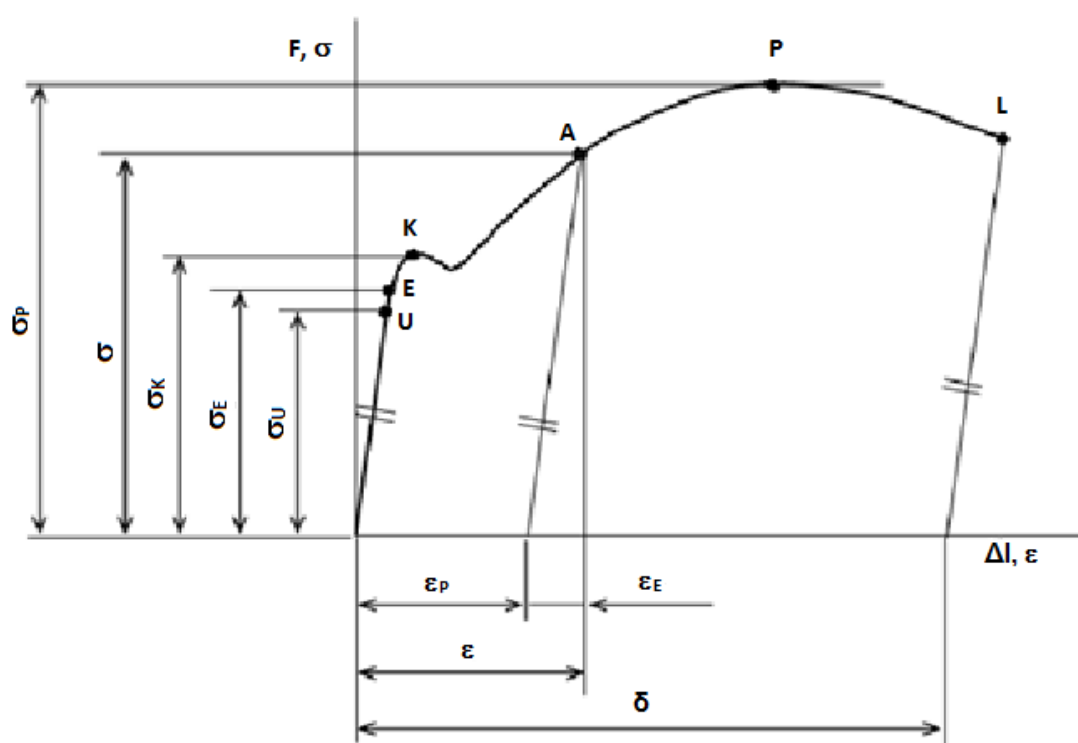
Zmíněným bodům odpovídají charakteristická (smluvní) napětí, nazvaná mezemi:

- mez úměrnosti v tahu σ_{Ut} je největší smluvní napětí, při kterém je deformace úměrná napětí (platí Hookův zákon $\sigma = E \cdot \varepsilon$)
- mez pružnosti (elasticity) v tahu σ_E je smluvní napětí, do kterého vznikají pouze pružné (elastické) deformace

- mez kluzu (průtažnosti) v tahu R_E (na obrázku značená jako σ_K) je smluvní napětí, při jehož dosažení probíhají po určitou dobu deformace, aniž je nutno zvyšovat zatížení; z hodnoty meze kluzu se u ocelí zpravidla určuje dovolené napětí v tahu

- mez pevnosti v tahu R_m (na obrázku značená jako σ_P) je největší smluvní napětí, kterého je při tahové zkoušce dosaženo.

Na obrázku je naznačeno rozdělení deformace v určitém okamžiku zkoušky. Jestliže například v bodě A bude vzorek odlehčen, zapíše záznamové zařízení úsečku směřující z tohoto bodu šikmo dolů. Celkové poměrné prodloužení před odlehčením bylo ϵ , po odlehčení zůstane v materiálu poměrné prodloužení ϵ_P (plastická složka celkového prodloužení). Úsek označený ϵ_E tedy představuje pružnou (elastickou) složku celkového prodloužení.

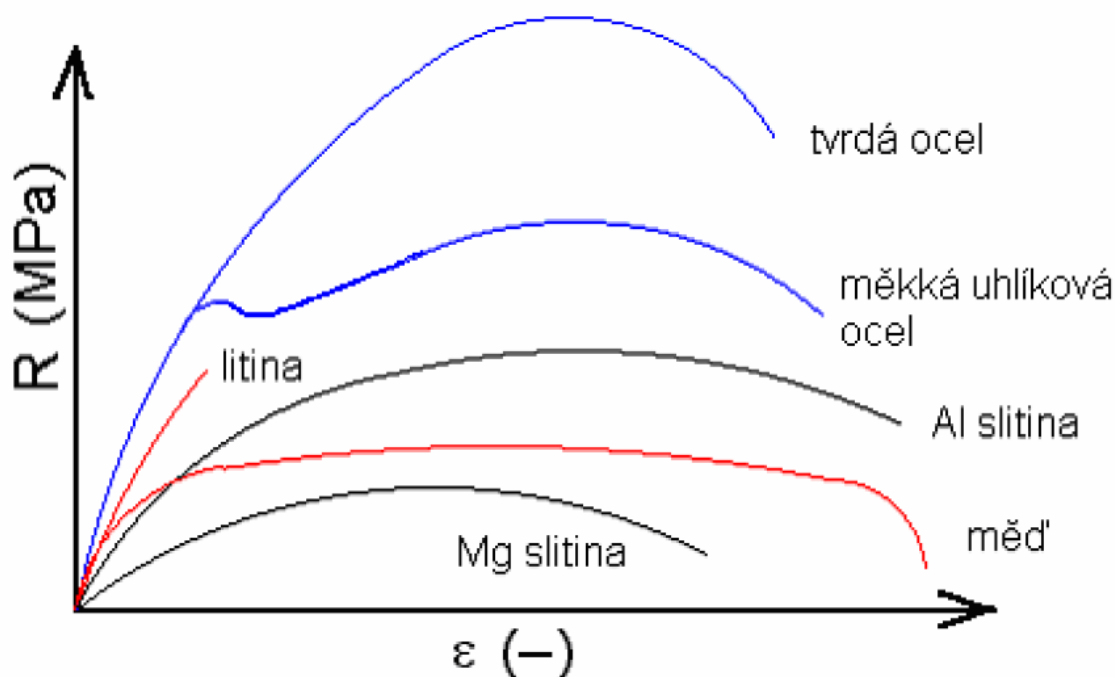


Obr. 4. Schéma záznamu zkoušky tahem s vyhodnocením typických hodnot

Vysokopevnostní oceli nemají zřetelnou mez kluzu. Proto se u nich udává smluvní mez kluzu. Je definována (podobně jako smluvní mez pružnosti) jako napětí, které vyvodí trvalé prodloužení zkušební tyče rovné 0,2 % měřené délky l_0 . Je označována $\sigma_{0,2}$.

Tvrdé a křehké kovy, vykazují při tahové zkoušce velmi malé celkové prodloužení [17].

Příklady smluvních diagramů různých kovů a slitin jsou uvedeny na **Obr. 5**.



Obr. 5 Příklady smluvních diagramů různých kovů a slitin [4]

3.3. Vyhodnocení základních charakteristik

Pro vyhodnocení základních charakteristik, kterými jsou mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakce, se před zkouškou na zkušební tělese vyznačí počáteční měřená délka a změní se rozměry tělesa, aby bylo možno vypočítat počáteční zkoušený průřez [19].

- **mez pevnosti R_m [MPa]**, je maximální napětí dosažené ve smluvním diagramu $\sigma - \varepsilon$ a vypočte se z následujícího vztahu:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (6).$$

Mez kluzu je definována jako napětí, při kterém se zkoušený materiál začíná plasticky deformovat. Charakter přechodu mezi elastickou a plastickou deformací je dán typem materiálu. Dle naměřené závislosti $\sigma - \varepsilon$ vyhodnocujeme:

- **smluvní mez kluzu R_p [MPa]**, což je napětí, při kterém plastická deformace dosáhne předepsané hodnoty x_p vyjádřené v [%] počáteční měřené délky průtahoměru L_e . Označuje se symbolem, jehož index vyjadřuje hodnotu plastické deformace v [%] - např. $R_{p0,2}$.

- **výraznou mez kluzu R_{eH} a R_{eL} [MPa]**, kde R_{eH} je napětí odpovídající prvnímu okamžiku poklesu napětí a R_{eL} [MPa] je nejnižší napětí v průběhu plastického kluzu kovu.

- **tažnost A [%]**, je dána vztahem:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (7).$$

Pokud se tažnost měří na poměrných zkušebních tyčích a koeficient proporcionality je roven 5,65, pak se nemusí k symbolu A přidávat žádný index; v opačném případě norma doporučuje značku A doplnit indexem označujícím součinitel proporcionality. U nepoměrných zkušebních tyčí se doporučuje značku A doplnit indexem označujícím použitou počáteční měřenou délku v mm.

Mnoho laboratoří má však zavedené odlišné indexování symbolu A (např. dle DIN 50 145), které vychází z násobků průměru tyče s kulatým průřezem. Např. tažnost A_5 dle tohoto značení znamená, že rysky počáteční měřené délky byly vyneseny ve vzdálenosti pětinasobku průměru kulaté zkušební tyče, ale tato vzdálenost je zároveň stejná hodnota, která po zaokrouhlení vychází při použití vztahu

$$L_0 = k_p \cdot \sqrt{S_0} \quad \text{pro } k_p=5,65 \quad (8).$$

Proto se tažnosti A_5 rovnají tažnostem A , nebo tažnosti A_{10} se rovnají $A_{11,3}$ [6].

- **kontrakce (zúžení) Z [%]**, je největší změna průřezové plochy, ke které došlo během zkoušky. Je vyjádřena vztahem:

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100 \quad (9).$$

4. Způsoby měření deformace při zkoušce tahem

V případě zkoušky tahem je klíčovým faktorem měření deformace, pokud možno přímo na těle vzorku. Toto měření je komplikované v případě mikro-vzorků, vzhledem k jejich malým rozměrům, tudíž měření velmi malých deformací.

Měření deformací zkušebních vzorků se provádí buď pomocí mechanických snímačů deformace, nebo pomocí snímačů optických.

4.1. Mechanické snímače

Mechanické snímače se upínají přímo na zkušební tyč a během zkoušky tahem jsou schopny zaznamenávat délkové změny. Využívají změn deformačních členů se změnou kapacitní indukce nebo elektrického odporu.

V případě mikro-tahových vzorků musí být mechanický snímač připevněn k přípravku, z důvodu malých rozměrů zkušební vzorku a nepoměrně větších rozměrů mechanického snímače.

Jednou z variant mechanických snímačů je kapacitní extenzometr. Základem kapacitního snímače jsou dva nebo více elektrodových systémů. Parametry těchto systémů se mění v závislosti na působení měřené neelektrické veličiny. Touto veličinou je v našem případě měnící se vzdálenost mezi dvěma snímači v závislosti na prodlužování zkušební vzorku.

Snímače se připevní na zkoušený vzorek. Připevnění může být provedeno pomocí tvarového nasazení, kleštin, stavěcího šroubu, pomocí gumiček nebo nalepením. Pro aplikaci zkoušky tahem se nejčastěji využívá nasazení za pomoci gumiček, nebo s využitím tvaru zkušební vzorku, na které se mohou nacházet výstupky přímo určené pro tento snímač.

Dalším mechanickým snímačem je tenzometrický průtahoměr. Základem tenzometrických snímačů je tenzometr, což je pasivní elektronická součástka, která slouží k měření deformací. Jeho funkcí je převádět deformace způsobené působením síly při tahové zkoušce na elektrický signál.

Samotný princip tenzometru spočívá ve známém faktu, že odpor elektrického vodiče je přímo úměrný jeho délce a nepřímo úměrný jeho průřezu.

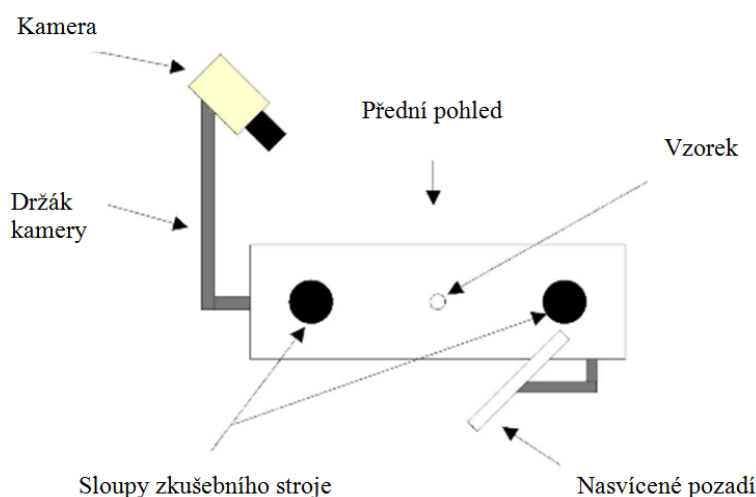
Při protažení materiálu, na němž je tenzometr přilepen, dochází i k protažení vodiče tenzometru, jenž tím zvětší svoji délku a zmenší průřez. Tímto způsobem ve výsledku zvětší svůj odpor.

4.2. Optické snímače

Optické snímače mají oproti mechanickým snímačům několik výhod. Jedná se o bezkontaktní snímače. Navíc většina z nich umožňuje zaznamenat výsledky měření mnohem přesněji.

Kromě podélných deformací můžeme díky těmto zařízením zaznamenávat i příčné deformace zkušební vzorku. Naměřené hodnoty následně umožňují lépe vyhodnotit napět'ové charakteristiky během zkoušky tahem v závislosti na měnícím se průřezu zkušební vzorku. V současnosti jsou nejčastěji využívány video-extenzometry, laserové extenzometry a systémy digitální obrazové korelace.

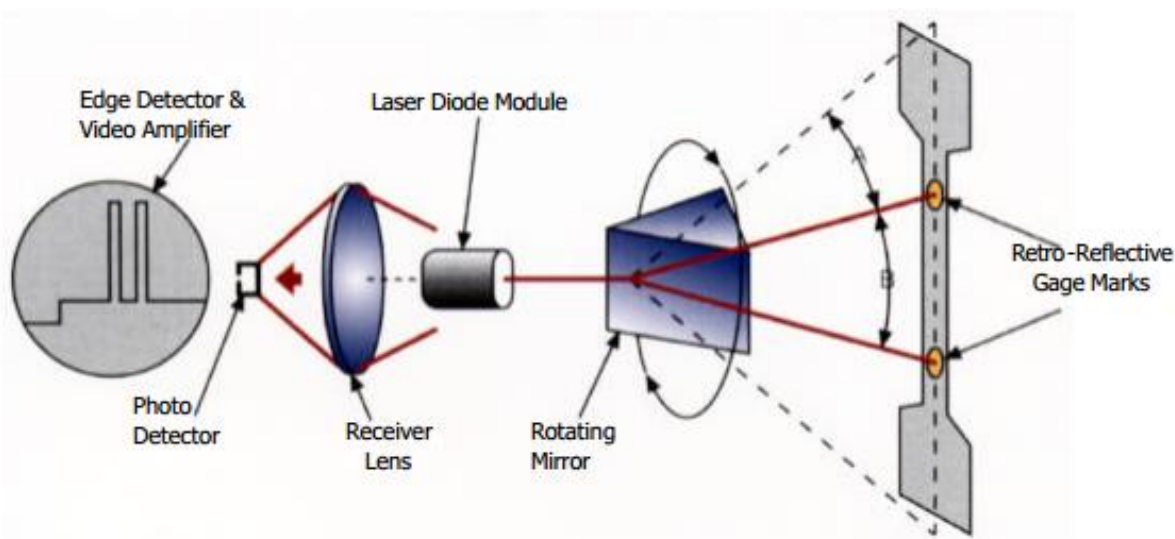
Video-extenzometr je zařízení umožňující optické měření deformace za pomoci videokamery a vyhodnocovacího software. Schéma příkladu experimentálního uspořádání je znázorněno na **Obr. 6**. Videoextensometr nepřetržitě měří vzdálenost mezi dvěma body a přímo vypočítává deformaci z počáteční měřené délky a změny vzdálenosti mezi měřenými body.



Obr. 6 Schéma rozmištění kamery systému Videoextensometer [21]

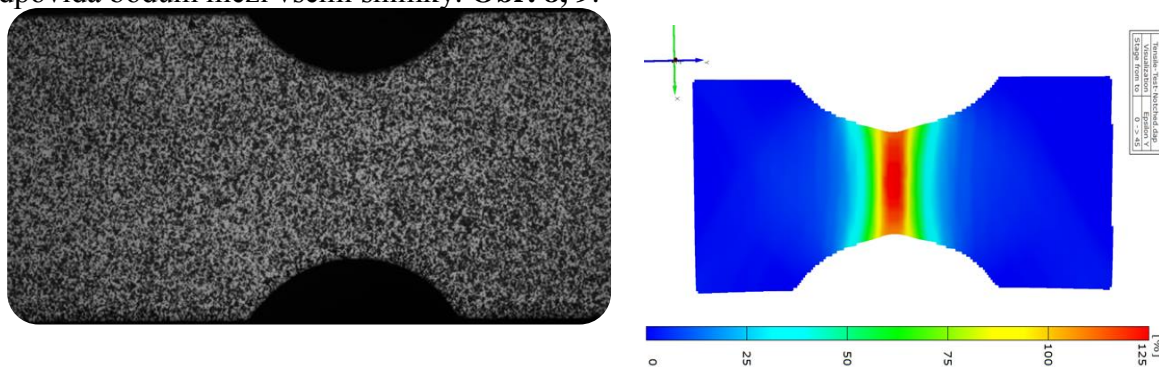
V průběhu zkoušky je možné zaznamenávat a sledovat pohyb cílových bodů. Tyto sledované body musí vytvářet ostré přechody na stupnici šedi podél skenované linie. Měřicí linie mohou být jak svíslé, tak i vodorovné čímž je umožněno měření deformace podélné a příčné u řady systémů. Některé systémy umožňují měření většího množství bodů ve sledovaných směrech a tím umožňují měření průběhu rozložení deformace po zkušebním vzorku.

Dalším druhem bezkontaktních snímačů je laserový snímač. Laser vzniká excitací fotonů v atomu. Jedná se o usměrněný proud fotonů, za pomoci kterého lze mimo jiné provádět měření deformací při zkoušce tahem. Schéma laserového extensometru je znázorněno na **Obr. 7**. Laserové průtahoměry umožňují plynulé bezkontaktní měření průtažnosti vzorku od počátku testu až do poškození vzorku. Jsou navrženy tak, aby poskytovaly přesné rozlišení, které umožňuje zaznamenat hodnoty prodloužení menší než 1 % až do 1000 %. Tyto rozsahy prodloužení naznačují jistou univerzálnost použití, co se velikostí měřených oblastí týče. Tento fakt je velmi důležitý pro aplikaci na metodu mikro-tahových zkoušek. Tento systém je vhodný pro zkušební podmínky za pokojových, snížených i zvýšených teplot.



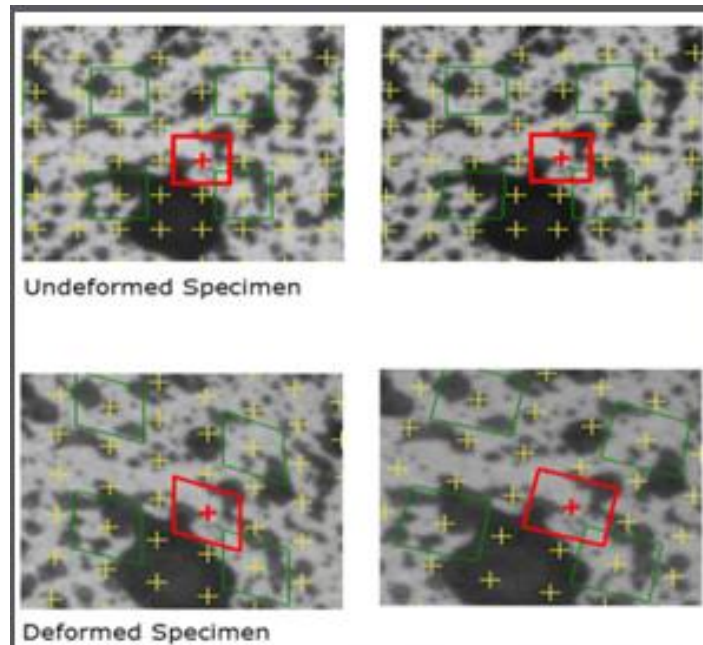
Obr. 7 Schéma principu měření deformací laserem [22]

Nejkomplexnější metodou pro vyhodnocování deformací je Digital Image Correlation (digitální obrazová korelace). Jeho použití se ukázalo jako velmi užitečný nástroj pro analýzu deformací. Záznam zkoušky je prováděn za pomoci dvou kamer s vysokým rozlišením. Princip je poměrně jednoduchý a je možno ho aplikovat na celkem široký rozsah technických aplikací. Před vlastním měřením je nutné nanést na vzorek jemný rastr s náhodnou strukturou **Obr. 9**, s nímž je systém dále schopen pracovat. Zpracování obrazu je založeno na principu digitální obrazové korelace. Rozdělení hodnot šedé je počítáno pro velké množství malých podskupin (tzv. fazet) v každé z kamer a poskytuje sub-pixelově přesnou pozici, která odpovídá bodům mezi všemi snímky. **Obr. 8, 9**.



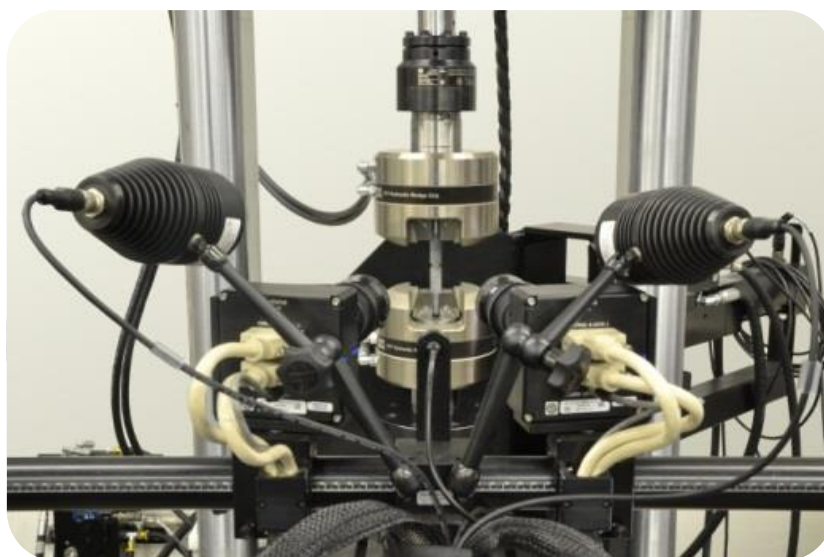
Obr. 8 Příklad vzorku s naneseným náhodným rastrem a příklad výsledku z DIC

V klasické obrazové korekci se záznam provádí pomocí jedné kamery. Kamerou je možno pozorovat pouze rovinu rovnoběžnou k obrazové rovině kamery. Při pozorování lze určit posuv a rotaci s přesností až 1/100 pixelu.



Obr. 9 Princip měření deformace pomocí DIC

Při použití dvou kamer lze dosáhnout prostorového měření. Objekt se sleduje prostřednictvím dvou kamer, které jsou od sebe v určité vzdálenosti nastaveny pod určitým úhlem. Každá z nich zaznamená postavení jednotlivých bodů samostatně. Následně je za pomoci algoritmu převede do třídímenzionálního prostoru [7]. Příklad uspořádání DIC systému ARAMIS je znázorněn na **Obr. 10**.



Obr. 10 Uspořádání zkoušky s použitím DIC systému ARAMIS

Matematický model nastavení snímačů, digitální obrazová korelační metoda a triangulační výpočty jsou kombinovány pro odvození velmi přesných 3D souřadnic. Odečtením informací o povrchu ve všech fázích záznamu v 3D prostoru poskytuje přesné X, Y a Z hodnoty posuvu. Deformace jsou vypočteny s ohledem na geometrii součásti a teorie plasticity[7].

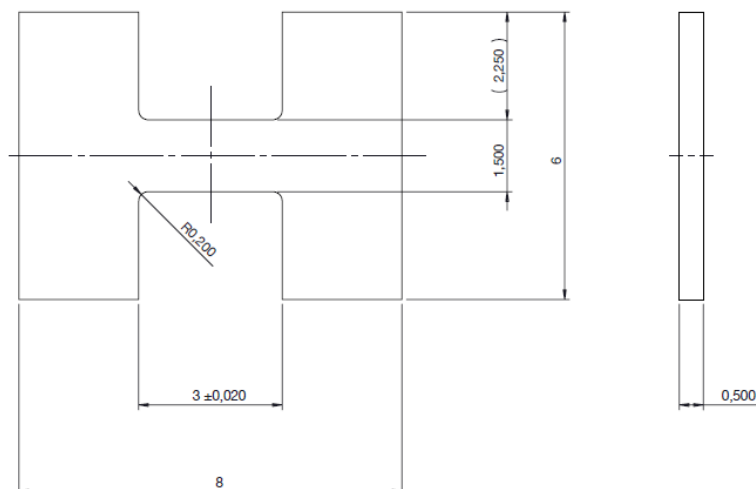
Systém digitální obrazové korelace ARAMIS je vhodné zařízení pro měření jak za pokojových, tak i za vysokých teplot, pro vysoké testovací rychlosti a malé velikosti vzorků. Pomocí tohoto systému je možná získat:

- vyhodnocení napětí-deformace
- modul pružnosti
- modul pružnosti ve smyku
- Poissonovo číslo
- limitní křivky tváření (FLC)
- zbytková napětí [17]

5. Zkouška tahem na miniaturních vzorcích

Ve své podstatě je zkouška tahem na miniaturních vzorcích totožná s metodou standardních tahových zkoušek. Metoda nemá přímo související normu. Pouze interní předpisy zkušebních laboratoří, které vycházejí z ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 6892-2. Snahou metody je využívat normalizovaných postupů v poměru k velikostem vzorků.

Obvyklý tvar mikro-tahového vzorku je znázorněn na **Obr. 11** dle [10,11,12,13]. Při výrobě je možno upínací konce vzorku upravit dle potřeby (např. pro komfortnější upevnění do čelistí zkušebního stroje je možno upínací konce prodloužit). (Lišit se může také zkoušená tloušťka vzorku a to v rozmezí 0,2 mm až 2 mm pro ploché vzorky a 0,2 mm až 5 mm pro vzorky kruhového průřezu. Při výrobě je třeba zabránit ovlivnění materiálu vzorku, např. plastickou deformací nebo přehřátím vzorku. Pro výrobu zkušebních vzorků se využívá třískové obrábění nebo jakákoli jiná metoda, která nezpůsobí ovlivnění materiálu vzorku.



Obr. 11 Geometrie miniaturního vzorku pro zkoušku tahem

Základní podmínky zkoušení mikro-tahových vzorků vychází z norem ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 6892-2.

Vzhledem k malému průřezu vzorku je třeba dbát zvýšené pozornosti při upínání vzorku do zkušebního stroje. Při upínání se musí monitorovat maximální vyvolaná zátěžná síla, která může dosáhnout maximálně 10 % očekávané meze kluzu. Vlastní čelisti nesmí ovlivnit zkoušenou délku vzorku L_c a doporučuje se, aby upínací konce vzorku přesahovaly čelisti alespoň o 1 mm.

Zkouška může začínat z nulové síly nebo z mírného předpětí nepřesahující 5% meze kluzu. Zkušební rychlost vychází z norem ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 6892-2. Pro zkoušení je možno použít metodu A (zkušební rychlost vycházející z řízení deformační rychlosti) nebo metodu B (zkušební rychlost vycházející z napěťové rychlosti).

Deformace zkušebního vzorku během testu se měří pomocí optických metod (videoextenzometr, DIC), případně na přání zákazníka se může měřit z příčnicku nebo mechanickým průtahoměrem.

Ze získaného záznamu je možno vyhodnotit mez kluzu a mez pevnosti stejným způsobem jako u standardní zkoušky tahem. Vyhodnocení Youngova modulu pružnosti v tahu lze provést jen na vzorcích měřených pomocí optických metod.

Pro vyhodnocení tažnosti je možno využít počáteční měřenou délku L_0 3 mm vycházející ze vzdálenosti upínacích konců a L_U jako vzdálenosti upínacích konců po přetržení. Takto měřená tažnost je značena symbolem A_3 .

Druhý způsob vyhodnocení tažnosti je možno učinit na základě záznamu tahového diagramu. U symbolu tažnosti A_X bude v indexu uvedena počáteční měřená délka v mm (např. $A_{2,6}$).

Způsob vyhodnocení tažnosti musí být zmíněn v protokolu o zkoušce. Příčný průřez po zkoušce pro vyhodnocení kontrakce Z se vyhodnotí na základě měření dvou nejužších míst kolmo na sebe a jejich vzájemným vynásobením [5].

Reprodukovatelnost výsledků mikro-tahových zkoušek se pohybuje do 3 %. Výsledky mechanických hodnot vykazují odchylku od výsledků standardní tahové zkoušky do 6 %, kromě hodnot kontrakcí. Ty vykazují v některých případech odchylku 20 % a více. Z tohoto důvodu je stanoven jednotný postup pro hodnocení veškerých kontrakcí, který odchylku snižuje na hodnoty do 10 %. Vyšších hodnot odchylek je dosahováno v případech, kdy je materiál poškozen nesouměrně a to vlivem necelistvostí v materiálu.

Obecnou nevýhodou těchto metod, využívajících miniaturní vzorky je právě miniaturní objem, který ve všech případech nemusí dostatečně reprezentovat danou zkušební oblast. Nelze jich tedy použít tam, kde by vady nabývaly rozměrů, které by ovlivňovaly výsledky mechanických zkoušek [6].

6. Experimentální část

Pro experimentální část práce byly zvoleny vhodné materiály vykazující plastickou deformaci při pokojové teplotě a kvazistatických podmínkách zatěžování, aby bylo možné vyhodnotit plastické deformace vzorku. Byly realizovány zkoušky jak na standardních tělesech, tak na miniaturních vzorcích. V případě zkoušek tahem je klíčovou veličinou měření deformace. Pro prováděné experimenty byla zvolena metoda měření systémem digitální obrazové korelace ARAMIS na základě výsledků předchozích experimentů [7,8,9]. V rámci zkoumání faktorů ovlivňujících výsledky zkoušky tahem na miniaturních vzorcích byly provedeny zkoušky na vzorcích vyrobených několika technologickými procesy. Po vyhodnocení výsledků mikrotahových zkoušek byl zvolen nejvhodnější způsob výroby. Následně byly provedené zkoušky pro posouzení vlivu velikosti zrna.

6.1. Experimentální materiál

Prvním krokem experimentálního programu byla volba vhodného materiálu. Byl zvolen materiál, vykazující plastickou deformaci při pokojové teplotě a kvazistatických podmínkách zatěžování, aby bylo možné vyhodnotit plastické deformace vzorku. Druhým kritériem pro volbu materiálu byla možnost tepelného zpracování materiálu, aby došlo ke změně velikosti původního austenitického zrna pro následné zkoušky posouzení vlivu velikosti zrna na výsledky mikrotahových zkoušek. Posledním požadavkem bylo, aby se jednalo o materiál běžně používaný a tím bylo umožněno použití dosažených výsledků v praxi.

K provedení experimentů první části, pro vyhodnocení vlivu parametrů obrábění a velikosti původního austenitického zrna, byl zvolen materiál 42CrMo4 (15 142; 1.7225), kruhová tyč $\varnothing 20$ mm. Jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou chrom - molybdenovou ocel k zušlechťování.

Ocel s vyšší prokalitelností pro výše namáhané strojní díly. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC. Do průměru 100 mm lze po zušlechťování docílit pevností nad 1000 MPa při ještě dostatečné houževnatosti. Není náchylná k popouštěcí křehkosti. Kalí se do méně razantního kalicího prostředí, poněvadž je náchylná ke vzniku kalicích trhlin v místech s vrubovým účinkem nebo povrchových vad. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení. Patří k nejčastěji používané oceli k zušlechťování a povrchovému kalení.

Použití nachází u více namáhaných strojních dílů, kde se požaduje při vysoké pevnosti i vyšší houževnatost, zejména hřídele a spojovací součásti, součásti silničních motorových vozidel, nástroje pro lisování a tváření, např. ohraňovací nástroje, vodící lišty, vedení apod.

Druhým experimentálním materiálem, pro vyhodnocení vlivu velikosti zrna na výsledky mikro-tahových zkoušek, byla zvolena korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (17 240; 1.4301), kruhová tyč $\varnothing 18$ mm. Jedná se o chrom niklovou austenitickou nestabilizovanou ocel

Základní nerezavějící austenitická ocel obsahující 18% chromu (Cr) a 10% niklu (Ni). Austenitická gama fáze je paramagnetická, ocel je tedy nemagnetická. Má vynikající odolnost proti korozi v prostředích voda a ovzduší bez koncentrace chloridů nebo anorganických kyselin a solí. Svařitelnost je zaručena. Odolnost proti korozi lze zvýšit povrchovým leštěním. Použití do provozní teploty až 350 °C. Obrobitelnost je ztížená, nutno obrábět velmi ostrými nástroji z vysoce legovaných rychlořezných ocelí nebo nástroji vyrobených z tvrdokovových materiálů (destičky). Tvařitelnost tažením a ohýbáním je velmi dobrá. Ocel má velmi dobré mechanické vlastnosti i při extrémně nízkých teplotách.

Použití nachází v průmyslu potravinářském, farmaceutickém, kosmetickém, dále pak ve fasádní a bytové architektuře. Pro použití v chemickém průmyslu není vhodná, odolává jen některým málo koncentrovaným kyselinám. Ve venkovním prostředí vzdoruje povrchové korozi jen v tom případě, že nánosy chemických zplodin (prach a soli) jsou pravidelně s povrchu oplachovány dešťovými srážkami. Tato nejvíce používaná nerezová ocel označovaná spotřebitelskými názvy „potravinářská“, nebo „18-10“ vyhovuje odběratelům hlavně poměrem cena / dobrá korozivzdornost v určených prostředích.

Chemické složení obou materiálů je uvedeno v **Tab. 1**.

Tab. 1 Chemické složení použitých materiálů

Materiál	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Ti	Mo	Nb	Cu	Co
42CrMo4	0,43	0,29	0,81	0,015	0,027	1,15	0,03	0,01	-	0,191	-	-	-
X5CrNi18-10	0,022	0,43	1,1	0,035	0,026	18,3	8,01	0,077	0,001	0,39	0,011	0,57	0,16

7. Posouzení vlivu technologie výroby těles

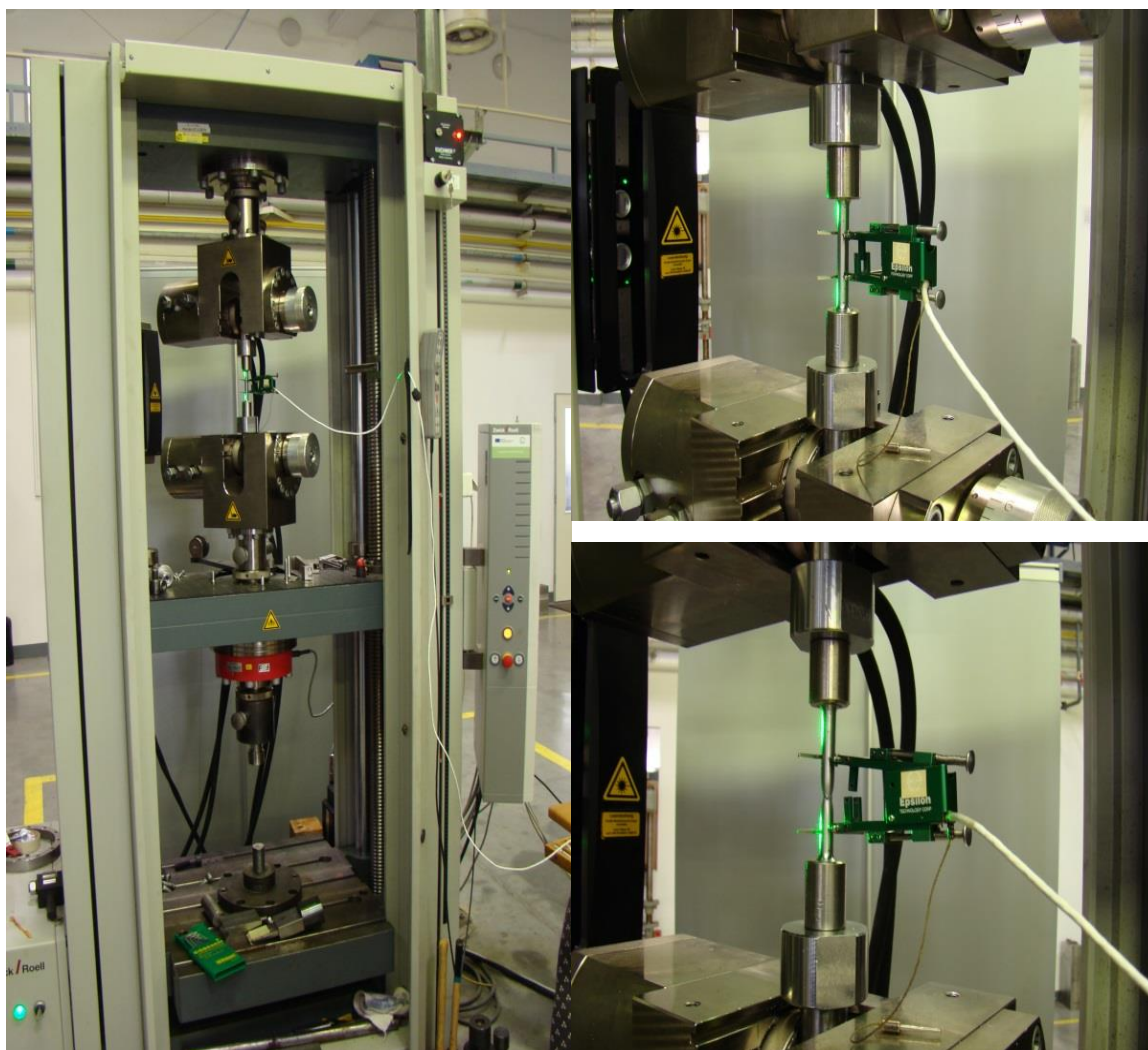
Pro srovnání výsledků získaných na standardních a miniaturních zkušebních tělesech byly realizovány zkoušky na obou zmiňovaných typech vzorků za kvazi-statických podmínek zatěžování při pokojové teplotě. Standardní zkouška tahem byla realizována dle ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška tahem na miniaturních vzorcích je ve své podstatě totožná s metodou standardních tahových zkoušek. Metoda nemá přímo související normu. Pouze interní předpisy zkušebních laboratoří, které vycházejí z ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 6892-2. Snahou metody je využívat normalizovaných postupů v poměru k velikostem vzorků.

7.1. Zkoušky standardních vzorků

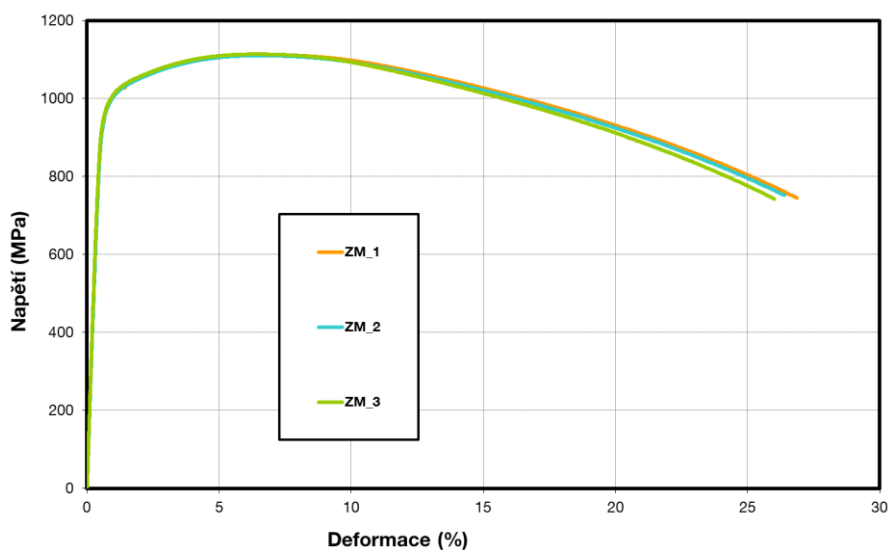
Standardní zkouška tahem byla realizována dle ČSN EN ISO 6892-1 na vzorcích kruhového průřezu o průměru aktivní části 10 mm a s měrnou délkou 50mm. Vzorky byly vyrobeny třískovým obráběním na CNC soustruhu s drsností povrchu Ra 1,6 μm. Měření byla realizována za kvazi-statických zatěžovacích podmínek při pokojové teplotě vždy na sadě tří zkušebních těles. Před a po zkoušce byla provedena měření charakteristických rozměrů vzorků pro následné vyhodnocení pevnostních a deformačních charakteristik ze zkoušky tahem. Zkoušky tahem byly realizovány na elektromechanickém zkušebním systému Zwick Z 250 vybaveném hydraulickými čelistmi a laserovým snímačem deformace, **Obr. 12**.

Naměřené záznamy jsou znázorněny na **Obr. 13**, a výsledky zkoušek jsou shrnuty v **Tab. 2**.

Jak záznamy, tak i vyhodnocené výsledky ukázaly minimální rozptyl hodnot, což potvrzuje homogenitu materiálu a vysokou opakovatelnost výsledků měření



Obr. 12 Elektromechanický zkušební stroj Zwick Z250 vybavený hydraulickými čelistmi, laserových extenzometrem a mechanickým extenzometrem



Obr. 13 Graf výsledku klasické tahové zkoušky základního materiálu

Tab. 2 Výsledky klasických tahových zkoušek ze základního materiálu

Vzorek	Tepl. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
ZM_1	20	10,00	6,48	50,00	59,03	201	958	1113	6,0	18,1	58,0
ZM_2	20	10,00	6,52	50,00	58,30	191	962	1110	6,0	16,6	57,6
ZM_3	20	10,00	6,56	50,00	58,60	200	964	1114	5,8	17,2	57,0
Průměr						197	962	1113	5,9	17,3	57,5
Směr.odch.						4,46	2,48	1,54	0,09	0,62	0,41

7.2. Měření na miniaturních vzorcích

Zkoušky tahem na miniaturních zkušebních vzorcích byly realizovány za kvazistatických podmínek při rychlostech deformace srovnatelných se standardními zkušebními vzorky. Zkoušky byly provedeny za pokojové teploty.

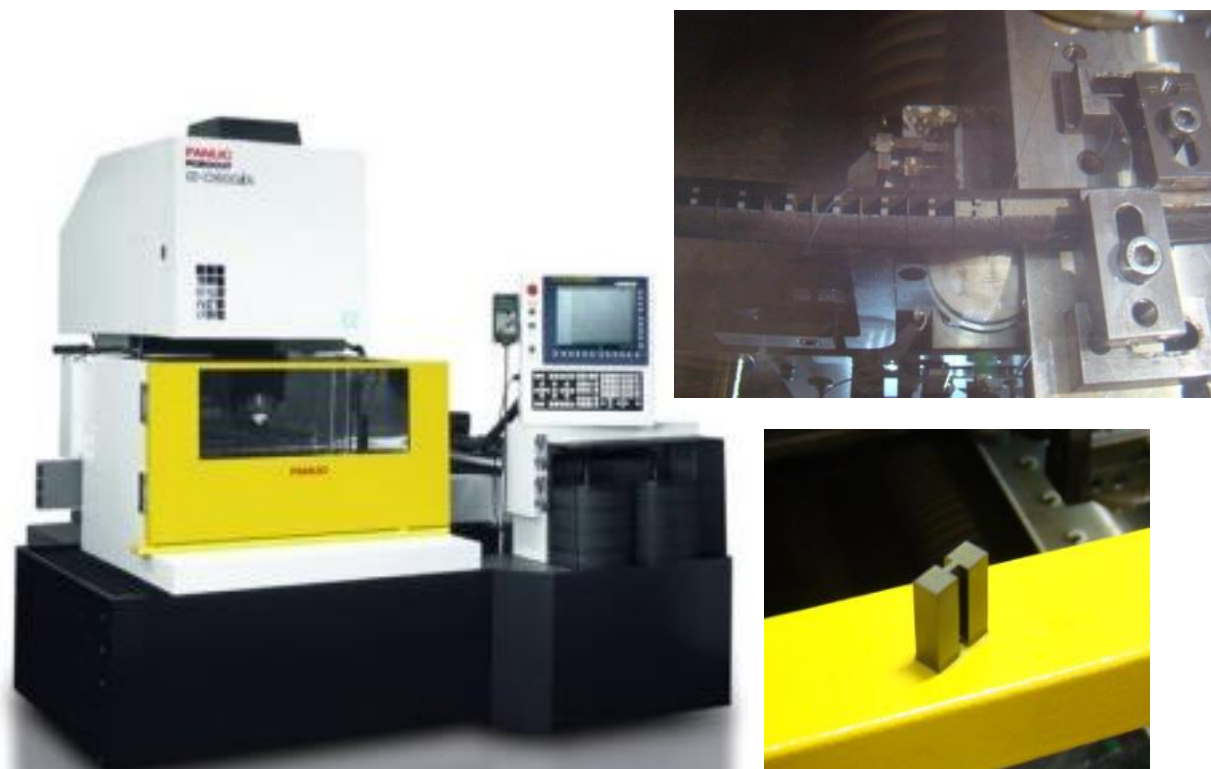
Realizace zkoušek na miniaturních zkušebních těleších má určitá specifika, jedním z nich je vysoký vliv výrobní technologie vzorků na hodnoty naměřené na zkoušených těleších. V této práci je sledován vliv výroby vzorků na vyhodnocené mechanické charakteristiky a cílem je nalezení nejvhodnějšího způsobu technologie jejich výroby.

Výroba miniaturních vzorků má dvě etapy. V první je vyrobena silueta zkušebního tělesa na polotovaru. Ve druhé etapě dojde k rozřezu polotovaru na vzorky o tloušťce cca 0,5mm.

Geometrie výsledného miniaturního vzorku je znázorněna na **Obr. 11**.

7.2.1. Výroba polotovarů pro miniaturní vzorky

Výroba tvaru těla miniaturních vzorků byla provedena jednak klasickým frézováním a jednak výrobou pomocí elektrojiskrového obráběcího zařízení FANUC Alfa C600, **Obr. 14**. V případě elektroerozivního obrábění byly realizovány tři postupy: jednořezově, třířezově a pětiřezově. Po vyrobení polotovaru byla změřena drsnost povrchu na jednotlivých výrobcích v místě drážky (těla vzorku), jak je uvedeno v **Tab. 3**. Měření bylo provedeno profiloměrem SURTRONIC 25 a vyhodnoceno pomocí programu TalyProfile Lite.



Obr. 14 Zařízení pro elektrojiskrové obrábění FANUC Alfa C600

Tab. 3 Drsnost boku těla vzorků

Způsob výroby	Rz	Ra	Rp	Rt
Frézka	1,64 μm	0,308 μm	0,865 μm	2,51 μm
1 řez drátovou řezačkou	16,0 μm	2,60 μm	8,56 μm	21,2 μm
3 řezy drátovou řezačkou	4,63 μm	0,677 μm	2,46 μm	5,87 μm
5 řezů drátovou řezačkou	1,66 μm	0,226 μm	0,757 μm	2,77 μm

Rz - největší výška profilu

Ra - průměrná aritmetická úchylka

Rp - největší výška výstupku

Rt - celková výška profilu

7.2.2. Výroba miniaturních vzorků

Rozřezání polotovaru na jednotlivé vzorky bylo zvoleno jednak drátovou řezačkou a druhým způsobem byl rozřez metalografickou pilou znázorněnou na **Obr.15**. Pro zdokonalení povrchu byly ještě použity další dva způsoby přípravy. Broušení metalografickým brusným papírem se zrnitostí 1200 a leštění. Výsledné dosažené drsnosti povrchu jsou shrnuty v **Tab.4**.

Tab. 4 Drsnost plochy těla vzorků

Způsob výroby	Rz	Ra	Rp	Rt
Drátová řezačka	16,5 μm	2,94 μm	8,16 μm	18,8 μm
Metalografická pila	1,77 μm	0,359 μm	0,870 μm	1,86 μm
Metalografický brusný papír 1200	0,310 μm	0,0315 μm	0,142 μm	0,350 μm
Leštěný	0,770 μm	0,0573 μm	0,426 μm	0,770 μm



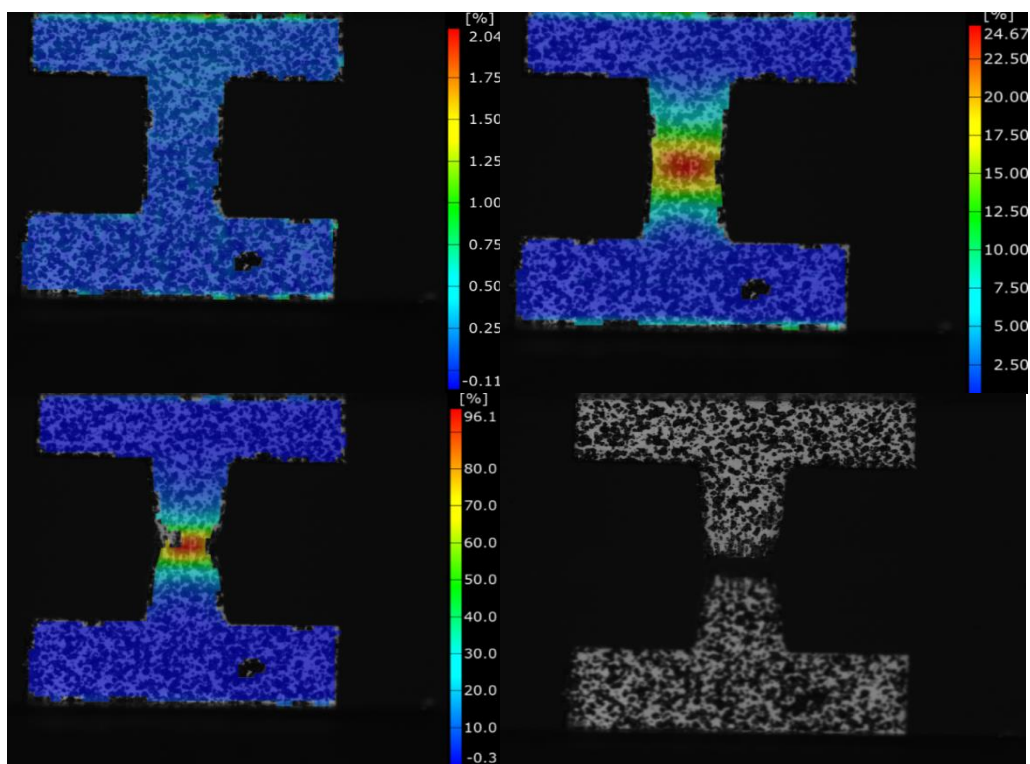
Obr. 15 Metalografická pila

7.2.3. Zkoušky tahem

Zkoušky byly provedeny na zkušebním zařízení LabControl s lineárním pohonem se silovou kapacitou 5kN. Deformace aktivní části vzorku byla měřena pomocí zařízení pro digitální obrazovou korelaci ARAMIS **Obr. 16**. Příklad jednotlivých deformačních kroků v průběhu zkoušky tahem je znázorněn na **Obr. 17**.



Obr. 16 Zkušební stroj LabControl s měřícím zařízením ARAMIS



Obr. 17 Průběh záznamu zkoušky miniaturního zkušebního tělesa pomocí systému obrazové korelace ARAMIS

Vyhodnocení tažnosti na miniaturních zkušebních tělesech bylo provedeno s využitím vztahu (10), jenž umožňuje přepočítání tažnosti mezi vzorky s různými měrnými délkami [14]. V tomto případě byl proveden přepočítání mezi hodnotami tažnosti A_3 vyhodnocené na miniaturních vzorcích na A_5 , aby mohly být naměřené hodnoty porovnány s hodnotami naměřenými na standardních vzorcích.

$$A_x = \frac{A_{gm} * L_{0x} + (A_m - A_{gm}) * L_{0m}}{L_{0x}} \quad (10)$$

První sérií zkoušek jsou vzorky řezané metalografickou pilou (písmeno "P" v názvu vzorku uvedené jako poslední písmeno před pořadovým číslem vzorku). Z názvu vzorku je dále zřejmé, jakým způsobem byl vyroben polotovar na vzorky:

První písmeno "F" v názvu vzorku značí výrobu polotovaru frézku

První číslo + písmeno "IR" v názvu vzorku značí výrobu polotovaru drátovou řezačkou jedním řezem

První číslo + písmeno "3R" v názvu vzorku značí výrobu polotovaru drátovou řezačkou třemi řezy

První číslo + písmeno "5R" v názvu vzorku značí výrobu polotovaru drátovou řezačkou pěti řezy

Výsledky zkoušek tahem miniaturních zkušebních těles jsou shrnuty po jednotlivé způsoby přípravy vzorků v tabulkách **Tab. 5-7**.

Tab. 5 Výsledky ze zkoušek tahem na první sérii miniaturních vzorků (řezané metalografickou pilou)

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	a _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
FP-1	20	0,56	1,61	0,45	1,38	2,74	3,19	197	862	1061	4,3	16,4	31,7	10,9
FP-3	20	0,60	1,72	0,50	1,52	2,74	3,02	207	921	1079	2,7	10,2	25,7	6,8
FP-4	20	0,60	1,51	0,49	1,22	2,74	3,23	207	820	1100	4,3	17,9	33,8	11,8
FP-5	20	0,61	1,73	0,51	1,49	2,74	3,07	203	905	1066	2,1	12,0	28,0	7,5
Průměr								204	877	1076	3,3	14,1	29,8	9,3
Směr.odch.								4,20	39,46	15,03	0,97	3,14	3,15	2,14
1RP_1	20	0,62	1,52	0,39	1,08	2,74	3,28	208	924	1046	4,5	19,7	55,1	12,8
1RP_2	20	0,61	1,49	0,36	1,10	2,74	3,28	210	940	1065	4,9	19,7	56,1	13,0
1RP_4	20	0,62	1,51	0,40	1,29	2,74	3,27	204	917	1064	5,1	19,3	45,2	12,9
1RP_5	20	0,62	1,50	0,41	1,11	2,74	3,29	200	783	1051	5,2	20,1	51,0	13,3
Průměr								206	891	1056	4,9	19,7	51,9	13,0
Směr.odch.								3,71	62,80	8,12	0,27	0,28	4,29	0,19
3RP_1	20	0,63	1,57	0,41	1,10	2,74	3,29	194	933	1060	5,2	20,1	54,0	13,4
3RP_2	20	0,62	1,53	0,39	1,12	2,74	3,29	201	950	1076	4,6	20,1	53,8	13,1
3RP_3	20	0,64	1,50	0,38	1,18	2,74	3,30	209	967	1088	5,0	20,4	53,2	13,4
3RP_4	20	0,61	1,59	0,39	1,11	2,74	3,30	209	905	1041	5,0	20,4	55,2	13,4
3RP_5	20	0,62	1,54	0,45	1,12	2,74	3,26	206	958	1068	4,4	19,0	46,8	12,4
Průměr								204	942	1067	4,8	20,0	52,6	13,1
Směr.odch.								5,87	22,02	15,77	0,29	0,52	2,97	0,39
5RP_1	20	0,62	1,54	0,42	1,07	2,74	3,29	208	858	1082	5,2	20,1	52,9	13,3
5RP_2	20	0,62	1,52	0,42	1,12	2,74	3,29	209	964	1099	4,8	20,1	50,2	13,2
5RP_3	20	0,64	1,51	0,40	1,12	2,74	3,31	198	845	1087	5,0	20,8	53,5	13,6
5RP_4	20	0,62	1,54	0,42	1,17	2,74	3,30	200	894	1091	4,8	20,4	48,5	13,4
5RP_5	20	0,61	1,52	0,44	1,21	2,74	3,28	208	959	1091	4,9	19,7	42,7	13,0
Průměr								204	904	1090	4,9	20,2	49,5	13,3
Směr.odch.								4,53	49,89	5,46	0,15	0,37	3,88	0,20

Druhou sérií zkoušek jsou vzorky řezané drátovou řezačkou (písmeno “D” v názvu vzorku uvedené jako poslední písmeno před pořadovým číslem vzorku). Z názvu vzorku je dále zřejmé, jakým způsobem byl vyroben polotovaru na vzorky:

První písmeno “F” v názvu vzorku značí výrobu polotovaru frézku

První číslo + písmeno “IR” v názvu vzorku značí výrobu polotovaru drátovou řezačkou jedním řezem

První číslo + písmeno “3R” v názvu vzorku značí výrobu polotovaru drátovou řezačkou třemi řezy

První číslo + písmeno “5R” v názvu vzorku značí výrobu polotovaru drátovou řezačkou pěti řezy.

Tab. 6 Výsledky ze zkoušek tahem na druhé sérii miniaturních vzorků (řezané drátovou řezačkou)

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	a _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _U mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
FD-1	20	0,54	1,69	0,43	1,51	2,71	3,03	195	900	1023	3,4	11,8	29,3	7,9
FD-2	20	0,55	1,68	0,47	1,50	2,71	3,07	201	888	1012	4,1	13,3	23,0	9,1
FD-3	20	0,55	1,65	0,48	1,48	2,71	3,02	200	807	1005	3,1	11,4	21,9	7,6
FD-4	20	0,55	1,67	0,47	1,51	2,71	3,03	191	894	1014	3,5	11,8	22,1	8,0
FD-5	20	0,55	1,67	0,44	1,48	2,71	3,04	196	842	1010	2,6	12,2	28,8	7,8
Průměr								196	866	1013	3,4	12,1	25,0	8,1
Směr.odch.								3,60	35,96	5,86	0,49	0,65	3,32	0,53
1RD_1	20	0,55	1,51	0,42	1,24	2,71	3,14	191	853	966	5,2	15,9	37,1	11,0
1RD_2	20	0,55	1,51	0,43	1,21	2,71	3,15	200	844	969	4,8	16,2	37,0	11,0
1RD_3	20	0,55	1,51	0,40	1,28	2,71	3,14	199	748	987	4,6	15,9	37,8	10,7
1RD_4	20	0,55	1,51	0,41	1,22	2,71	3,16	201	775	966	5,3	16,6	39,9	11,4
1RD_5	20	0,55	1,51	0,43	1,25	2,71	3,16	193	723	970	5,1	16,6	35,0	11,3
Průměr								197	789	972	5,0	16,2	37,4	11,1
Směr.odch.								4,11	51,67	7,75	0,26	0,31	1,58	0,25
3RD_1	20	0,55	1,53	0,42	1,26	2,71	3,14	199	884	988	4,6	15,9	36,9	10,7
3RD_2	20	0,55	1,52	0,43	1,26	2,71	3,14	196	902	1002	4,6	15,9	35,1	10,7
3RD_3	20	0,55	1,53	0,42	1,26	2,71	3,16	199	760	993	5,1	16,6	36,9	11,3
3RD_4	20	0,55	1,52	0,41	1,26	2,71	3,14	197	781	989	5,0	15,9	38,6	10,9
3RD_5	20	0,55	1,52	0,41	1,28	2,71	3,16	199	738	980	5,1	16,6	37,8	11,3
Průměr								198	813	991	4,9	16,2	37,1	11,0
Směr.odch.								1,31	66,96	7,19	0,23	0,34	1,17	0,27
5RD_1	20	0,55	1,52	0,41	1,24	2,71	3,16	192	850	1009	4,9	16,6	38,7	11,2
5RD_2	20	0,55	1,52	0,41	1,27	2,71	3,14	201	909	1013	4,7	15,9	37,3	10,7
5RD_3	20	0,55	1,52	0,41	1,27	2,71	3,15	198	748	997	4,9	16,2	37,6	11,0
5RD_4	20	0,55	1,53	0,40	1,25	2,71	3,17	205	885	1010	5,0	17,0	40,2	11,5
5RD_5	20	0,56	1,52	0,41	1,27	2,71	3,15	195	735	982	4,8	16,2	38,5	11,0
Průměr								198	825	1002	4,9	16,4	38,5	11,1
Směr.odch.								4,55	71,20	11,38	0,10	0,38	1,02	0,26

Poslední, pouze doplňkovou, sérií zkoušek s omezeným počtem vzorků na miniaturních vzorcích jsou vzorky řezané drátovou řezačkou (písmeno “D“ v názvu vzorku) a následně broušené metalografickým brusným papírem se zrnitostí 1200 (číslo “1200“ v názvu vzorku)

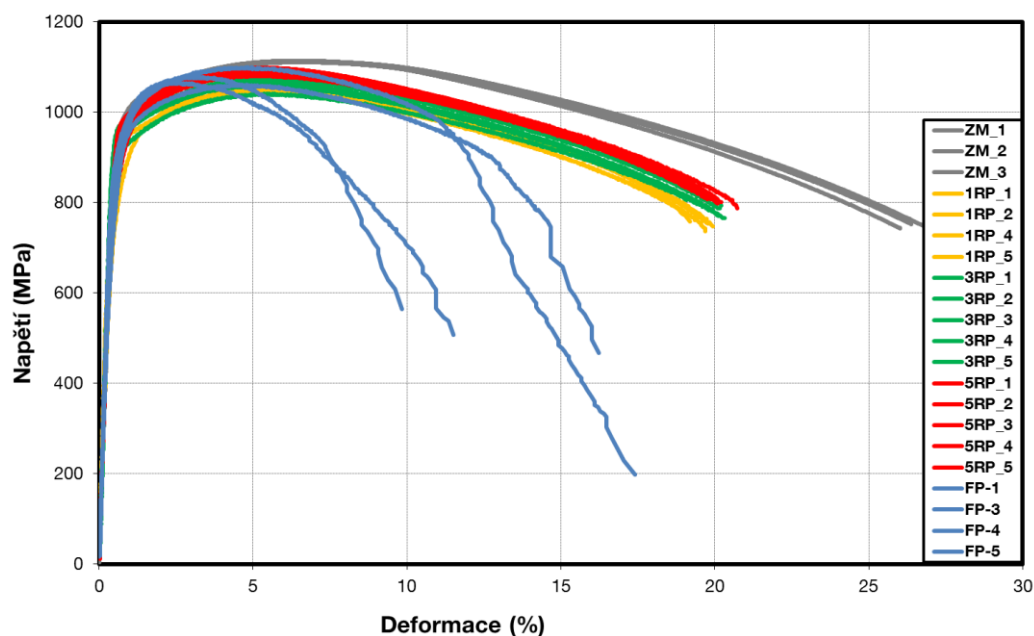
Tab. 7 Výsledky ze zkoušek tahem na třetí sérii miniaturních vzorků (řezané drátovou řezačkou a následně broušené metalografickým brusným papírem se zrnitostí 1200)

Vzorek	Templ. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	a _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
FD1200_2	20	0,48	1,65	0,37	1,46	2,74	3,13	206	821	1066	3,4	14,3	32,2	9,3
1RD1200_3	20	0,48	1,53	0,33	1,20	2,74	3,22	193	790	1033	5,0	17,6	46,6	11,9
1RD1200_4	20	0,48	1,57	0,32	1,24	2,74	3,24	193	765	1014	4,8	18,3	47,3	12,2
3RD1200_5	20	0,47	1,54	0,31	1,22	2,74	3,23	198	935	1085	4,9	17,9	47,8	12,0
3RD1200_6	20	0,48	1,55	0,31	1,20	2,74	3,22	193	954	1065	4,8	17,7	49,6	11,8
3RD1200_7	20	0,47	1,55	0,28	1,22	2,74	3,22	195	864	1052	4,7	17,7	52,7	11,4
5RD1200_8	20	0,47	1,53	0,31	1,20	2,74	3,22	207	862	1068	4,6	17,8	49,4	11,9

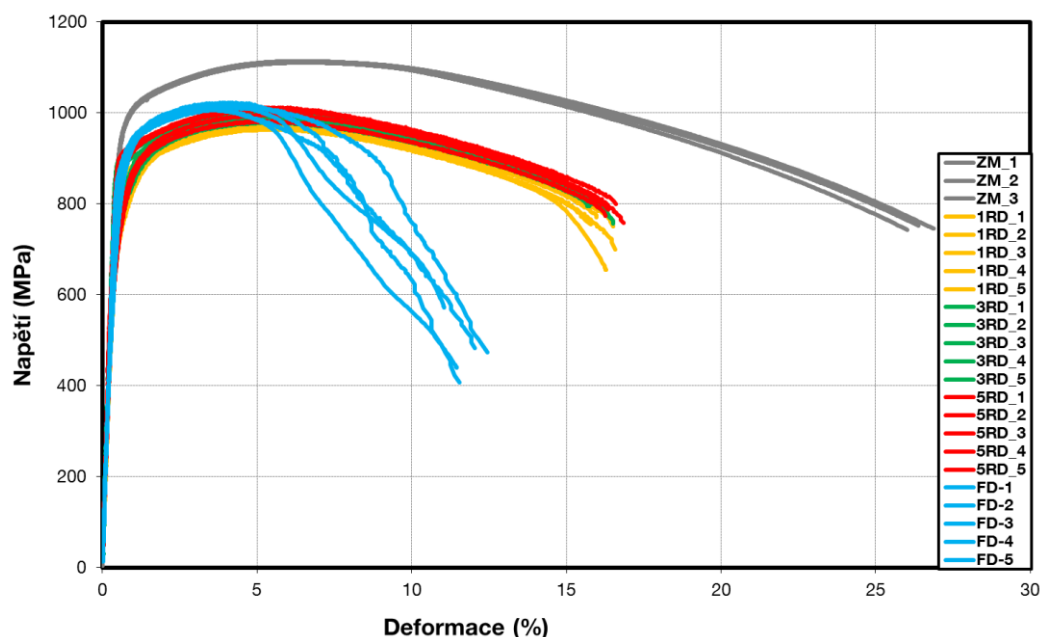
7.3. Porovnání výsledků a následná volba nejvhodnějšího způsobu výroby

Pro návrh vhodné výrobní technologie miniaturních zkušebních vzorků jsou použity výsledky shrnuté v **Tab. 5-7** a naměřené záznamy ze zkoušek tahem zobrazených v **Obr. 18-20**.

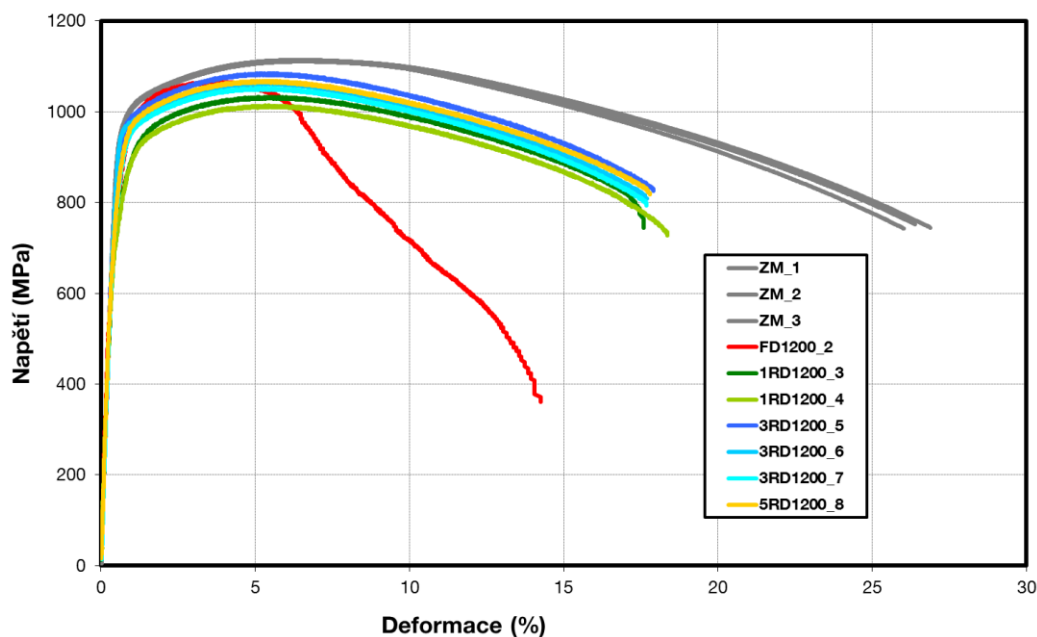
Výsledky vykazují velmi dobrou opakovatelnost a v případech jednotlivých odlehklých výsledků, jsou tyto jasně identifikovatelné.



Obr. 18 Porovnací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků řezaných metalografickou pilou



Obr. 19 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků řezaných drátovou řezačkou



Obr. 20 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků řezaných drátovou řezačkou a následně broušené metalografickým brusným papírem se zrnitostí 1200

Řezání vzorků drátovou řezačkou se ukázalo jako nevhodné. Ani doplňkové měření se zbroušeným povrchem metalografickým brusným papírem nedosahuje lepších výsledků než rozřez metalografickou pilou. Z naměřených hodnot převedených do tabulek a grafů je zřejmé, že nejvhodnějším způsobem výroby je polotovar vyrobený pěti řezy drátovou řezačkou a následné rozřezání metalografickou pilou. Tento způsob výroby vzorků byl aplikován pro veškeré následující vzorky.

8. Posouzení vlivu velikosti původního austenitického zrna

Vzhledem k malé velikosti uvažovaných miniaturních zkušebních těles, je nezbytné vzít v úvahu vliv počtu zrn po tloušťce vzorku na srovnatelnost se standardními vzorky. Za tímto účelem byl realizován experimentální program posuzující vliv velikosti výchozího austenitického zrna na výsledky zkoušek tahem miniaturních vzorků. Pro realizaci zkoušek je nejprve nutné navrhnout teplotní režimy pro dosažení požadovaného rozsahu velikostí zrn od cca. 5 do 300 μ m. Na základě transformačních a popouštěcích diagramů byly navrženy teplotní režimy, jež byly aplikovány na malé vzorky o rozměrech cca 10x10x10mm pro posouzení mikrostruktury. Na těchto vzorcích byly následně provedeny metalografické analýzy. Na základě vyhodnocených velikostí zrn byly navrženy teplotní režimy pro zpracování materiálu na výrobu vzorků pro zkoušky tahem. Z takto připravených materiálů byly následně vyrobeny standardní a miniaturní vzorky pro zkoušku tahem.

8.1. Tepelné zpracování polotovarů

Pro dosažení požadovaných velikostí zrn byly provedeny čtyři teplotní režimy dle **Tab. 8**. Příklady vzniklých struktur jsou znázorněny na **Obr. 21-25**.

Tab. 8 Tabulka materiálů tepelně zpracovaných a popuštěných pro změnu velikosti původního austenitického zrna

Označení sady	Teplota kalení	Doba výdrže	Tvrdost po kalení	Teplota popuštění	Doba výdrže	Tvrdost po popuštění	Velikost austenitického zrna	G
ZM	-	-	-	-	-	-	11,8 μ m	9,5
Z1	850 °C	0,5 h	48,7 HRC	600 °C	2 h	33,8 HRC	7,63 μ m	10,5
Z2	1000 °C	1 h	39,6 HRC	600 °C	2 h	34,1 HRC	16,58 μ m	8,5
Z3	1100 °C	1 h	30,5 HRC	600 °C	2 h	32,0 HRC	53,02 μ m	5
Z4	1200 °C	1 h	28,9 HRC	600 °C	2 h	31,9 HRC	185,36 μ m	1,5

Na vzorcích byly připraveny metalografické výbrusy. Analyzované výbrusy ZM, Z1, Z2 byly leptány nasyceným roztokem kyseliny pikrové s alkylbenzensulfonátem sodným a analyzované výbrusy Z3 a Z4 byly leptány 3% Nitalem. Následně byla stanovena velikost zrna úsekovou metodou na základě normy ČSN EN ISO 643.

Mikrostruktura všech vzorků je tvořena popuštěným martenzitem s postupně rostoucí velikostí zrna. Mikrostruktura je homogenní bez zřejmé přítomnosti větších nekovových vměstků s viditelnými hranicemi původního austenitického zrna.



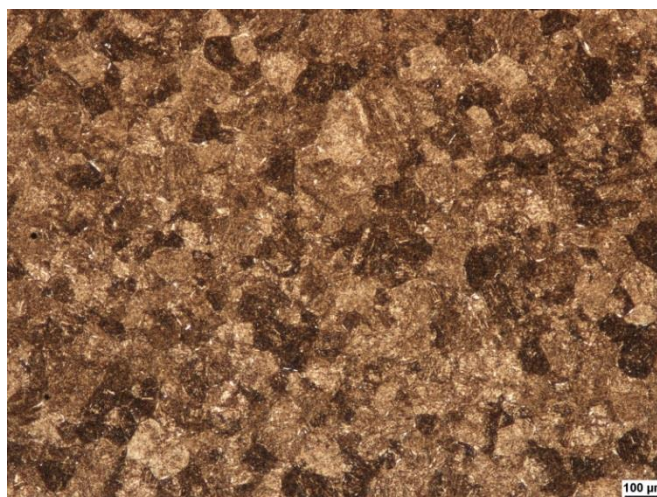
Obr. 21 Mikrostruktura základního materiálu



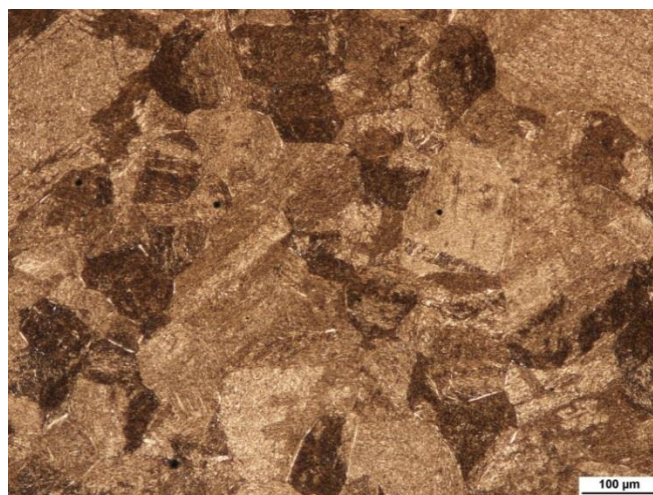
Obr. 22 Mikrostruktura materiálu Z1



Obr. 23 Mikrostruktura materiálu Z2



Obr. 24 Mikrostruktura materiálu Z3

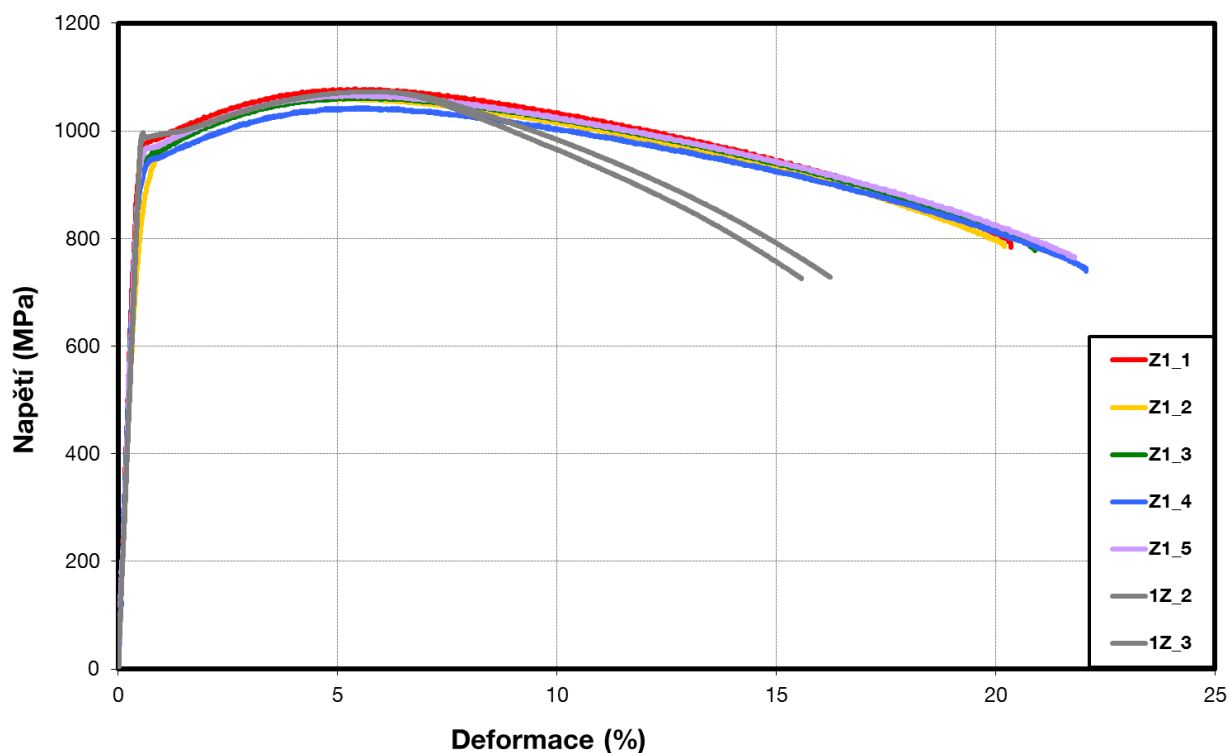


Obr. 25 Mikrostruktura materiálu Z4

8.2. Zkoušky tahem

Z polotovarů zpracovaných způsobem pro dosažení požadovaných velikostí zrn byla, pomocí technologie vybrané v předchozí části experimentálního programu, vyrobena zkušební tělesa, jež byla následně odzkoušena. Pro každý z polotovarů s různou velikostí zrn, byly realizovány zkoušky na standardních a miniaturních zkušebních vzorcích. Výsledky těchto zkoušek jsou graficky znázorněny na **Obr. 26-29**. Sumarizace výsledků je provedena v **Tab. 9-16**.

V této části experimentu byly značeny mikro-tahové vzorky Z1 – Z4 + pořadové číslo vzorku v sadě. Značení standardních vzorků 1Z – 4Z + pořadové číslo vzorku v sadě. V grafech jsou standardní vzorky znázorněny šedou barvou a mikro-tahové vzorky barevně (jak je uvedeno v legendě).



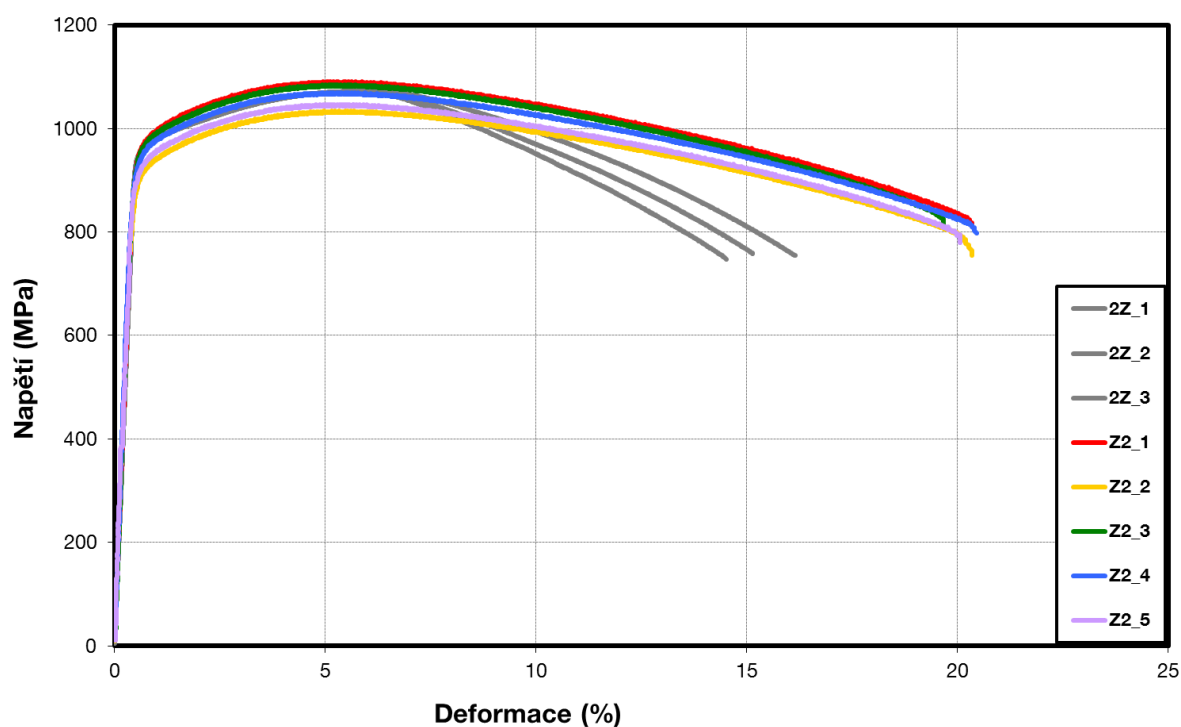
Obr. 26 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu Z1

Tab. 9 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu Z1

Vzorek	Tepl. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _U mm	R _{p0,2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
1Z_2	20	10,00	6,58	50,00	57,23	989	997	987	1073	5,2	14,5	56,8
1Z_3	20	10,00	6,51	50,00	57,35	988	991	987	1073	5,2	14,7	57,7
Průměr						988	994	987	1073	5,2	14,6	57,2
Směr.odch.						0,50	2,85	0,20	0,05	0	0,10	0,45

Tab. 10 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu Z1

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	D _u mm	b _U mm	L ₀ mm	L _U mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
Z1_1	20	0,60	1,53	0,33	1,23	2,68	3,22	209	980	1078	4,9	20,4	55,9	13,2
Z1_2	20	0,59	1,53	0,36	1,29	2,68	3,22	200	896	1062	4,7	20,3	49,2	13,0
Z1_3	20	0,62	1,53	0,39	1,28	2,68	3,24	209	947	1063	5,1	20,9	47,4	13,5
Z1_4	20	0,67	1,53	0,37	1,21	2,68	3,27	206	937	1043	5,1	22,1	56,1	14,2
Z1_5	20	0,66	1,53	0,38	1,19	2,68	3,26	203	969	1067	5,0	21,8	55,7	14,0
Průměr								205	946	1063	5,0	21,1	52,8	13,6
Směr.odch.								3,54	29,26	11,23	0,15	0,73	3,77	0,46



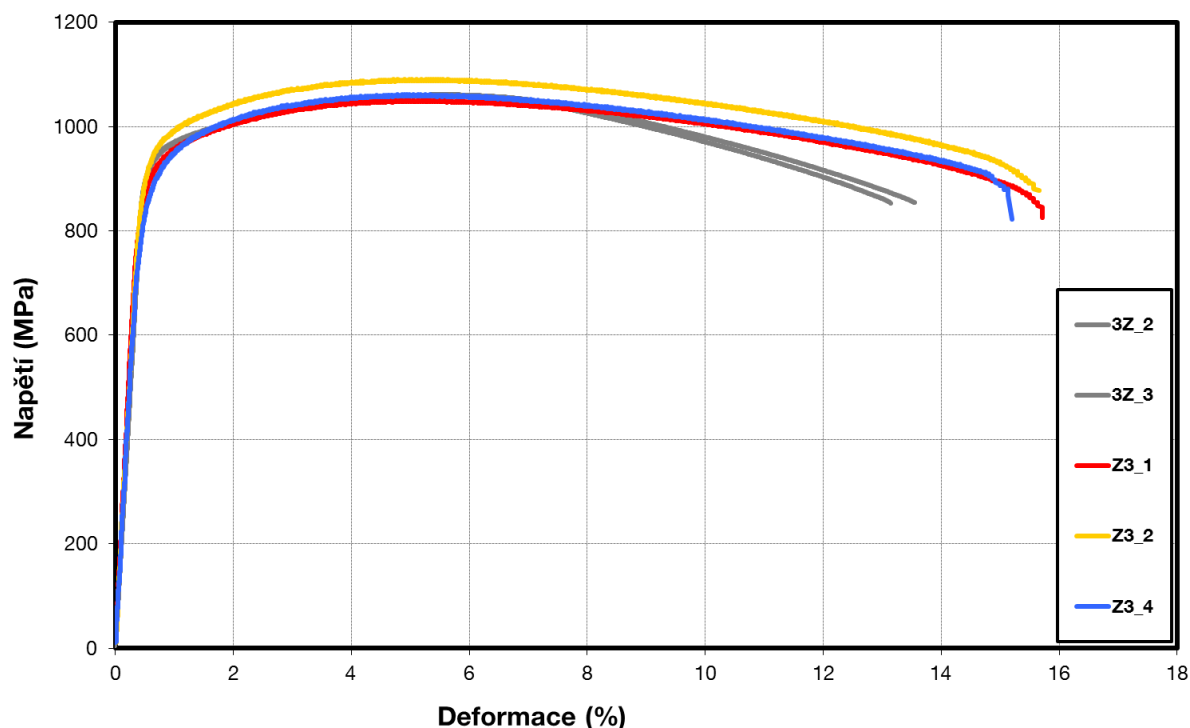
Obr. 27 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu Z2

Tab. 11 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu Z2

Vzorek	Tepl. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _U mm	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
2Z_1	20	10,00	6,60	50,00	57,25	961	1072	5,0	14,5	56,4
2Z_2	20	10,00	6,70	50,00	57,32	963	1072	5,2	14,6	55,2
2Z_3	20	10,00	6,61	50,00	56,82	963	1073	5,4	13,6	56,4
Průměr						962	1072	5,2	14,3	56,0
Směr.odch.						1,19	0,42	0,16	0,45	0,57

Tab. 12 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu Z2

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	D _u mm	b _U mm	L ₀ mm	L _U mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
Z2_1	20	0,65	1,53	0,42	1,27	2,68	3,22	208	965	1091	5,2	20,4	46,4	13,3
Z2_2	20	0,67	1,55	0,43	1,25	2,68	3,22	210	906	1034	5,1	20,4	48,6	13,3
Z2_3	20	0,63	1,53	0,40	1,28	2,68	3,20	208	959	1085	4,6	19,7	46,3	12,7
Z2_4	20	0,67	1,53	0,44	1,26	2,68	3,23	208	946	1070	4,9	20,7	46,6	13,3
Z2_5	20	0,66	1,54	0,45	1,28	2,68	3,22	209	921	1047	5,0	20,2	42,8	13,1
Průměr								209	939	1065	5,0	20,3	46,2	13,2
Směr.odch.								0,65	22,21	21,78	0,21	0,33	1,87	0,23



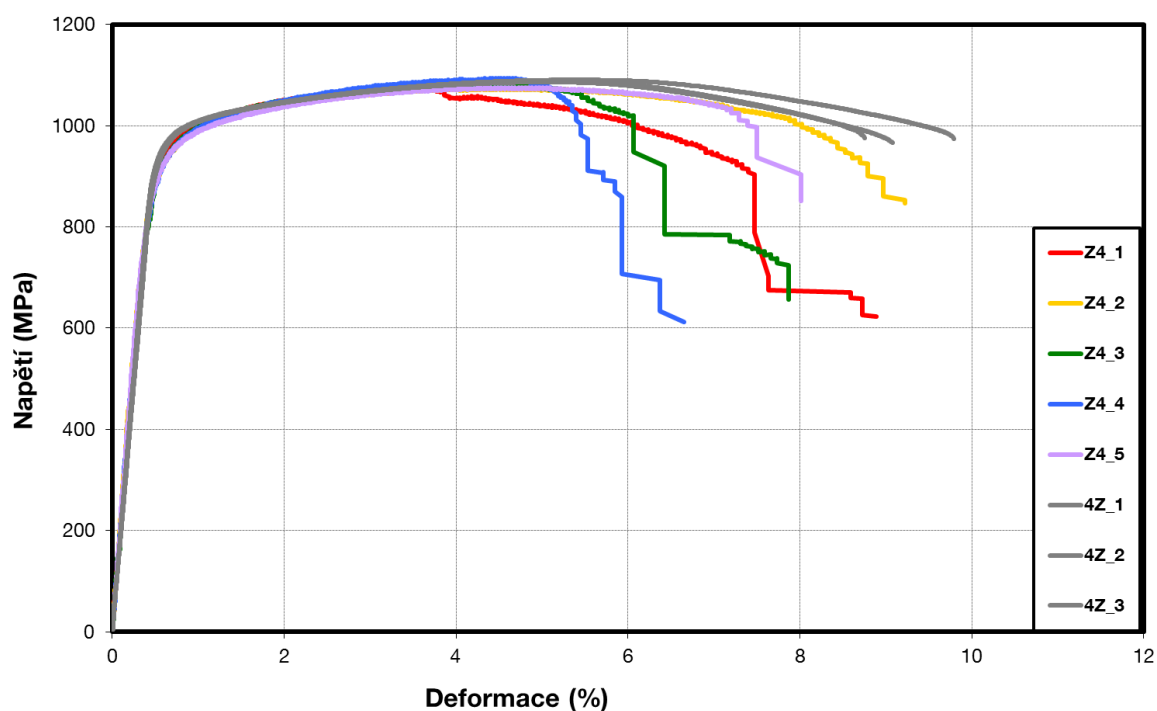
Obr. 28 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu Z3

Tab. 13 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu Z3

Vzorek	Tepl. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _U mm	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
3Z_2	20	10,00	7,44	50,00	56,35	937	1060	5,1	12,7	44,6
3Z_3	20	10,00	7,37	50,00	56,17	941	1061	5,1	12,3	45,7
Průměr						939	1061	5,1	12,5	45,2
Směr.odch.						1,95	0,50	0	0,20	0,55

Tab. 14 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu Z3

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	D _u mm	b _U mm	L ₀ mm	L _U mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
Z3_1	20	0,66	1,53	0,51	1,40	2,68	3,10	210	912	1051	4,8	15,8	29,2	10,7
Z3_2	20	0,65	1,51	0,51	1,38	2,68	3,10	210	948	1091	5,0	15,7	28,9	10,7
Z3_4	20	0,66	1,53	0,52	1,33	2,68	3,10	195	892	1062	4,8	15,7	31,1	10,6
Průměr								205	917	1068	4,9	15,7	29,8	10,7
Směr.odch.								7,19	23,33	17,04	0,09	0,05	0,97	0,05



Obr. 29 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu Z4

Tab. 15 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu Z4

Vzorek	Tepl. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _u mm	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
4Z_1	20	10,00	8,45	50,00	54,28	978	1091	4,9	8,6	28,6
4Z_2	20	10,00	8,43	50,00	54,73	973	1086	4,5	9,5	28,9
4Z_3	20	10,00	8,54	50,00	54,68	975	1088	4,5	9,4	27,1
Průměr						975	1088	4,7	9,1	28,2
Směr.odch.						1,72	1,75	0,19	0,40	0,79

Tab. 16 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu Z4

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	D _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
Z4_1	20	0,61	1,55	0,56	1,42	2,68	2,91	205	952	1077	2,9	8,9	16,5	6,1
Z4_2	20	0,64	1,53	0,58	1,47	2,68	2,92	209	936	1075	4,2	9,2	12,3	6,9
Z4_3	20	0,64	1,53	0,57	1,46	2,68	2,89	201	943	1084	3,7	7,8	14,8	5,9
Z4_4	20	0,66	1,53	0,58	1,49	2,68	2,85	209	935	1094	4,1	6,7	13,9	5,5
Z4_5	20	0,66	1,54	0,58	1,48	2,68	2,89	208	936	1076	4,1	8,0	16,3	6,2
Průměr								207	941	1081	3,8	8,1	14,8	6,1
Směr.odch.								3,06	6,46	7,16	0,48	0,88	1,56	0,46

9. Vyhodnocení vlivu velikosti zrn

Druhou částí zkoumání vlivu velikosti zrn na zkoušku tahem na miniaturních vzorcích je vliv velikosti zrna. Tato měření byla realizována na materiálu X5CrNi18-10 (1.4301). Nejprve bylo nutné navrhnout termomechanické zpracování pro dosažení požadované velikosti zrna, která byla stanovena v rozmezí cca. 10 – 350 μm . Na základě transformačních a popouštěcích diagramů byly navrženy termomechanické režimy, jež byly aplikovány na malé vzorky o rozměrech cca 10x10x10mm pro posouzení mikrostruktury. Na těchto vzorcích byly následně provedeny metalografické analýzy. Na základě vyhodnocených velikostí zrn byly navrženy režimy pro zpracování materiálu na výrobu vzorků pro zkoušky tahem. Z takto připravených materiálů byly následně vyrobeny standardní a miniaturní vzorky pro zkoušku tahem.

9.1. Návrh termomechanického zpracování

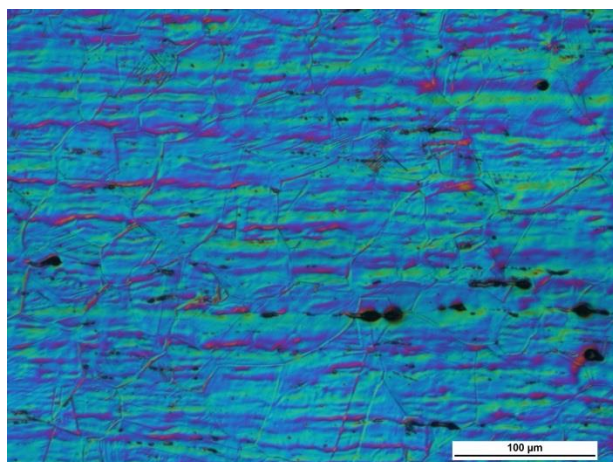
Základní stav u tohoto materiálu má velikost zrna 56 μm . Proto bylo nutné provést nejen zvětšení zrna, jak tomu bylo u předchozího experimentu, ale i zmenšení zrna. Tohoto bude dosaženo kovááním a následným žiháním po určitou dobu. Pro dosažení požadovaných velikostí zrn byl navržen jeden způsob tváření a dále byly provedeny čtyři teplotní režimy dle **Tab. 17**. Příklady vzniklých struktur jsou znázorněny na **Obr. 30-34**.

Tab. 17 Tabulka materiálů tvářených a tepelně zpracovaných pro změnu velikosti zrna

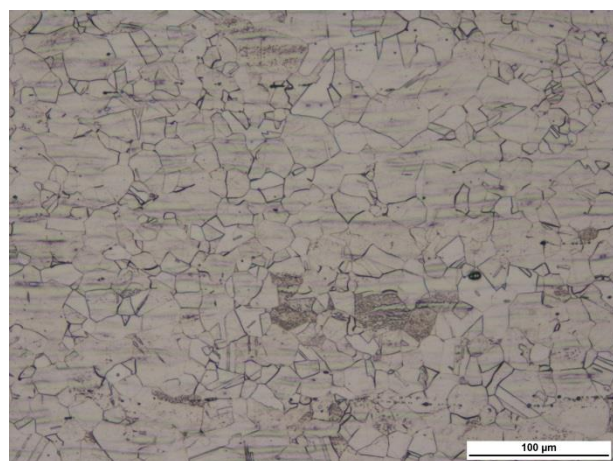
Číslo materiálu	Tváření (kování)	Teplota žihání	Doba výdrže	Velikost zrna
ZM	-	-	-	56 μm
3M	36 %	950 °C	3 min	16 μm
20M	36 %	950 °C	20 min	23 μm
5H	-	1200 °C	5 h	98 μm
16H	-	1210 °C	16 h	338 μm

Na vzorcích byly připraveny metalografické výbrusy. Mikrostruktura byla vyvolána leptadlem Beraha s peroxidem vodíku. Následně byla stanovena velikost zrna úsekovou metodou na základě normy ČSN EN ISO 643.

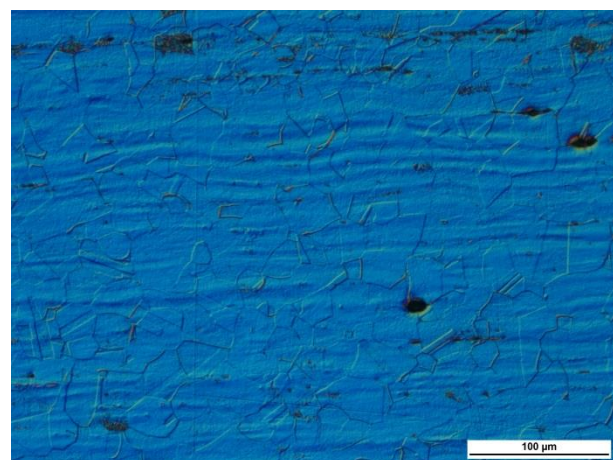
Mikrostruktura vzorků ZM, 3M a 20M je homogenní, jemnozrnná, tvořená austenitem. V mikrostruktuře se objevují žíhací dvojčata. Mikrostruktura vzorku 5H je střednězrnná, homogenní tvořená austenitem. Mikrostruktura vzorku 16H je heterogenní tvořená austenitem. Vyskytují se zde jak malá zrna, tak zrna o velikosti až 1 mm.



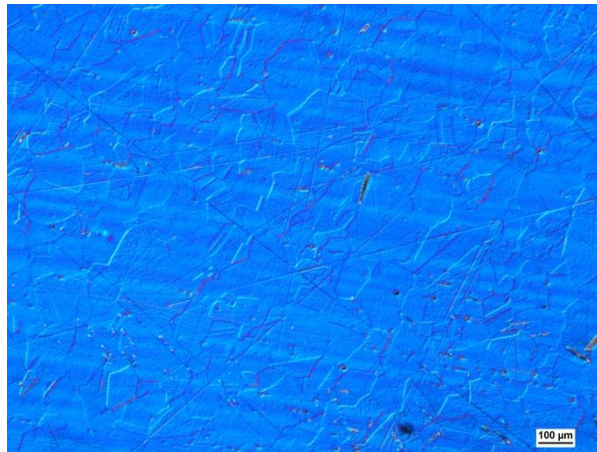
Obr. 30 Mikrostruktura základního materiálu (Nomarského kontrast)



Obr. 31 Mikrostruktura materiálu 3M



Obr. 32 Mikrostruktura materiálu 20M (Nomarského kontrast)



Obr. 33 Mikrostruktura materiálu 5H (Nomarského kontrast)

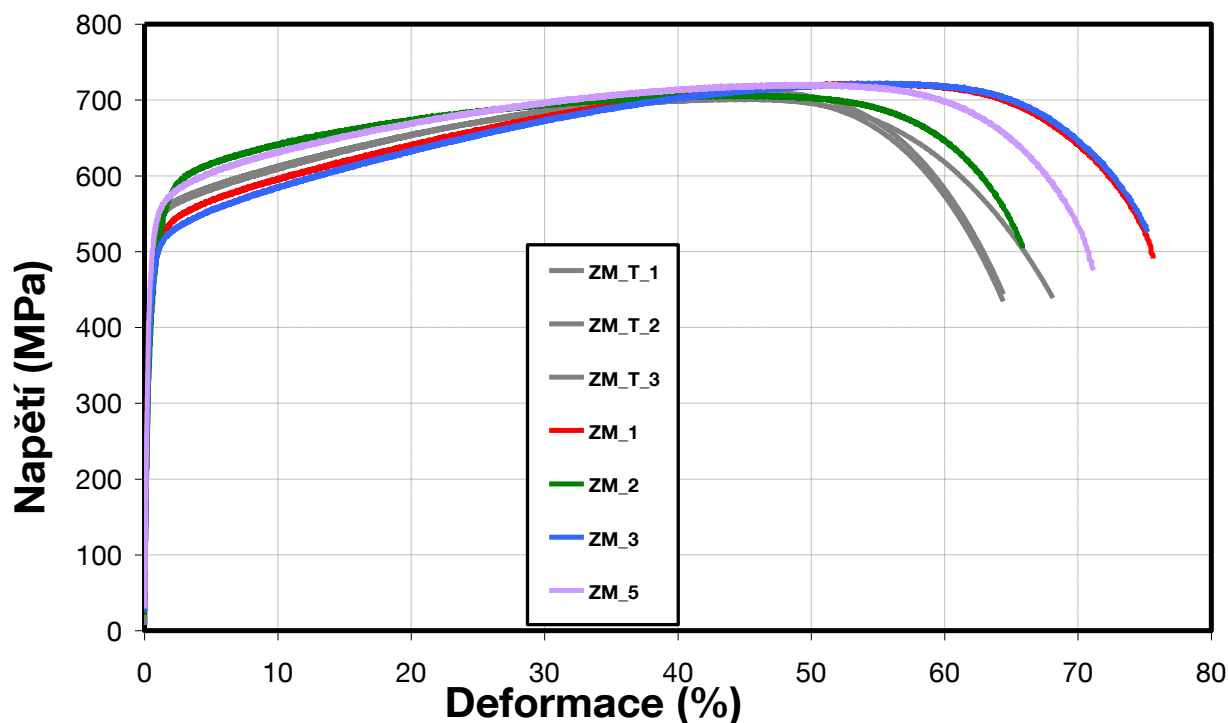


Obr. 34 Mikrostruktura materiálu 16H

9.2. Zkoušky tahem

Z polotovarů zpracovaných způsobem pro dosažení požadovaných velikostí zrn byla, pomocí technologie vybrané v předchozí části experimentálního programu, vyrobena zkušební tělesa, jež byla následně odzkoušena. Pro každý z polotovarů s různou velikostí zrn, byly realizovány zkoušky na standardních a miniaturních zkušebních vzorcích. Výsledky těchto zkoušek jsou graficky znázorněny na **Obr. 35-39**. Sumarizace výsledků je provedena v **Tab. 18-27**.

V této části experimentu byly značeny mikro-tahové vzorky ZM, 3M, 20M, 5H, 16H + pořadové číslo vzorku v sadě. Značení standardních vzorků ZM_T, 3M_T, 20M_T, 5H_T, 16H_T + pořadové číslo vzorku v sadě. V grafech jsou standardní vzorky znázorněny šedou barvou a mikro-tahové vzorky barevně (jak je uvedeno v legendě).



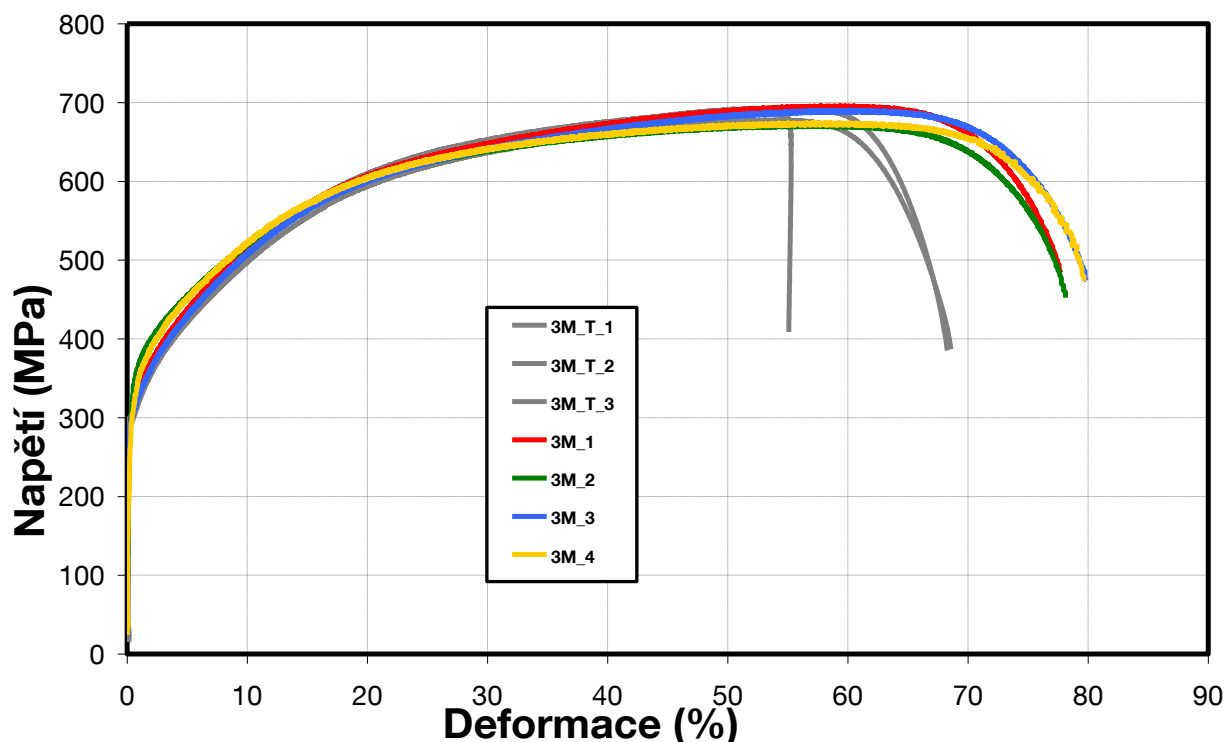
Obr. 35 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků ze základního materiálu

Tab. 18 Výsledky klasických tahových zkoušek ze základního materiálu Z4

Vzorek	Tepl. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
ZM_T_1	20	8,00	3,71	40,00	60,98	162	405	701	43,7	52,5	78,5
ZM_T_2	20	7,99	3,67	40,00	61,77	166	401	703	44,9	54,4	78,9
ZM_T_3	20	8,00	3,63	40,00	63,20	161	405	710	45,3	58,0	79,4
Průměr						163	404	705	44,6	55,0	78,9
Směr.odch.						1,90	1,96	3,66	0,68	2,28	0,37

Tab. 19 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích ze základního materiálu

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	a _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
ZM_1	20	0,61	1,54	0,24	0,90	2,73	4,79	162	413	723	54,7	75,6	77,3	66,1
ZM_2	20	0,59	1,54	0,23	0,87	2,73	4,52	160	379	707	44,9	65,6	78,0	56,2
ZM_3	20	0,57	1,54	0,21	0,82	2,73	4,79	163	405	722	53,8	75,3	80,2	65,6
ZM_5	20	0,57	1,53	0,21	0,84	2,73	4,67	162	475	721	50,2	71,1	79,9	61,6
Průměr								162	418	718	50,6	71,9	78,8	62,4
Směr.odch.								1,08	35,31	6,51	3,85	4,05	1,23	3,97



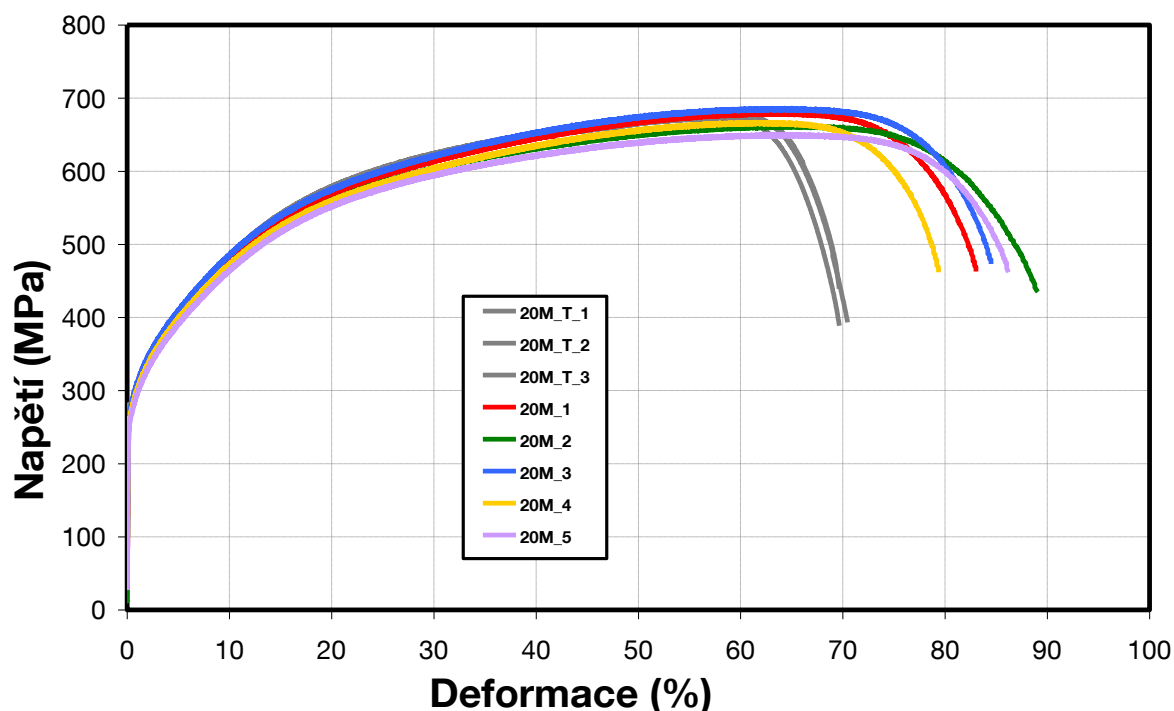
Obr. 36 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu 3M

Tab. 20 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu 3M

Vzorek	Tepl. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _U mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
3M_T_1	20	4,95	2,18	25,00	42,45	198	298	688	52,6	69,8	80,6
3M_T_2	20	4,98	2,20	25,00	42,69	194	302	693	54,1	70,8	80,5
3M_T_3	20	5,02	2,18	25,00	41,49	193	294	678	54,0	66,0	81,1
Průměr						195	298	686	53,6	68,8	80,7
Směr.odch.						2,33	3,23	6,15	0,68	2,07	0,26

Tab. 21 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu 3M

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	a _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _U mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
3M_1	20	0,57	1,55	0,21	0,76	2,69	4,78	191	300	696	59,0	77,7	82,1	69,1
3M_2	20	0,58	1,52	0,20	0,93	2,67	4,75	195	306	672	57,0	78,1	78,7	68,3
3M_3	20	0,60	1,54	0,19	0,82	2,70	4,85	193	295	691	60,4	79,8	83,0	70,9
3M_4	20	0,52	1,52	0,19	0,87	2,71	4,87	191	294	675	58,2	79,6	78,8	69,8
Průměr								193	299	683	58,7	78,8	80,7	69,5
Směr.odch.								1,55	4,73	10,11	1,24	0,91	1,93	0,95



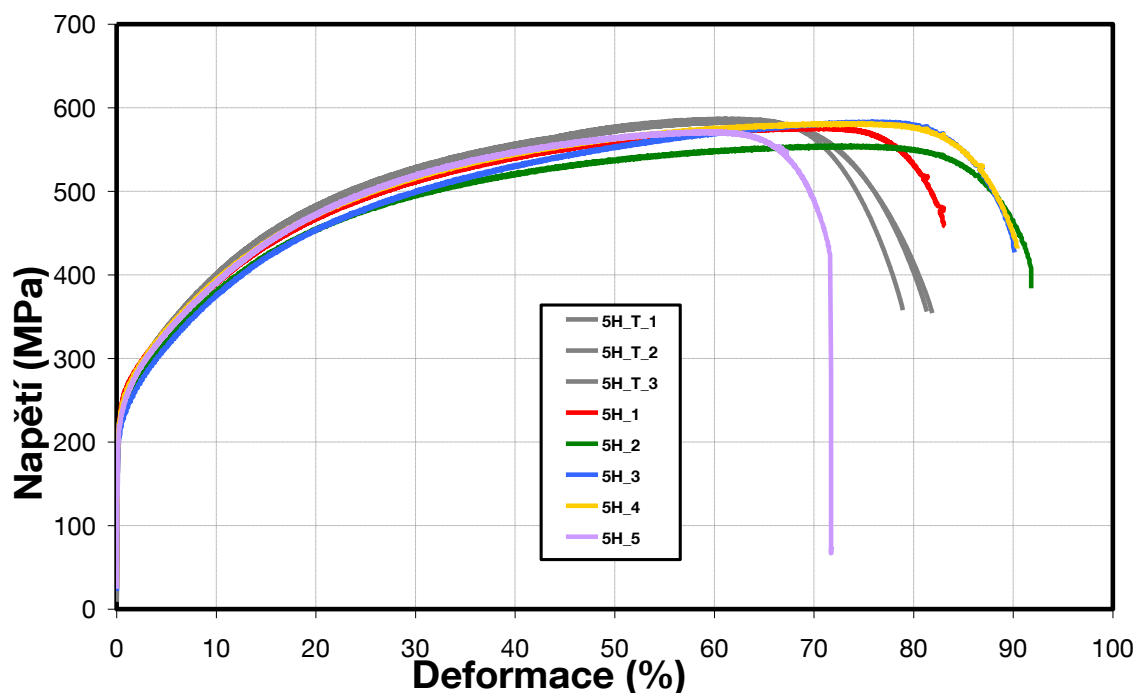
Obr. 37 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu 20M

Tab. 22 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu 20M

Vzorek	Tepł. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
20M_T_1	20	4,92	2,17	25,00	42,81	194	280	677	57,8	71,2	80,5
20M_T_2	20	4,95	2,16	25,00	43,20	192	278	679	56,5	72,8	81,0
20M_T_3	20	4,95	2,13	25,00	42,90	196	277	672	56,1	71,6	81,5
Průměr						194	278	676	56,8	71,9	81,0
Směr.odch.						1,72	1,21	2,95	0,73	0,68	0,41

Tab. 23 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu 20M

Vzorek	Tepł. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	a _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
20M_1	20	0,55	1,54	0,19	0,87	2,70	4,95	196	273	680	63,6	83,2	81,0	74,2
20M_2	20	0,75	1,54	0,26	0,82	2,71	5,13	192	267	662	64,8	89,1	81,6	78,0
20M_3	20	0,54	1,54	0,17	0,89	2,70	4,97	196	277	686	64,7	84,4	81,6	75,3
20M_4	20	0,51	1,55	0,16	0,86	2,71	4,86	191	270	667	61,0	79,3	82,9	70,9
20M_5	20	0,55	1,56	0,18	0,84	2,68	5,00	188	262	651	64,7	86,2	82,3	76,2
Průměr								193	270	669	63,7	84,4	81,9	74,9
Směr.odch.								2,81	5,14	12,78	1,45	3,25	0,66	2,36



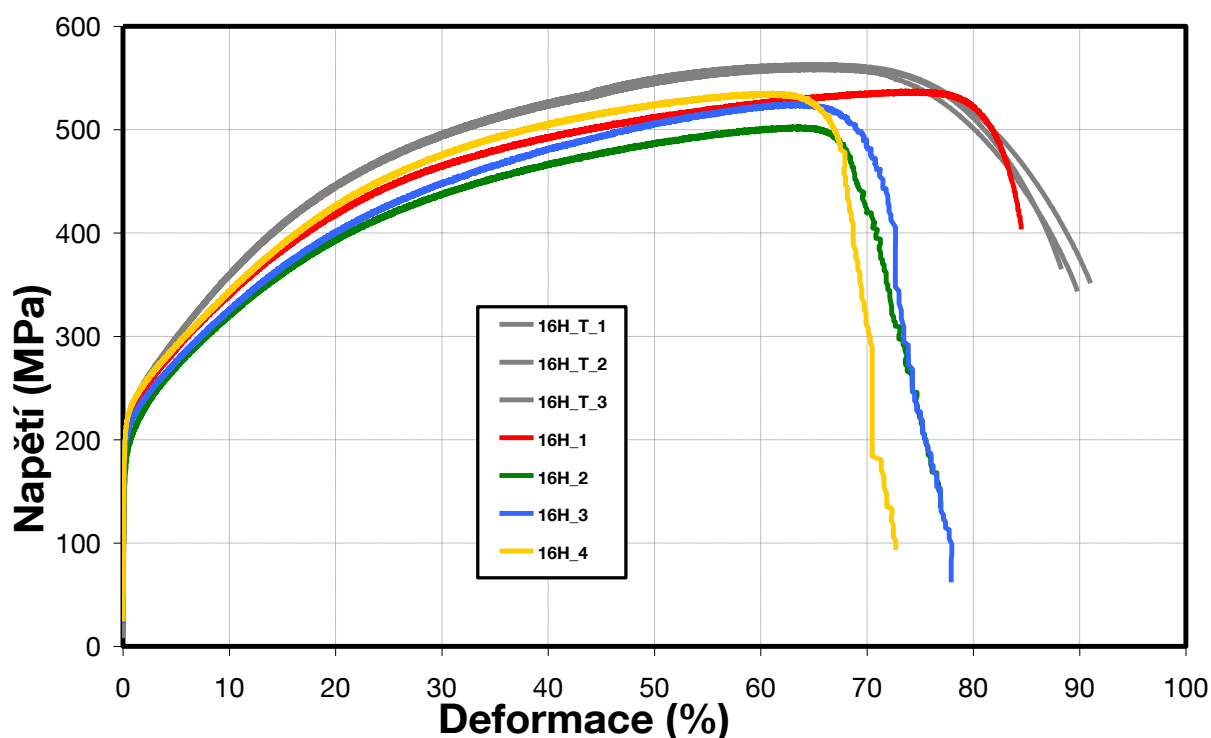
Obr. 38 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu 5H

Tab. 24 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu 5H

Vzorek	Tepł. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
5H_T_1	20	8,01	3,52	40,00	68,57	185	228	587	60,9	71,4	80,7
5H_T_2	20	7,98	3,46	40,00	70,31	184	225	584	61,8	75,8	81,2
5H_T_3	20	8,00	3,52	40,00	69,22	183	224	583	62,8	73,1	80,6
Průměr						184	226	585	61,8	73,4	80,8
Směr.odch.						0,78	1,99	1,81	0,78	1,81	0,26

Tab. 25 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu 5H

Vzorek	Tepł. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	a _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
5H_1	20	0,62	1,56	0,23	0,93	2,69	4,92	188	230	577	70,8	83,1	78,2	77,4
5H_2	20	0,51	1,53	0,17	0,85	2,69	5,15	184	223	555	73,4	91,7	81,2	83,3
5H_3	20	0,59	1,55	0,18	0,91	2,69	5,11	178	208	584	75,6	90,1	82,1	83,4
5H_4	20	0,56	1,56	0,18	0,95	2,69	5,11	182	228	582	74,2	90,3	80,5	82,8
5H_5	20	0,57	1,56	0,18	0,88	2,69	4,61	184	219	572	58,3	71,6	82,4	65,4
Průměr								183	222	574	70,5	85,4	80,9	78,5
Směr.odch.								3,24	7,84	10,29	6,28	7,50	1,50	6,90



Obr. 39 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu 16H

Tab. 26 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu 16H

Vzorek	Tepl. °C	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z %
16H_T_1	20	8,00	3,44	40,00	70,38	179	206	561	65,6	76,0	81,5
16H_T_2	20	7,99	3,46	40,00	71,50	181	208	559	63,9	78,8	81,2
16H_T_3	20	7,98	3,46	40,00	70,50	182	209	563	64,9	76,3	81,2
Průměr						181	208	561	64,8	77,0	81,3
Směr.odch.						0,99	1,11	1,92	0,70	1,26	0,14

Tab. 27 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu 16H

Vzorek	Tepl. °C	a ₀ mm	b ₀ mm	a _u mm	b _u mm	L ₀ mm	L _u mm	E GPa	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₃ %	Z %	A ₅ (přepočet) %
16H_1	20	0,59	1,53	0,17	0,91	2,70	4,98	184	200	538	74,5	84,5	82,6	79,9
16H_2	20	0,56	1,55	0,12	0,98	2,72	4,82	180	180	503	63,2	76,9	86,4	70,7
16H_3	20	0,62	1,54	0,17	0,90	2,70	4,82	188	201	525	62,9	78,6	84,1	71,4
16H_4	20	0,61	1,54	0,14	0,95	2,70	4,67	183	214	536	60,9	72,9	85,8	67,4
Průměr								184	199	525	65,4	78,3	84,7	72,3
Směr.odch.								3,14	12,30	13,69	5,34	4,17	1,49	4,61

10. Vyhodnocení experimentálního programu

V rámci této bakalářské práce byly realizovány zkoušky za cílem nalezení optimální výrobní technologie miniaturních vzorků pro dosažení co nejlepšího souhlasu mezi výsledky naměřenými na miniaturních zkušebních vzorcích a standardních vzorcích. A dále byl sledován vliv velikosti zrn na výsledky měření. Celkem bylo provedeno měření deseti sad po třech vzorcích standardních zkušebních těles a dále osmnácti sad po pěti vzorcích měření miniaturních zkušebních vzorků, celkem tedy 120 vzorků pro nalezení odpovědí na vytyčené otázky.

Dosažené výsledky ukazují na vynikající opakovatelnost výsledků měření na miniaturních vzorcích. Nicméně vlivem malého zkoušeného objemu materiálu je možné ovlivnění výsledků lokálními anomáliemi materiálu a proto je vhodné pro dosažení důvěryhodných výsledků provádět měření na sadě alespoň 5 vzorků.

Na základě vyhodnocení vlivu technologie výroby vzorků na dosažené výsledky se ukázalo, že výroba vzorků běžným frézováním, umožňuje dosažení dobré shody pevnostních charakteristik mezi oběma velikostmi zkušebních vzorků. V případě, že jsou uvažovány též deformační charakteristiky jako je tažnost a kontrakce, pak se jeví jako optimální způsob výroby elektrojiskrovým obráběním s pětinasobným řezem. V těchto případech je dosaženo velmi dobré shody mezi všemi sledovanými charakteristikami ($R_{P0,2}$, R_m , A , Z).

Vyhodnocování vlivu velikosti výchozího austenitického zrna na srovnatelnost výsledků mezi standardními a miniaturními vzorky neprokázalo vliv na pevnostní charakteristiky. V případě všech uvažovaných velikostí primárního austenitického zrna od 8 až po 180 μm byl nalezen výborný souhlas mezi hodnotami neměřenými na standardních a miniaturních vzorcích. V případě porovnání deformačních charakteristik (A a Z) byl zaznamenán zhoršující trend souhlasu mezi výsledky s narůstající velikostí primárního austenitického zrna.

Vyhodnocení vlivu velikosti zrna na srovnatelnost výsledků zkoušek na standardních a miniaturních tělesech ukázalo velmi dobrý souhlas výsledků pro veškeré vyhodnocované parametry pro vzorky s velikostí zrna do 100 μm . u poslední sady vzorků s velikostí zrna přesahující 300 μm , již byla zaznamenána mírná odchylka mezi křivkami naměřenými pro jednotlivé velikosti vzorků. Nicméně rozdíl mezi naměřenými výsledky je do 10%, což je velmi dobrý výsledek. Celkově vyhodnocení vlivu velikosti zrna na výsledky zkoušek neprokázali výraznou citlivost a oproti publikovaným min 15 zrnům po tloušťce vzorku byly dosaženy velmi dobré výsledky i při třetinovém počtu zrn. Tento poznatek je velmi významný, protože umožňuje využití metody měření na miniaturních vzorcích i pro oblast „hrubo-zrnějších materiálů“.

Velmi dobré shody ve vyhodnocených výsledcích také dosahuje použitý vztah pro přepočtení tažnosti A_3 vyhodnocené pro miniaturní vzorky na tažnost A_5 stanovovanou na vzorcích standardních rozměrů.

11. Závěr

Tato práce na téma posouzení faktorů ovlivňujících výsledky zkoušky tahem na miniaturních vzorcích se zabývala především vlivem technologie výroby vzorků a vlivem velikosti zrna na výsledné hodnoty ze zkoušek tahem. Pro vyhodnocení těchto vlivů bylo realizováno 30 zkoušek tahem standardních vzorků a více než 90 zkoušek miniaturních vzorků na celkem 10 materiálových stavech. Veškeré zkoušky proběhly za kvazi-statických podmínek zatěžování za pokojové teploty.

Výsledky posouzení vhodné technologie výroby vzorků pro zajištění dobré shody s výsledky ze standardních vzorků ukázala, že ze sledovaných 8 technologických postupů zajišťuje nejlepší výsledky výroby výroba obrysu vzorku elektrojiskrovým obráběním s pětinasobným řezem s následným řezáním vzorků na tloušťku metalografickou pilou. Při zkoušení vzorků vyrobených touto technologií byl nalezen nejlepší souhlas mezi napětovými a deformačními charakteristikami vyhodnocenými z měření na standardních a miniaturních zkušebních tělesech.

Výsledky vyhodnocení vlivu velikosti zrna na souhlas výsledků zkoušek mezi miniaturními a standardními zkušebními tělesy neukázal rozdílné výsledky pro žádnou ze sledovaných deseti mikrostruktur. Ve všech případech byl nalezen vynikající souhlas mezi výsledky naměřenými na standardních a miniaturních zkušebních těles pro všechny základní napětové a deformační charakteristiky. Také průběh naměřených tahových diagramů byl ve velmi dobrém souhlasu. Dokonce i v případě poslední sady vzorků austenitické oceli s heterogenní mikrostrukturou.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že miniaturní zkušební vzorky mohou zajistit velmi dobrou shodu výsledků s měřeními na standardních vzorcích při dodržování nalezených postupů. Jedná se o velmi progresivní metodiku s velkým aplikačním potenciálem.

12. Seznam tabulek:

Tab. 1 Chemické složení použitých materiálů	16
Tab. 2 Výsledky klasických tahových zkoušek ze základního materiálu	18
Tab. 3 Drsnost boku těla vzorků	19
Tab. 4 Drsnost plochy těla vzorků	20
Tab. 5 Výsledky ze zkoušek tahem na první sérii miniaturních vzorků (řezané metalografickou pilou)	23
Tab. 6 Výsledky ze zkoušek tahem na druhé sérii miniaturních vzorků (řezané drátovou řezačkou)	24
Tab. 7 Výsledky ze zkoušek tahem na třetí sérii miniaturních vzorků (řezané drátovou řezačkou a následně broušené metalografickým brusným papírem se zrnitostí 1200)	25
Tab. 8 Tabulka materiálů tepelně zpracovaných a popuštěných pro změnu velikosti původního austenitického zrna	27
Tab. 9 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu Z1	30
Tab. 10 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu Z1	30
Tab. 11 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu Z2	31
Tab. 12 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu Z2	31
Tab. 13 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu Z3	32
Tab. 14 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu Z3	32
Tab. 15 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu Z4	33
Tab. 16 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu Z4	33
Tab. 17 Tabulka materiálů tvářených a tepelně zpracovaných pro změnu velikosti zrna	34
Tab. 18 Výsledky klasických tahových zkoušek ze základního materiálu Z4	37
Tab. 19 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích ze základního materiálu	37
Tab. 20 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu 3M	38
Tab. 21 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu 3M	38
Tab. 22 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu 20M	39
Tab. 23 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu 20M	39
Tab. 24 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu 5H	40
Tab. 25 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu 5H	40
Tab. 26 Výsledky klasických tahových zkoušek z materiálu 16H	41
Tab. 27 Výsledky tahových zkoušek na miniaturních vzorcích z materiálu 16H	41

13. Seznam obrázků:

Obr. 1 Schéma zkušebního stroje.....	4
Obr. 2 Příklad poměrného zkušební vzorku.....	5
Obr. 3 Srovnání průběhu skutečného a smluvního napětí během zkoušky tahem.....	6
Obr. 4. Schéma záznamu zkoušky tahem s vyhodnocením typických hodnot	7
Obr. 5 Příklady smluvních diagramů různých kovů a slitin [4].....	8
Obr. 6 Schéma rozmístění kamery systému Videoextensometer [22]	10
Obr. 7 Schéma principu měření deformací laserem [23]	11
Obr. 8 Příklad vzorku s naneseným náhodným rastrem a příklad výsledku z DIC	11
Obr. 9 Princip měření deformace pomocí DIC	12
Obr. 10 Uspořádání zkoušky s použitím DIC systému ARAMIS.....	12
Obr. 11 Geometrie miniaturního vzorku pro zkoušku tahem.....	13
Obr. 12 Elektromechanický zkušební stroj Zwick Z250 vybavený hydraulickými čelistmi, laserových extenzometrem a mechnickým extensometrem	17
Obr. 13 Graf výsledku klasické tahové zkoušky základního materiálu	18
Obr. 14 Zařízení pro elektrojiskrové obrábění FANUC Alfa C600.....	19
Obr. 15 Metalografická pila	20
Obr. 16 Zkušební stroj LabControl s měřicím zařízením ARAMIS	21
Obr. 17 Průběh záznamu zkoušky miniaturního zkušební tělesa pomocí systému obrazové korelace ARAMIS.....	21
Obr. 18 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků řezaných metalografickou pilou	25
Obr. 19 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků řezaných drátovou řezačkou	26
Obr. 20 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků řezaných drátovou řezačkou a následně broušené metalografickým brusným papírem se zrnitostí 1200	26
Obr. 21 Mikrostruktura základního materiálu.....	28
Obr. 22 Mikrostruktura materiálu Z1	28
Obr. 23 Mikrostruktura materiálu Z2	28
Obr. 24 Mikrostruktura materiálu Z3	29
Obr. 25 Mikrostruktura materiálu Z4.....	29
Obr. 26 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu Z1	30
Obr. 27 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu Z2	31
Obr. 28 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu Z3	32
Obr. 29 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu Z4	33

Obr. 30 Mikrostruktura základního materiálu (Nomarského kontrast).....	35
Obr. 31 Mikrostruktura materiálu 3M.....	35
Obr. 32 Mikrostruktura materiálu 20M (Nomarského kontrast).....	35
Obr. 33 Mikrostruktura materiálu 5H (Nomarského kontrast)	36
Obr. 34 Mikrostruktura materiálu 16H	36
Obr. 35 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků ze základního materiálu	37
Obr. 36 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu 3M	38
Obr. 37 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu 20M ..	39
Obr. 38 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu 5H.....	40
Obr. 39 Porovnávací graf klasické zkoušky v tahu a miniaturních vzorků z materiálu 16H... 41	

14. Seznam zdrojů:

1. ČSN EN ISO 6892-1 - Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty
2. ČSN EN ISO 6892-2 - Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty
3. COMTES FHT – Interní předpis ŘD 2/30 – Postup zkoušení mikro-tahových vzorků
4. Skálová, J., Kovařík, R., Benedikt, V.: Základní zkoušky kovových materiálů. ZČU Plzeň
5. Hodnocení degradace mechanických vlastností vlivem provozu - přehled zkušebních metod prováděných na miniaturizovaných zkušebních těles
6. Mentl, V., Kanta, V., Džugan, J.: Rozvoj metodik měření mechanických vlastností kovových materiálů pomocí klasických a miniaturních zkušebních těles, Výzkumná zpráva VZU Plzeň, VYZ 0824/2005
7. Procházka R.: Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků, diplomová práce KMM ZČU 2013
8. Soukup K.: Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace, diplomová práce KMM ZČU 2013
9. Konopík P.: Kompatibilita výsledků hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů, disertační práce KMM ZČU 2014
10. Džugan, J., Konopík, P., Procházka, R.: Mechanical properties determination for nanomaterials, setkání řešitelů projektu Nanotým VŠB-TU Ostrava č.p. CZ.1.07/2.3.00/20.0038, 15-16.11.2011, Ostravice.
11. Konopík P., Džugan J.: Assessment of Mechanical Properties of the Structural Steels by Small Punch Test and Micro –Tensile Test, Junior Euromat, Lausanne, July 23.-27.2012.

12. Konopík P., Džugan J.: Determination of Tensile Properties of Low Carbon Steel and Alloyed Steel 34CrNiMo6 by Small Punch Test and Micro-Tensile Test, 2st International Conference SSTT, 2.10.-4.10.2012, Ostrava, Czech Republic, ISBN 978-80-260-0079-2
13. Konopík, P., Dzugan, J., Prochazka, R.: EVALUATION OF LOCAL MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL WELD BY MINIATURE TESTING TECHNIQUE, Materials Science & Technology 2013, October 27-31, 2013, Montreal, Quebec, Canada
14. Džugan, Improvement of fatigue properties of 34CrNiMo6 steel by controlled thermomechanical treatment – METAL 2010
15. Scheunemann, L., Balzani, D., Brands, D., Schröder, J.: A comparison of different statistical measures for the construction of statistically similar rves for dual phase steel microstructures, PLASTICITY 2015, Montego Bay, Jan. 4-9, 2015

Internetové zdroje:

16. Zdeněk Drozd, KDF MFF UK, duben 2001 – Deformační zkouška – cesta k poznání mechanických vlastností materiálů
17. <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
18. <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
19. http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm
20. <http://cs.wikipedia.org>
21. Manual of Videoextensometer NG, online:
<ftp://ftp.sp.se/Public/234%20WinextNG%20e.pdf>, cit 1.5.2013
22. United Calibration Corporation, online:
http://www.tensiletest.com/info_downloads/dwnlds/INSTRUMENTATIONS.PDF, cit. 23.3.2013