

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím
optických metod měření deformace.

Autor: **Karel Soukup**
Vedoucí práce: **Prof. Ing. Václav MENTL, CSc.**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: **2012/2013**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karel SOUKUP**
Osobní číslo: **S11N0062P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů 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 metody měření mechanických vlastností
2. Optické metody měření deformací zkušebních tyčí, výběr materiálů
3. Provedení zkoušek – experimentální výsledky
4. Vyhodnocení a porovnání výsledků mechanických a optických metod
5. Diskuse výsledků
6. Závěr

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Rozsah pracovní zprávy: **50-70 stran**
Forma zpracování diplomové práce : **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- **Skálová, J., Kovařík, R., Benedikt, V.: Základní zkoušky kovových materiálů. ZČU Plzeň**
- **Firemní prospekty a manuály**
- **Aktuální literární publikace v časopisech a sbornících**

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.**
Katedra materiálů a strojírenské metalurgie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Džugan, Ph.D.**
COMTES FTH, s. r. o. Plzeň
Datum zadání diplomové práce: 24. září. 2012
Termín odevzdání diplomové práce: 24. května. 2013

Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan

LS

Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne: 24. září. 2012

Prohlášení o autorství

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Soukup	Jméno Karel	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Mentl, CSc.	Jméno Václav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace.		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	75	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	23
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zabývá problémem měření podélných deformací zkušební tyče u zkoušky tahem. Záznamy deformací byly provedeny pomocí optických a mechanických metod. Ze záznamů měření jednotlivých zkoušek bylo provedeno výsledné zhodnocení. Jednotlivé metody záznamu deformací byly porovnány.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Univerzální trhačí stroj, deformace, prodloužení, tahový diagram, zkušební tyč, extenzometr, optické průtahoměry, mechanické průtahoměry, tenzometrický snímač, kapacitní snímač, laserový snímač, video-extenzometr, digitální obrazová korelace

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Soukup	Name Karel	
FIELD OF STUDY	B2301 "Materials Engineering and Engineering Metallurgy "		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Mentl, CSc.	Name Václav	
INSTITUTION	ZČU - FST – KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Measurement of Mechanical Properties of Structural Materials Using Optical Strain Measurement Methods.		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	75	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	23
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis addresses the problem of measuring the longitudinal deformation of the test bars for tensile testing. Logs deformations were performed using optical and mechanical methods. From the measuring results of the tests were performed resulting evaluation. Individual recording methods deformations were compared.
KEY WORDS	Universal Tensile Testing Machine, Deformation, Extension, Tension Diagram, Test Bar, Extensometer, Optical Extensometer, Mechanical Extensometers, Tensometric Extensometer, Capacitive Extensometer, Laser Extensometer, Video-extensometer, Digital Image Correlation

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu ESF OP VpK „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavy a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“. Tento projekt napomohl při propojení výstupů diplomové práce mezi aplikačním a akademickým prostředím.

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Základní mechanické vlastnosti	8
1.2	Zkouška tahem	9
2	Metody měření deformací zkušebních vzorků při zkoušce tahem	16
2.1	Mechanické snímače	16
2.1.1	Mechanický průtahoměr	16
2.1.2	Martensův optický průtahoměr	17
2.1.3	Kapacitní extenzometr	17
2.1.4	Tenzometrický průtahoměr	19
2.2	Optické snímače	22
2.2.1	Video-extenzometr	22
2.2.2	Laserový extenzometr	27
2.2.3	Digital Image Correlation (DIC)	30
3	Experimentální část	33
3.1	Použité materiály	33
3.2	Popis experimentálních zařízení	35
3.2.1	Tenzometrický Extenzometr	35
3.2.2	Kapacitní snímač	36
3.2.3	Video-extenzometr	36
3.2.4	Vysokorychlostní kamera (HSC)	37
3.2.5	Laserový snímač deformace	38
3.2.6	Digital Image Correlation	39
3.2.7	Stroj pro zkoušku tahem Zwick	41
3.2.8	Stroj pro zkoušku tahem Inova	43
3.2.9	Padostroj	43
3.3	Experimentální výsledky	45
4	Diskuze výsledků	65
5	Závěr	70
6	Literatura	71
7	Přílohy	73

1 Úvod

Konstrukční materiály vykazují rozmanité vlastnosti, které jsou určeny zejména chemickým složením a strukturou. Základní fyzikální, chemické, mechanické a ostatní vlastnosti dávají informaci, jaký vliv budou mít příslušné podmínky na daný materiál. [1]

Z tohoto poznatku vycházíme při volbě vhodného materiálu, aby součást mohla být dimenzována. Špatně zvolený materiál a jeho degradace může způsobit porušení prvku, které by mohlo vést k finančním nebo zdravotním rizikům.

Vlastnosti konstrukčních materiálů je třeba zjistit zejména z důvodu bezpečnosti při jejich použití v provozu. Proto se měří mechanické vlastnosti přinášející základní informace o tom, jak se bude daný materiál za předem zvolených podmínek chovat.

V dnešní době je zapotřebí dbát na bezpečnost provozu, proto musí být volba vhodného materiálu dobře promyšlena. Jak už bylo zmíněno, špatná volba materiálu by mohla vést k porušení funkčních nebo bezpečnostních prvků součástí a tím k ohrožení funkčnosti celku jako takového. Z toho vyplývají další následky, jako např. riziko vzniku úrazů nebo finanční ztráty z důvodu prodlevy ve výrobním procesu.

Ekonomická hlediska jsou v dnešní době důležitou podmínkou pro volbu materiálu. Při zvolení materiálu nedostatečné kvality hrozí dodatečné výdaje. Opakem je volba materiálu s kvalitou přespříliš vysokou. Funkce součásti nebude ovlivněna, ale vzrostou náklady, které si konkurenceschopný podnik v dnešní době nemůže dovolit.

Pro zajištění správné volby materiálu je zapotřebí znát jeho mechanické vlastnosti. Existuje několik základních mechanických vlastností, které budou vysvětleny v následující kapitole.

Dalším důvodem měření mechanických vlastností je kontrola kvality dodaného materiálu výrobcem. Výroba materiálu je relativně složitý proces. Proto je zapotřebí v průběhu výroby i po jejím dokončení zkontrolovat mechanické vlastnosti. Tím se ověřuje, zda bylo dosaženo správné jakosti materiálů a zda materiál odpovídá parametrům minimálních požadovaných hodnot.

Mechanické vlastnosti mohou být při výrobě ovlivněny např. vlivem tepelného zpracování, tváření atd. Za provozu se jedná zejména o teplotu a rychlost zatěžování nebo konkrétní stav napjatosti. Měření těchto vlastností je tedy důležitým aspektem při výrobě materiálu, při tvorbě výrobku i po jeho vyrobení (v některých případech i v průběhu jeho používání).

Jednou z nejzákladnějších zkoušek je zkouška tahem, u které se provádí měření napětí a deformací u testovaných vzorků. Diplomová práce zkoumá měření deformací pomocí mechanických a optických metod.

Rešeršní část se zabývá metodami záznamu deformací u zkoušky tahem. V experimentální části jsou popsány záznamy metod jednotlivých měření a jejich následná vyhodnocení.

1.1 Základní mechanické vlastnosti

Existuje pět základních mechanických vlastností. Pružnost, pevnost, tvrdost, tvárnost a houževnatost. Tyto základní vlastnosti mohou být do značné míry ovlivněny vnějšími nebo vnitřními faktory.

Vnitřní faktory

- chemické složení a chemická heterogenita
- struktura a strukturní heterogenita
- velikost a tvar tělesa
- koncentrátoři napětí (konstrukční a technologické vruby)
- stav povrchu

Vnější faktory:

- teplota
- rychlost deformace
- druh a časový průběh zatěžování
- okolní prostředí

Pružnost

Pružnost neboli elasticita je schopnost materiálu deformovat se před porušením pružně. Pružná deformace je vratná. Při odlehčení se rozměry tělesa vrátí na původní hodnoty, [2].

Pevnost

Je definována největším napětím, které je zapotřebí k rozdělení materiálu na dvě části. Podle způsobu namáhání vedoucí k porušení materiálu, rozlišujeme pevnost v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu, [2].

Tvrdost

Tímto pojmem se rozumí odolnost povrchu proti místnímu porušení vlivem vnikání cizího tělesa. Tvrdost jako takovou nelze fyzikálně definovat, jelikož je výslednicí vlastností hmoty, a to zejména elasticity, pevnosti a plasticity, dále fyzikálně-chemických vlastností povrchu i chemických vlastností, [2].

Tvárnost

Je schopnost hmoty v tuhém stavu vlivem působení vnějších sil měnit vzájemnou polohu částic uvnitř hmoty, neboli svůj tvar. Jedná se o typickou vlastnost všech kovů, [2].

Houževnatost

Je vyjádřená velikostí práce, která je potřebná k rozdělení hmoty na dvě části. Látky v křehkém stavu vyžadují nepatrnou práci. Houževnatost je ve své podstatě protikladem křehkosti. U kovů, které jsou většinou houževnaté, je práce potřebná k rozdělení prací přetvárnou. Rozdělení materiálu musí předcházet určité plastické přetvoření, [2].

1.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem prováděná při velmi pomalém zatěžování a za okolní teploty, která je přibližně 10-35°C. Je považována za základní a nejběžněji prováděnou zkoušku. Využívá se pro zjištění základních mechanických vlastností.

Tato zkouška se v ČR řídí národními normami **ČSN EN ISO 6892-1** nebo **ASTM A370**, které jsou určeny pro zkoušení za pokojové teploty. Pro zkoušení za zvýšených teplot do 1000°C se využívá norma **ČSN EN ISO 6892-2**.

Složení normy **ČSN EN ISO 6892-1**:

- Zkouška tahem za okolní teploty
- Ověřování měřicího systému síly trhacích strojů
- Kalibrace siloměrů používaných k ověřování jednoosých zkušebních strojů
- Ověřování průtahoměrů používaných při zkoušce jednoosým zatěžováním
- Zkouška tahem za zvýšené teploty

Podstatou této zkoušky je deformace zkušební tyče tahovým zatížením, obvykle do přetržení, pro stanovení jedné nebo více mechanických vlastností zavedených v normě. Zkouška je prováděna na zkušebních vzorcích, které se upínají do čelistí zkušebního stroje. Osa zkoušeného vzorku musí ležet v ose zkušebních čelistí. Během zatěžování zkušební vzorku plynule roste zatěžovací síla až do okamžiku porušení vzorku. Při zkoušce zaznamenáváme sílu, která nám způsobuje deformaci. Tato deformace se vztahuje k původní měřené délce. Vzhledem k souhlasné ose tyče s osou čelistí, se jedná se o zkoušku prováděnou normálovým napětím, [3].

Obvykle se tato zkouška provádí při pokojové teplotě cca $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$. Rozmezí teplot se ovšem může měnit v závislosti na požadavcích zákazníka. V případě testování materiálu za pokojové teploty, který by byl následně používán za nízkých teplot, nebo naopak používán za teplot zvýšených, by výsledky zkoušky nedávaly použitelné informace pro tyto aplikace. V těchto případech se podmínky zkoušky upravují tak, aby odpovídaly použití materiálu v praxi, [3].

Cílem této metody zkoušení je stanovit tahový diagram u zkušební vzorku odebraného ze zkoušeného materiálu a určit základní mechanické charakteristiky (R_e , R_m , A , Z), případně další napěťové a deformační charakteristiky, např. $R_{0,005}$, ϵ_f atd, [3].

Přitom platí následující základní pojmy a jejich definice:

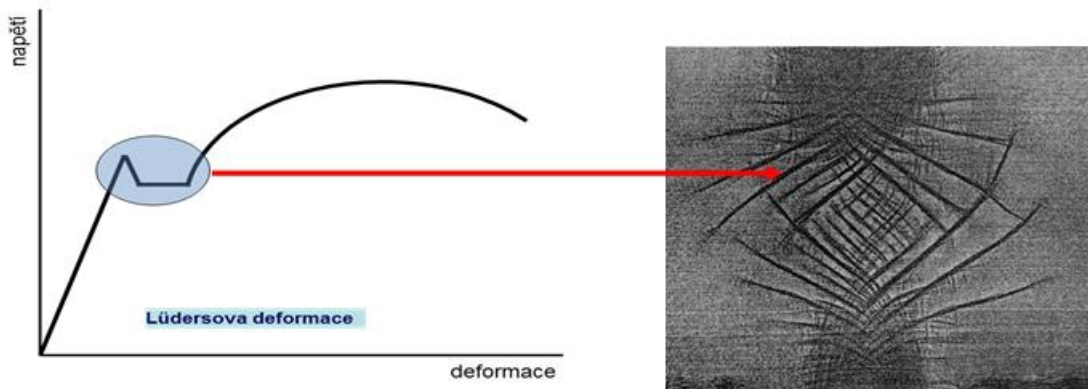
- L_0 [mm] - **Počáteční měřená délka**, neboli délka válcové nebo prismatické části zkušební vzorku před zatížením.
- L_u [mm] - **Konečná měřená délka**, neboli měřená délka po přetržení zkušební vzorku.
- L_c [mm] - **Zkoušená délka**, neboli délka zúžené části zkušební vzorku se stálou plochou příčného průřezu.
- S_0 [mm] – **Počáteční průřez**, je hodnota počátečního průměru před začátkem zatěžování zkušební vzorku.
- **Prodloužení** [mm] - Přírůstek počáteční měřené délky v každém okamžiku zkoušky.
- **Prodloužení** [%] - Prodloužení vyjádřené v % počáteční měřené délky L_0 .
- **Plastické prodloužení** [%] - Přírůstek počáteční měřené délky zkušební vzorku po odlehčení příslušného napětí vyjádřené v % počáteční měřené délky L_0 .
- A [%] – **Tažnost**, neboli trvalé prodloužení měřené délky po přetržení ($L_c - L_0$) vyjádřené v % počáteční měřené délky L_0 .
- A_t [%] - **Celkové prodloužení při přetržení**, neboli celkové prodloužení (elastické a plastické) počáteční měřené délky v okamžiku přetržení vyjádřené v % počáteční měřené délky L_0 .

- **Prodloužení při největším zatížení [%]** - Přírůstek počáteční měřené délky zkušební vzorku při největším zatížení vyjádřené v % počáteční měřené délky L_0 . Rozlišuje se celkové prodloužení při největším zatížení A_{gt} a trvalé prodloužení při největším zatížení A_g .
- A_c [%] - Prodloužení průtahoměru na výrazné mezi kluzu, neboli prodloužení průtahoměru mezi počátkem kluzu lokální deformace a počátkem homogenní deformace projevující se hladkým deformačním zpevněním. Je vyjádřeno v [%] měřené délky průtahoměru.
- Z [%] – **Kontrakce**, neboli největší změna příčného průřezu po přetržení zkušební vzorku ($S_0 - S_u$) vyjádřené v [%] počátečního příčného průřezu S_0 .
- F_{max} [N] - Největší zatížení, které je zaznamenáno v průběhu zkoušky po dosažení meze kluzu.
- σ [MPa] - **Napětí** je poměr zatížení v každém okamžiku zkoušky a plochy počátečního příčného průřezu S_0 zkušební tyče,
- R_m [MPa] - **Pevnost v tahu** je smluvní napětí odpovídající největšímu zatížení F_{max} a průřezu S_0 .
- R_e [MPa] **Výrazná mez kluzu** - jestliže materiál vykazuje kluzový jev, pak je to okamžik vzniku plastické deformace bez přírůstku zatížení. Rozlišuje se horní a dolní mez kluzu.
- R_{eH} [MPa] - **Horní mez kluzu** je napětí odpovídající prvnímu okamžiku poklesu.
- R_{eL} [MPa] - **Dolní mez kluzu** je nejnižší napětí v průběhu plastického kluzu kovu.
- R_p [MPa] - **Smluvní mez kluzu** 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. $R_{p0,2}$.

V tab. 1 jsou uvedeny výpočty pro určení základních hodnot pro zkoušku tahem.

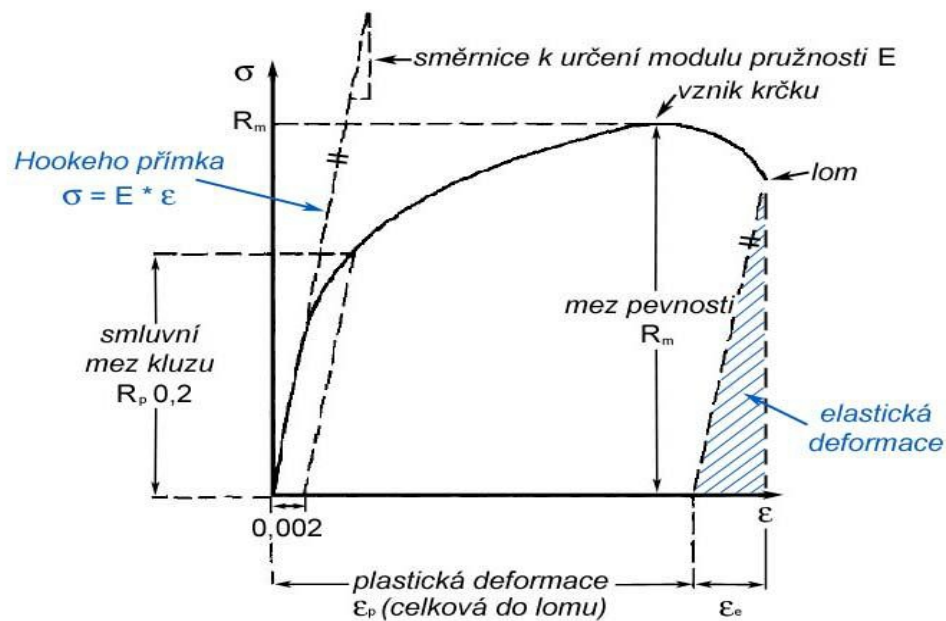
Tab. 1. Tabulka výpočtu základních hodnot pro zkoušku tahem.

Pevnostní charakteristiky	Výrazná mez kluzu	$R_e = F_e / S_0$ [MPa]
	Horní mez kluzu	$R_{eH} = F_{eH} / S_0$ [MPa]
	Dolní mez kluzu	$R_{eL} = F_{eL} / S_0$ [MPa]
	Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2} = F_{max} * 0,2 / S_0$ [MPa]
	Mez pevnosti	$R_m = F_m / S_0$ [MPa]
Deformační charakteristiky	Tažnost	$A = (L_u - L_0) / L_0 * 100$ [%]
	Kontrakce	$Z = (S_0 - S_u) / S_0 * 100$ [%]



Obr. 1. Diagram s výraznou mezí kluzu a Lüdersovými čárami, [4].

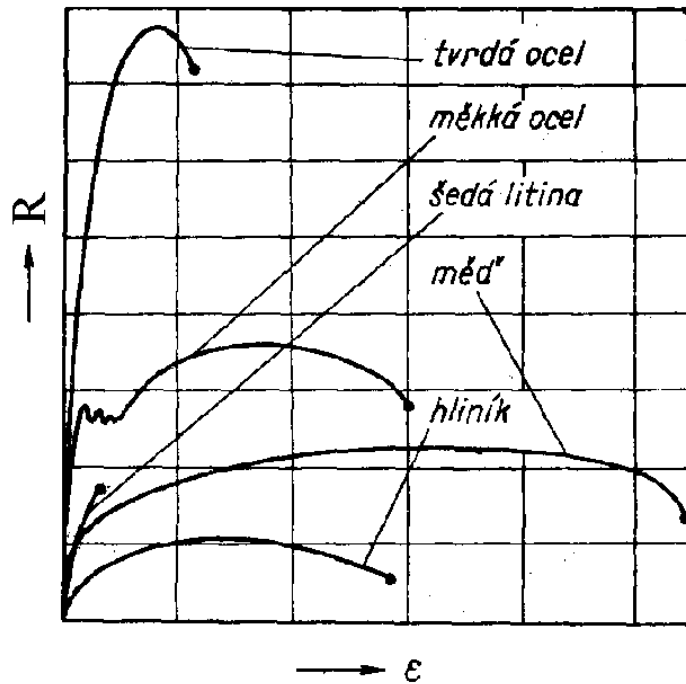
U tahového diagramu se rozlišují dva základní druhy podle materiálu. Prvním je tahový diagram pro houževnaté materiály. Z něj můžeme lehce odečíst hodnoty jako je mez elasticity, mez kluzu, v některých případech i horní a dolní mez kluzu a mez pevnosti. Pro houževnaté materiály jsou tyto hodnoty na diagramu velmi dobře viditelné. Viz naznačeno na obr. 1 a obr. 2.



Obr. 2. Tahový diagram houževnatého materiálu nevykazující výraznou mez kluzu, [2].

Provádí-li se toto vyhodnocení pro materiály ve stavu křehkém, nebo materiály houževnaté s nevýraznou mezí kluzu, lze vyhodnotit z diagramu pouze mez elasticity a mez pevnosti. V případě, že není výrazná mez kluzu patrná, byla zavedena smluvní mez kluzu pro výpočtové aplikace. Pro tuto hodnotu platí, že se určuje z hodnoty plastické deformace, viz obr. 2.

Existuje diagram smluvní, viz *obr. 1* a *2*, který je zakreslen v souřadnicích napětí vztažené k počátečnímu průřezu a prodloužení. Dále může být diagram skutečný, kde je napětí vztaženo k okamžitému průměru vzorku, který se během zkoušky mění. Pro oba druhy diagramů platí, že hodnota energie potřebná pro přetržení odpovídá ploše pod diagramem. Na *obr. 3* jsou uvedeny diagramy zkoušky tahem pro různé materiály.



Obr. 3. Pracovní diagram pro různé kovy, [7].

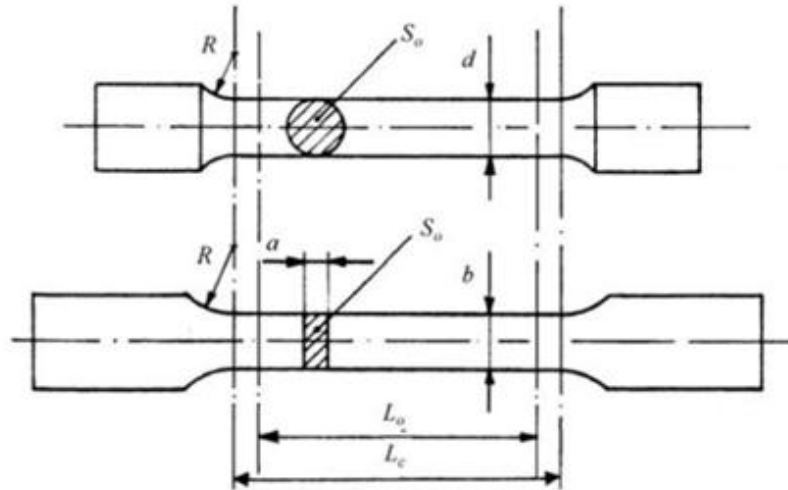
Zkušební tyče

Tvar a velikost zkušebních vzorků jsou určeny normou, viz *obr. 4* a *5*. V některých případech se tyto parametry mohou lišit v závislosti na požadavcích zákazníka. Zákazník volí často nestandardní rozměry zkušebních tyčí, z důvodu tvaru a velikosti součásti nebo polotovaru, ze kterého je zkušební vzorek odebírán.

Zkušební vzorek se obvykle vyrábí obráběním na universálním CNC stroji, který zajistí požadovanou kvalitu vyrobeného vzorku. Při přípravě výroby musí být dodrženy správné postupy. Nesmí např. dojít vlivem obrábění k zahřátí vzorku, a tím ke změně vlastností struktury materiálu, což by vedlo k nesprávným výsledkům. Každá zkušební tyč musí být při výrobě řádně označen. To zamezí následné záměně zkušebních vzorků.

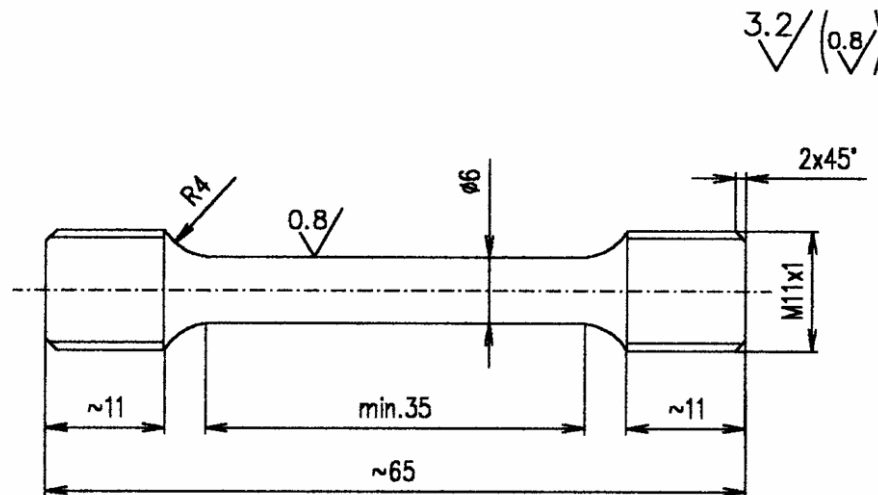
Některé zkušební vzorky mohou být podrobeny testování bez nutnosti obrobení, a to zejména jedná-li se o vzorky se stálým příčným průřezem, jako jsou profily, dráty nebo tyče. Tento průřez může být kruhový, čtvercový, obdélníkový, prstencový nebo jiného tvaru.

Před upnutím zkušební tyče do zkušebního stroje je nutné na vzorku proměřit, jestli jeho kruhový průřez odpovídají předepsaným požadavkům a následně z něj vypočítat S_0 . U plochého zkušební vzorku se proměří šířka a tloušťka a vypočítá se hodnota průřezu.



Obr. 4. Příklad tvaru zkušebního vzorku pro zkoušku tahem ,[4].

Dalším bodem přípravy před měřením je označení původní délky. Označení se provádí např. orýsováním pomocí fixu, nebo naklepnutím. Při naklepávání se používají dva body mající od sebe přesně vymezenou vzdálenost. Po provedení zkoušky lze přeměřit délkové rozměry zkušební vzorku, ze kterých následně můžeme vypočítat tažnost.



Obr. 5. Příklad tvaru zkušebního vzorku pro zkoušku tahem s označením rozměrů na výrobním výkrese, [5].

Zkušební vzorky se do zkušebního stroje upínají několika způsoby. Norma předepisuje, že upnutí může být za pomoci klínů, závitových, osazených nebo hydraulických čelistí zajišťující správný přenos upínací síly ze stroje na zkoušený vzorek, aniž by došlo např. k proklouznutí vzorku v průběhu zkoušky a k znehodnocení výsledků.

Zkušební zařízení

Zkušební zařízení je vyráběno v několika modifikacích. Se základním zařízením, viz *obr. 6*, je možno provést zkoušku pouze se záznamem posunu příčnicku. Může být navíc rozšířeno o záznamový systém mechanický, analogový, nebo digitální. Dále může být vybaveno počítačovou podporou s vyhodnocovacím programem.

Pro zpřesnění měření bývají tato zařízení vybavena extenzometry. Nejlepší stanice k měření deformací při zkoušce tahem používají laserové nebo kamerové zařízení, díky kterým je možné po celou dobu zkoušky pozorovat podélné a v některých případech i příčné deformace. Tyto hodnoty následně umožňují vyhodnocení skutečných diagramů vhodných např. pro PC simulace.



Obr. 6. Příklady zkušebních strojů pro zkoušku tahem.

K vyvození síly bývá nejčastěji použito elektromechanického nebo hydraulického systému. Speciálním případem může být padostroj. Rychlosti pohybu příčnicku mohou být ve speciálních případech řízeny pomocí zpětné vazby snímače deformace.

Je-li zapotřebí provádět zkoušky za teplot jiných než pokojových, zařízení bývá rozšířeno o tepelnou komoru, ve které je zkušební vzorek předehříván na požadovanou teplotu a po nahřátí je provedena zkouška. Ke vzorku je připevněn zabudovaný systém pro měření deformací.

2 Metody měření deformací zkušebních vzorků při zkoušce tahem

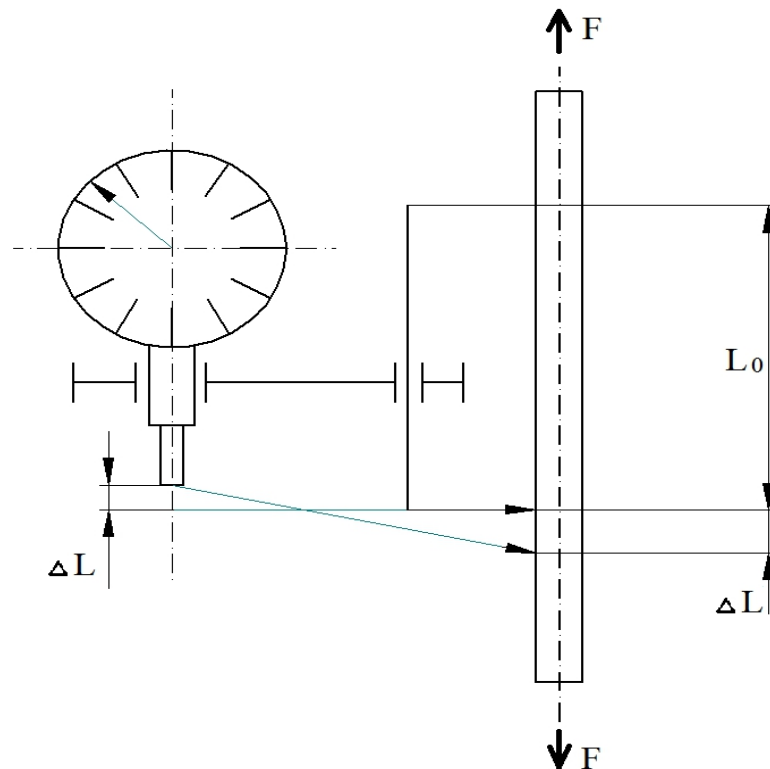
U běžné tahové zkoušky se zakresluje tahový diagram v průběhu zkoušky pomocí záznamového zařízení. To zaznamenává hodnoty síla – deformace. Ze zaznamenaného diagramu lze odečíst hodnoty jako je mez elasticity, v závislosti na materiálu výraznou nebo nevýraznou mez kluzu a mez pevnosti. Abychom zpřesnili měření těchto hodnot, je zapotřebí využít dodatečných měřících zařízení zvaných průtahoměry. Tato zařízení jsou schopna zaznamenávat velmi malé deformace.

2.1 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.

2.1.1 Mechanický průtahoměr

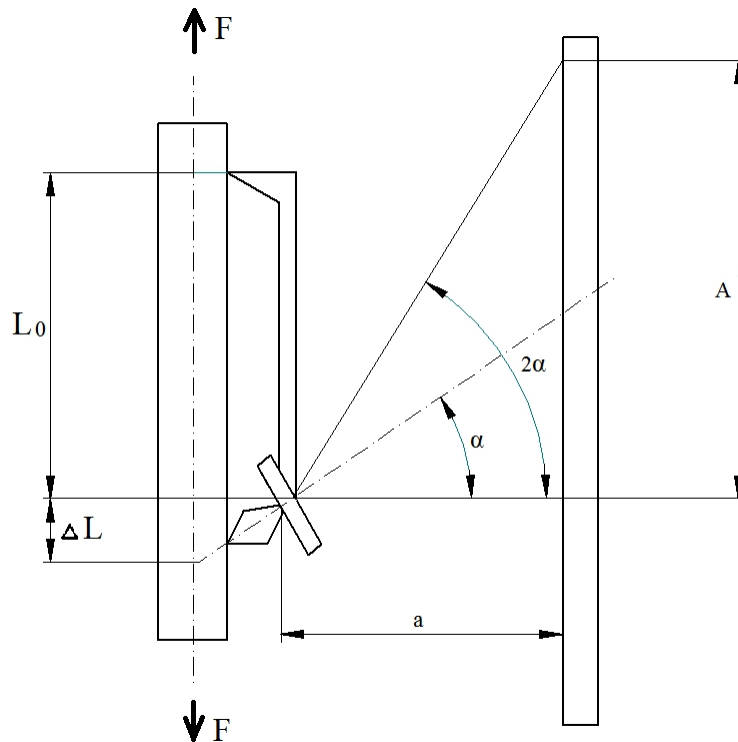
Jedná se o nejjednodušší a dnes již nepoužívaný průtahoměr. Pracuje na principu mikrometrického šroubu nebo ručičkového indikátoru. Převodníkový mechanismus je připojen přímo na zkoušený vzorek. Při deformaci se vychyluje zkušební hrot, který převádí deformaci na ručičkový indikátor, [2].



Obr. 7. Měření deformace zkušebního vzorku mechanickým průtahoměrem.

2.1.2 Martensův optický průtahoměr

Jedná se o starší typ průtahoměru, který se v moderních zkušebnách nepoužívá. Princip je založen na dvou břitích přidržovaných v určité vzdálenosti na pracovní části zkušebního vzorku. Prodloužením vzorku se hroty od sebe oddálí a tím způsobí natočení pohyblivých částí břitů. Břity jsou pevně spojeny se zrcátky. Odraz od těchto zrcátek se přenese na stupnici průtahoměru, [2].

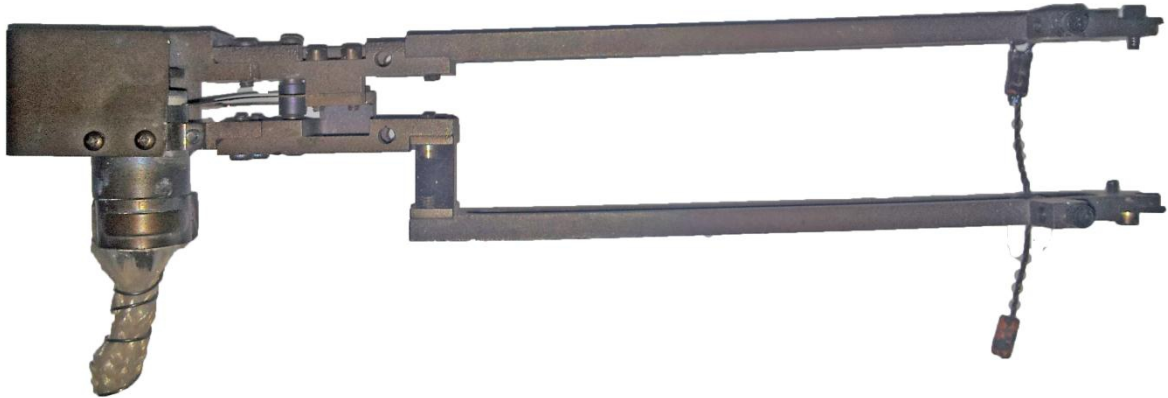


Obr. 8. Schéma Martensova optického průtahoměru.

2.1.3 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 prodloužování zkušebního vzorku, [8].

Snímače se připevní na zkoušený vzorek. Připevnění může být provedeno pomocí tvarového nasazení, kleští, stavěcího šroubu, pomocí gumiček nebo nalepením. Pro aplikaci zkoušky tahem se nejčastěji využívá nasazení za pomoci gumiček, nebo s využitím tvaru zkušebního vzorku, na které se mohou nacházet výstupky přímo určené pro tento snímač, [9].

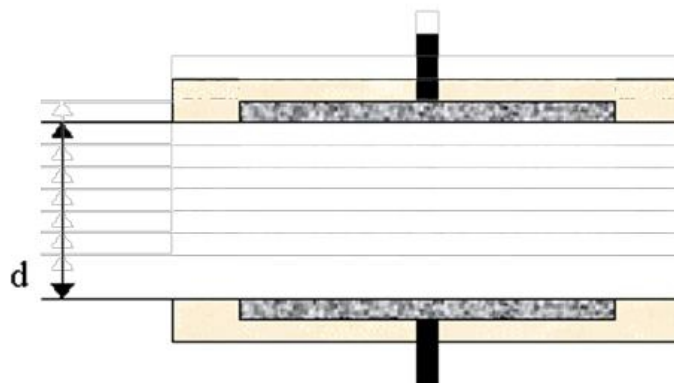


Obr. 9 Příklad kapacitního snímače.

Pro představu fungování jednoduchého rovinného kondenzátoru, je uveden postup výpočtu změny kapacity, s ohledem na aplikaci pro kapacitní extenzometry používané u zkoušky tahem:

$$C = (\epsilon_0 * \epsilon_r * S) / d \dots \dots \dots (1)$$

- S - plocha elektrod
- d - vzdálenost elektrod
- ϵ_0 permitivita vakua
- ϵ_r relativní permitivita
- Z rovnice vyplývá, že změnu kapacity lze způsobit změnou plochy elektrod S, vzdálenosti elektrod d nebo změnou relativní permitivity ϵ_r , [9].



Obr. 10. Princip deskového kapacitního snímače. [9]

Pro naši aplikaci budeme uvažovat, že plochy jsou konstantní. Převědeme-li tento případ na nejjednodušší typ kapacitního snímače, kterým je jednoduchý deskový kapacitor s proměnnou mezerou mezi deskami, platí následující vztahy, [9].

Hodnota vzdálenosti Δd mezi elektrodami je:

$$C_1 = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times (S/(d+\Delta d)) \dots \dots \dots (2)$$

$$C_1 = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times (S/d_1) \dots \dots \dots (3)$$

Předpokládáme-li, že:

- $S = \text{konstanta}$
- $\epsilon_r = \text{konstanta}$

Z toho nám následně vyplyne:

$$C_1/C = 1/(1+(\Delta d/d)) \dots \dots \dots (4)$$

Charakteristika tohoto typu snímače je nelineární a každou hodnotu při prodloužení během zkoušky tahem je zapotřebí řádně přepočítat dle předešlých vztahů, [8].

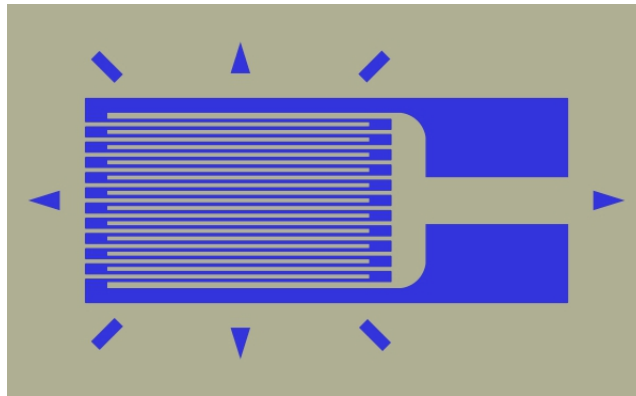
2.1.4 Tenzometrický průtahoměr

Tenzometr je pasivní elektronická součástka, která slouží jako všechny předešlé snímače k měření deformací. Jeho funkcí je převádět deformace způsobené působením síly při tahové zkoušce na elektrický signál. [14].

Samotný princip tenzometru spočívá ve známém faktu, že odpor elektrického vodiče je přímo úměrný jeho délce a nepřímo úměrný jeho průřezu. Tenzometr se často vyskytuje jako vodič na tenkém filmu tvořeném z polyamidu, s nímž je pevně spojen. Tento vodič se vytváří leptáním tenké kovové fólie, která je nejčastěji z konstantanu. Aby bylo dosaženo co největší efektivní délky, bývá senzor meandrovitě poskládán, viz *obr. 11*, [14].

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. V opačném případě se jeho odpor snižuje při kompresi, [14].

Základní tenzometry dovolují měřit deformaci pouze v jedné ose a to v ose, která je shodná s podélnou osou vodiče. Vyskytují se však i další provedení tenzometrů, které většinou kombinují dva nebo více tenzometrů v různých osách nebo tenzory speciálních tvarů pro měření na membránách, [14].

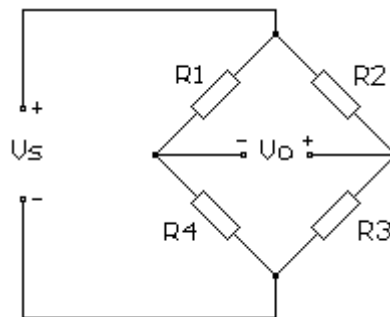


Obr. 11. Meandrické složení fóliového extenzometru, [11].

Jedním z důležitých parametrů tenzometrů je citlivost. Ta je definována jako bezrozměrné číslo vyjadřující poměr mezi relativní změnou odporu tenzometru a velikostí působícího protažení, viz rovnice 5, [14].

$$S = (dR/R) \dots \dots \dots (5)$$

Někdy bývá změna odporu v průběhu deformace příliš malá a nedává přesné informace. Pro tyto případy se zapojují tenzometry do Wheatstonova můstku, viz obr. 12. Pomocí této úpravy se dá měřit pouze změna odporu jako velikost jeho výstupního napětí. Můstek se skládá ze dvou napěťových děličů (R_1 - R_4 a R_2 - R_3). Výstupní napětí V_0 je tvořeno rozdílem výstupních napětí jednotlivých děličů větví nezávisle na jejich absolutní hodnotě. Změna kteréhokoliv odporu následně způsobí nevyvážení můstku a napětí na výstupu bude úměrné této změně, [14].



Obr. 12. Schéma zapojení Wheatstonova můstku. [11]

Tato vlastnost umožňuje násobit citlivost při použití více než jednoho tenzometru najednou. S množstvím použitých senzorů se citlivost zvětšuje. Při použití dvou aktivních senzorů se výstupní napětí zvýší dvakrát, při použití senzorů tří třikrát. Záleží samozřejmě i na konstrukci a umístění daného tenzometru. Použijeme-li například tenzometry čtyři, dva musí být využity na tah a dva na tlak. Toto má velkou výhodu, jelikož při změně teploty dvojice senzorů vyrovnají změnu, a ta se tedy neprojeví, [14].

Tento problém je možný řešit dvěma způsoby. Zprv je možné použít rezistory s velmi malým teplotním koeficientem, které se ale velmi špatně shánějí a jejich cena se vyrovná ceně celých tenzometrů. Je efektivnější použít druhé řešení, kdy se stejné tenzometry jako u předchozího měření umístí tak, aby na ně nepůsobila měřená síla nebo deformace. Takto umístěné rezistory pouze doplňují aktivní tenzometry celého můstku a kompenzují dané teplotní výkyvy. Důležitou podmínkou je, aby kompenzující senzory opravdu nebyly namáhány žádnou silou, [14].

Za ideálních podmínek by měl můstek v klidovém stavu dávat nulové napětí. Toho ovšem vzhledem k toleranci hodnot není nikdy dosaženo, proto je nutno detekčně vyvažovat. To se provádí již na hotovém snímači. K němu se mohou přidat například další doplňující rezistory. Toto vyvážení už závisí na kvalitě obsluhy, [14].

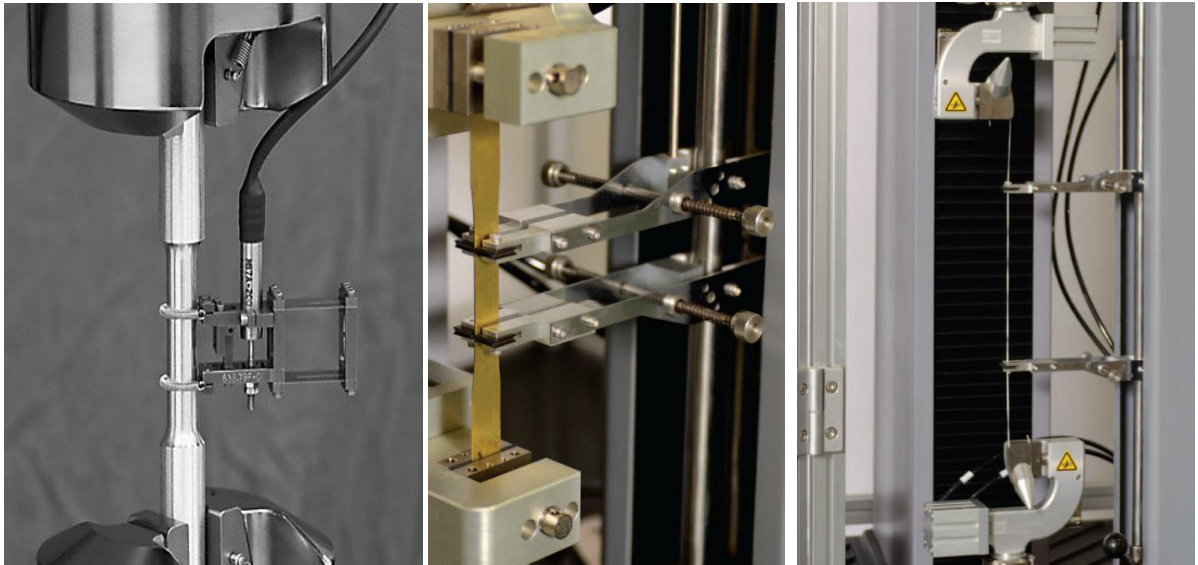
Dalším faktorem, kromě žádaného protažení materiálu způsobené měřenou silou, je tepelná roztažnost materiálu, která způsobuje rušivé vlivy v průběhu měření. Aby se předešlo těmto nepříznivým vlivům, dochází k úpravám materiálu vodiče tenzometru. Dosáhne se toho, že změna odporu při protažení způsobená tepelnou roztažností měřeného materiálu se dokáže účinně kompenzovat. Tato úprava omezuje použití tenzometru pouze na materiál, na který byl zkonstruován. Hodnota teplotní koncentrace se udává v PPM. Vyjadřuje se poměrnou změnou délky materiálu na jeden teplotní stupeň, [14].

Výsledná hodnota naměřené deformace vždy odpovídá střední hodnotě v délce aktivní části tenzometru. Toho se využívá obzvláště při měření na nehomogenních materiálech, jako je např. beton, kde se používají tenzometry o délce až 150 mm, [14].

Základními parametry tenzometru jsou:

- jmenovitý odpor (standardní hodnoty 120, 350, 700 nebo 1000 ohmů)
- citlivost (bezrozměrné číslo nejčastěji hodnoty 2)
- koeficient teplotní kompenzace (23 PPM hliník, 11 PPM ocel atd.)
- délka aktivní části
- maximální napětí můstku

Krom obecných parametrů jako tolerance jednotlivých hodnot, mechanické rozměry atd. musíme při vhodném výběru senzoru uvažovat maximální povolené namáhání a únavu. Bývá definována jako počet povolených cyklů o určité hodnotě protažení. Obecně se počítá, že při hodnotě 1000 „microstrain“ je životnost prakticky neomezená, [14].



Obr. 13. Příklady extenzometrů, [12, 13].

2.2 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.

Krom 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.

Další výhodou je možnost zaznamenávat data po celý průběh zkoušky až do porušení zkoušeného materiálu. U některých tenzometrů je zapotřebí, poté co vznikne krček, okamžitě tenzometr ze zkoušeného vzorku odstranit, aby při přetržení nedošlo k porušení měřicího přístroje. Toto nebezpečí v případě bezkontaktního měření odpadá.

Jedinou nevýhodou těchto měřících systémů je pořizovací cena, která je mnohonásobně vyšší než u mechanických snímačů.

2.2.1 Video-extenzometr

Video-extenzometr je speciální digitální kamera, která je schopna zaznamenávat obraz ve vysokém rozlišení, nebo s velice rychlým záznamem jednotlivých obrazových bodů za sebou, [16].

Videokamera

Prvním druhem zařízení pro bezkontaktní měření je záznam měření pomocí videokamery. Tato kamera je ve své podstatě digitální fotoaparát, který zaznamenává průběh zkoušky v reálném čase a ve vysokém rozlišení viz obr. 14 a 15, [16].



Obr. 14. Video-extenzometr, [18].

Na zkušební vzorek je nutno před zkouškou umístit kontrastní značky. Značky se umísťují ve formě teček nebo řádků a ke vzorku se připevňují několika metodami. Vzorek lze orýsovat i speciálním perem. Ovšem tato metoda se spíše používá jako doplňková, pro zvýraznění některých prvků na vzorku. Jako samotná metoda způsobu označení se spíše nedoporučuje. Přesnost označení není příliš velká, [16].

Obraz snímaný za pomoci digitální videokamery je přenášen přes optický kabel do PC. Optický kabel je zvolen pro svůj rychlý datový tok, který je u těchto zařízení velice důležitý. Rychlost datového toku a kvalita záznamového zařízení jsou dva základní faktory pro správné vyhodnocení průběhu zkoušky pomocí algoritmů obsažených ve vyhodnocovacím programu, [16].

Program skenuje pomocí algoritmu středy koncových značek. Tyto středy mohou být i čtyři. To nastává v případě, že se skenuje jak podélná, tak příčná deformace. Středy značek se sledují z důvodu eliminací chyb vzniklých natáhnutím značek. Tento jev má za příčinu vysoké protažení zkoušeného materiálu. Výslednou hodnotu vypočte program z rozdílu hodnot délky mezi značkami před protažením a po protažení. Původní délku si automaticky stroj zaznamená ještě před začátkem zkoušky. Stroj počítá i s odlehčením vzorku a tím eliminuje chyby, které by mohly vzniknout nesprávným označením vzorku, [16].



Obr. 15. Video extenzometr zabudovaný do stroje pro zkoušku tahem, [15].

Vysokorychlostní kamera

Druhým typem video extenzometrů je vysokorychlostní kamera, *obr. 16*. Tento druh kamer se označuje HSC, což pochází z anglického High Speed Camera. V oboru zkušebnictví se tyto kamery využívají zejména pro zkoušky mechanických vlastností materiálů jako je odolnost proti nárazu a průrazu, průběh lomu a částečně může být využita i pro zkoušku tahem např. za zvýšených rychlostí zatěžování.

HSC je přenosné optoelektronické zařízení pro vytváření obrazového záznamu velmi vysokou frekvencí snímání. Vysokorychlostní kamery mohou být barevné i černobílé. Černobílý záznam bývá u vysokorychlostních kamer za určitých okolností výhodnější s ohledem na menší objem zpracovávaných a přenášených dat, [17].



Obr. 16. Vysokorychlostní kamera, [24].

Vysokorychlostní kamery bývají zpravidla bez displeje a s minimem ovládacích prvků. K nastavení parametrů záznamu a ovládnání kamery slouží PC. Vysokorychlostní kamery mohou snímat frekvencí od tisíce až po statisíce snímků za vteřinu, [17].

S takto vysokou frekvencí však roste potřeba zpracování vysokého počtu dat. Nejde jenom o zpracování, ale také o potřebná záznamová média. Při běžné snímkovací frekvenci cca 20 000 fps (snímků za vteřinu), a rozlišení 250x200 obrazových bodů je třeba uložit každou vteřinu snímání 1 Gb dat. Vzhledem k omezení datových toků dnešních záznamových médií lze konstatovat, že se zvyšující rychlostí záznamů klesá rozlišení a naopak, [17].

Digitální záznam má výrazné výhody. Jednou z nich je použitelnost ke kvalitní analýze zobrazeného děje nebo jevu. Pro náš případ to bude využito ke kvantitativnímu hodnocení, tj. hodnocení s využitím aktuálních hodnot fyzikálních veličin. K jednotlivým obrázkům záznamu lze přiřadit čas. Porovnáním sousedních obrázků je možné stanovit změny tvaru těles či vizuálních projevů zkoumaných jevů atd., [17].

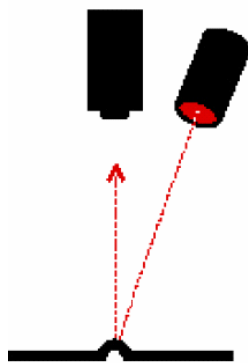
Velkou výhodou digitálního záznamu je, že po nafilmování ho lze ihned shlédnout a posoudit na PC, zdali se záznam podařilo nasnímat či nikoliv. V případě neúspěchu je možné ho smazat a zkoušku následně zopakovat, [17].

Při točení vysokorychlostní kamerou je nutné dostatečné osvětlení snímané scény. Vysoké frekvence snímání vyžadují velmi výkonné osvětlení snímané scény. Proto se používají halogenová nebo výbojková svítidla o příkonu až několika kilowattů, v krajních případech i série synchronizovaných výbojkových blesků, [20].

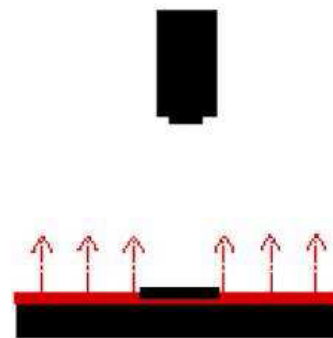
Osvětlovací soustava je stejně důležitou částí systému strojového vidění jako kamera. Účelem osvětlení je dosáhnout maximálního kontrastu těch částí objektu, které nás zajímají. Části, o které nejvíce zájem, se nazývají rušivé části, [20].

Typy osvětlovačů:

Přední osvětlení je nejspíše pochopitelný způsob osvětlení objektu, *obr. 17*. Objekt je osvětlen tak, že světlo od něj odražené dopadá přes objektiv na obrazový snímač, [20].



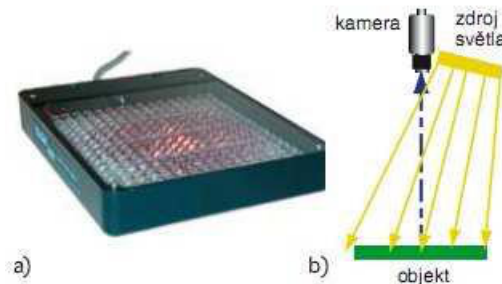
Obr. 17. Schéma předního osvětlení. [20]



Obr. 18. Schéma zadního osvětlení. [20]

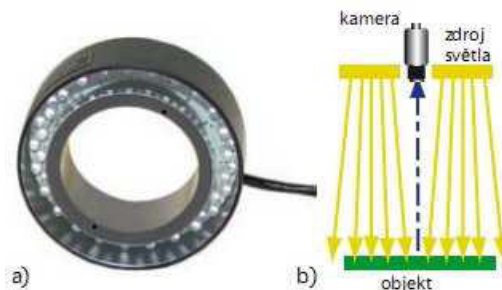
Zadní osvětlení se používá k zobrazení obrysu objektu, typické pro úlohy měření rozměru, *obr. 18*. Tento typ osvětlení je nutný, jestliže má být vytvořen kontrastní obrys, [20].

Plošné osvětlovací pole poskytuje směrované světlo, *obr. 19*. Rozptýlení světla je dáno vyzařovacím úhlem LED diod. V nenáročných úlohách mohou nahradit i nákladnější osvětlovače s jasným obrazovým polem a rozptýleným světlem. Malá a speciální pole se používají i jako pomocná světla nebo jako zdroje pro složitější osvětlovací soustavy, [20].



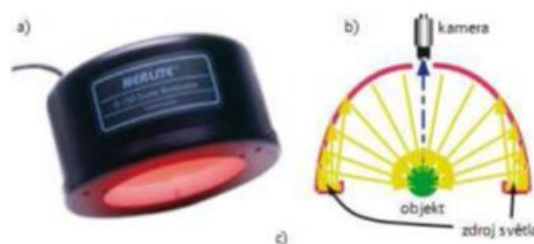
Obr. 19. a) Plošné osvětlovací pole, b) Schéma plošného osvětlovacího pole. [20]

Kruhový osvětlovač poskytuje více rozptýlené světlo směřující od objektivu kamery. Tento osvětlovač nemá přímo ideální vlastnosti, zvláště v provedení jednoduchého kruhu, protože se chová jako plošný zdroj světla, [20].



Obr. 20. a) Kruhový osvětlovač, b) Schéma kruhového osvětlovače. [20]

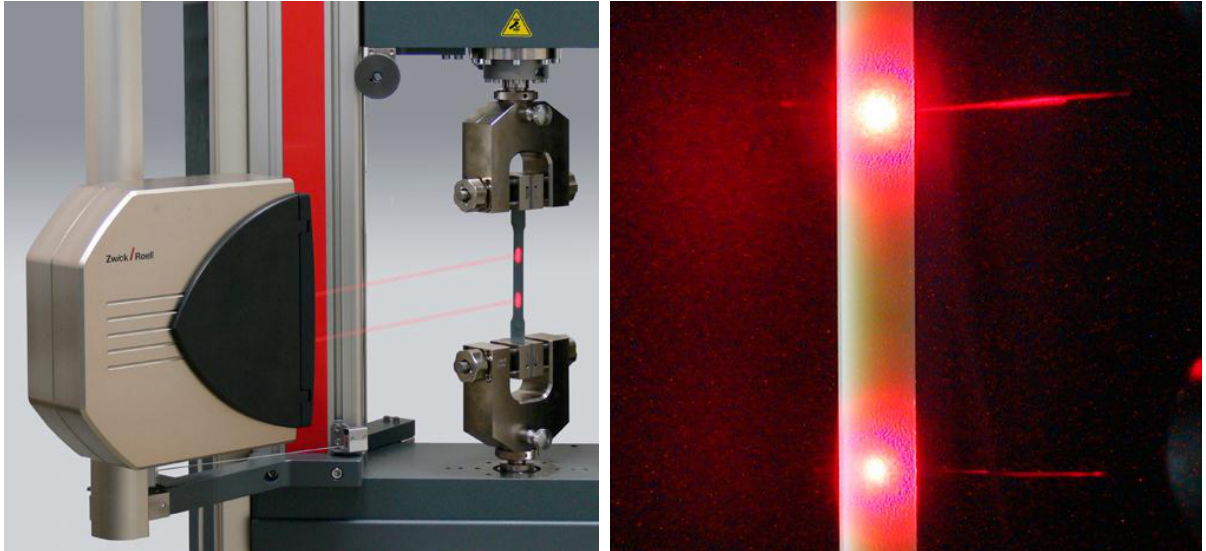
Kopulové osvětlovače se používají pro osvětlení s jasným obrazovým polem, kdy je nezbytně nutné osvětlit objekt světlem rozptýleným, [20].



Obr. 21. a) Kruhový osvětlovač, b) Schéma kruhového osvětlovače, [20].

2.2.2 Laserový extenzometr

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.



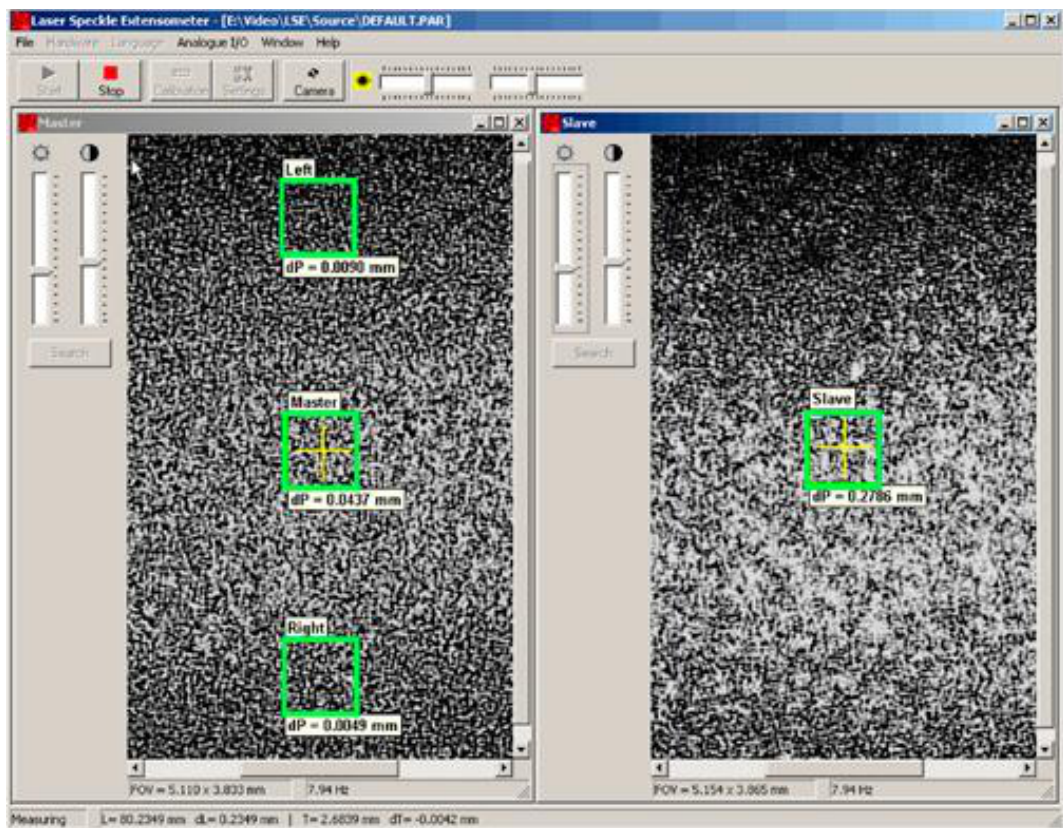
Obr. 22. Laserový systém pro měření příčných deformací, [21].

Laser má oproti předešlým způsobům měření mnoho výhod. Dá se s ním měřit deformace u materiálů. Velkou výhodou je, že v některých případech nemusíme na vzorku označovat počáteční měřenou délku. To nám zkrátí čas na přípravu vzorku k měření, což sebou přináší i ekonomickou úsporu. Pozorování deformací pomocí laseru je vhodné zejména pro tahové a tlakové zkoušky, viz obr. 22, [21].

Další výhodou je, že povrch vzorku nemusí být speciálně upravován. Naopak, při měření si laser naskenuje povrch zkoušeného vzorku a nerovnosti na tomto povrchu slouží jako souřadnicový systém, ve kterém si program vyhodnotí důležité body, které bude při zkoušce tahem pozorovat a bude z nich vyhodnocovat deformace. Názorný příklad je uveden na obr. 23, [21].

Tím, že se jedná o bezdotykové snímání, je možné opět pozorovat průběh zkoušky až do přetržení vzorku. Výhodou je také možnost pozorovat makro i mikro deformace. Jelikož laser není v kontaktu se vzorkem, nemůže být žádným způsobem ovlivněno ani jeho měření, [21].

Laser lze snadno využít pro měření za vysokých teplot. U tohoto měření je nutné dát pozor na vhodnou volbu barvy paprsku. Pro vysoké teploty je vhodnější použít zelený paprsek laseru, aby v důsledku barvy žhnoucího tělesa nedošlo k ovlivnění červeného paprsku světla, [21].

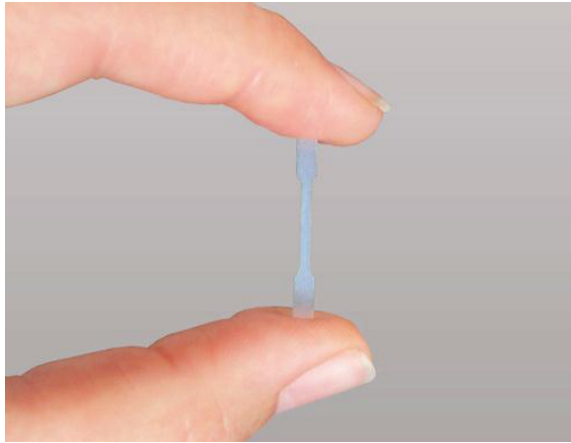


Obr. 23. Laserový systém pro vyhodnocování deformací, [21].

Používaný laserový snímač se musí skládat ze dvou snímačů a dvou vysílačů. Jako vysílače slouží lasery, které osvětlí povrch vzorku. Naskenovaná plocha na sobě vytvoří zrnitý obraz, který je následně zaznamenáván pomocí dvou digitálních kamer. Není nutné zkušební vzorek jakkoliv označovat, jelikož k označení jednotlivých bodů dojde pomocí tohoto systému, který na vzorku vytvoří tzv. virtuální značky. Značky je schopen po celou dobu zkoušky pozorovat a následně je i vyhodnocovat za pomoci nezbytného počítačového softwaru, [21].

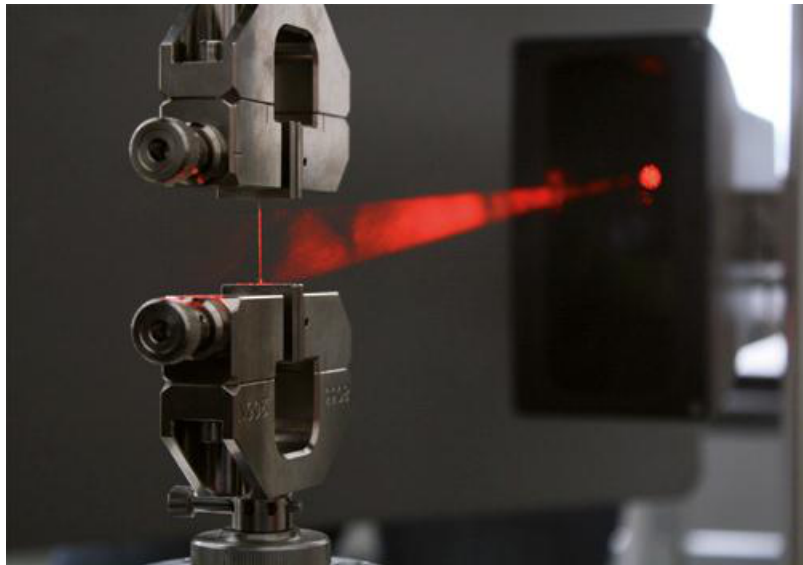
K vyhodnocení posunutí dochází z porovnání dvou po sobě následujících obrázků vzniklých při zaznamenávání zkoušky pomocí videokamer. Jemnost pozorování je dána rychlostí zaznamenávání jednotlivých fotografií v určitém časovém intervalu. Tato frekvence snímání se označuje fps a je významným parametrem, [21].

Při speciálních úpravách měření lze pozorovat tímto způsobem podélnou i příčnou deformaci. Výchozí délka se označí automaticky barevnými čtverci, které lze uživatelsky posunout, a udělá-li obsluha v programu dodatečné úkony, může přidat dva další doplňkové čtverce, které nám slouží pro pozorování příčných deformací. Princip je znázorněn na obr. 23. [21]



Obr. 24. Příklad malých zkušebních vzorků pro zkoušku tahem, [22].

Pro hodnocení velmi malých zkušebních vzorků, jako je na obr. 24, by nebylo příliš účelné použít řešení z předchozího případu. Systém měření pomocí dvou laserových vysílačů a dvou záznamových kamer není příliš rozměrný, avšak pro takto malé zkušební vzorky by byl vzhledem ke své konstrukci nepoužitelný. Z tohoto důvodu se v praxi používají tzv. single-kamerové systémy, obr. 25, [22].



Obr. 25. Systém měření deformace/prodloužení pomocí jednoho laserového vysílače a jedné kamery, [22].

Hlavice snímače obsahuje laserový zdroj světla a digitální kameru pro zachycení odraženého světla. Tento mechanismus pracuje na podobném principu jako předchozí, s rozdílem, že mapování využívá pouze jednoho laserového vysílače, [22].

K měření nejsou nutné žádné značky. Ty si vytvoří sám algoritmus obsažený v programu jako tzv. virtuální stopu. Velkým rozdílem oproti předchozímu zařízení je nemožnost vytvoření vlastních značek pro některé zkušební vzorky pro celou délku podélné deformace. Zařízení má pouze omezené možnosti v délce sledování těchto deformací. Tato měřitelná vzdálenost

je dána zorným polem kamery. Proto nelze vždy určit výslednou deformaci pro celý vzorek, ale jen pro jeho danou část, [22].

Aby tento problém bylo možno eliminovat, pracuje zařízení ve dvou režimech. V prvním režimu klasicky sleduje virtuální značky do opuštění těchto značek z oblasti zorného pole. Nastane-li tento případ, přepne se zařízení do druhého režimu, kdy se sleduje tok materiálu. Programy jsou velmi dobře odladěné, a proto i s těmito nestandardními metodami je možno dosáhnout velmi dobré třídy přesnosti, [22].

Samozřejmostí je doplnění značek pro měření příčných deformací. Pomocí značek lze paralelně zaznamenat deformace podélné a příčné. Celkové vyhodnocení daných procesů probíhá stejně jako v předchozím případě porovnáním dvou po sobě zaznamenaných obrazů. Kvalita porovnání opět závisí na snímkovací frekvenci a kvalitě rozlišení obrazu, [22].

2.2.3 Digital Image Correlation (DIC)

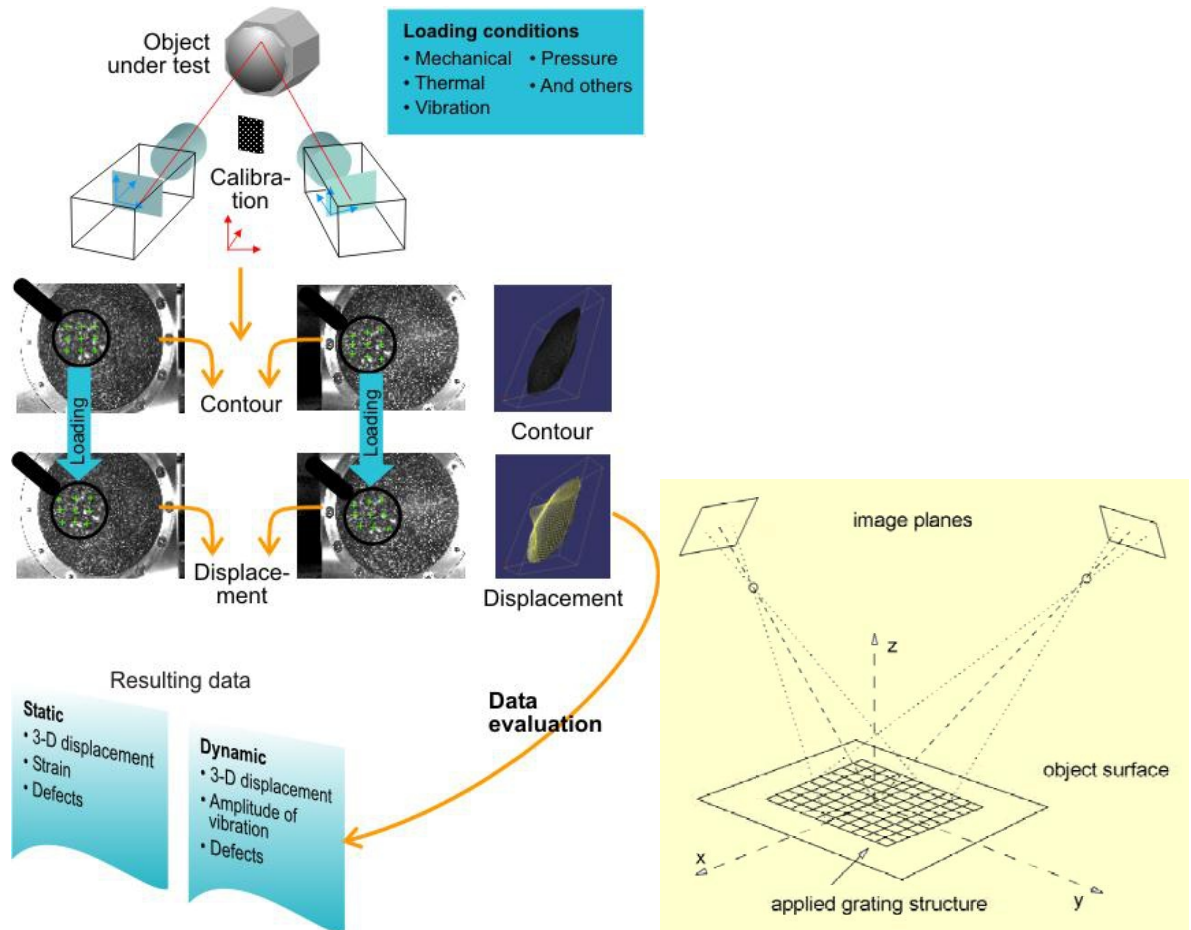
Nejkomplexnější metodou pro vyhodnocování deformací je Digital Image Correlation. Jeho použití se ukázalo jako velmi užitečný nástroj pro analýzu deformací. Záznam zkoušky je prováděn za pomoci dvou kamer s vysokým rozlišením. Princip je poměrně jednoduchý a je možno ho aplikovat na celkem široký rozsah technických aplikací, [23].



Obr. 26. Záznamové zařízení pro měření metodou DIC, [23].

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, [23].

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 třídimenzionálního prostoru, [23].



Obr. 24. Princip DIC systém se záznamem dvou kamer. [23]

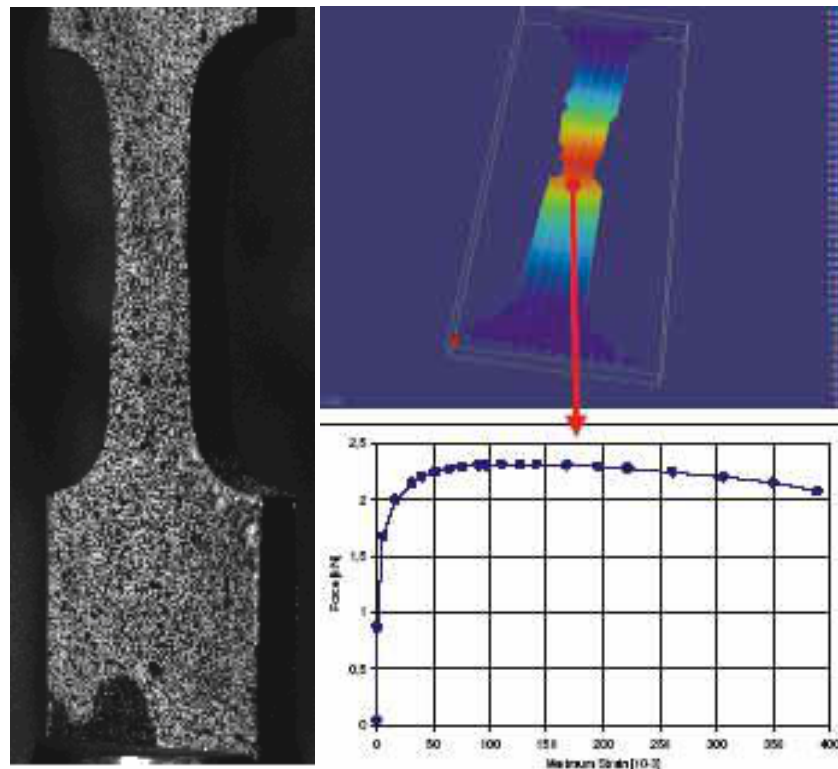
Kamery zaznamenávají povrch a následně porovnávají, zdali se na povrchu vyskytují podobné útvary. Členitost povrchu je důležitým parametrem, aby bylo možné provést snímání zkušební vzorku. Po zaznamenání obrazu se vyhodnotí podobné útvary a za pomoci počítačového softwaru se převedou na trojrozměrný obrazec, [23].

Tento záznam se provádí pouze ve stupních šedi. Sleduje se vždy hodnota šedi v daném místě a souřadnice místa. Takto se hodnotí každý zaznamenaný snímek z obou kamer. Následně se udělá porovnání dvou současně zaznamenaných snímků, sestaví se 3D obraz a tyto obrazy se porovnají s předchozími a následujícími 3D obrazy. Tímto způsobem algoritmus zjistí, o kolik se sledované body posunuly oproti předešlému obrazci, a je schopen stanovit deformaci, ke které došlo, [23].

Aby mohlo dojít k vyhodnocení, musí být provedeno nastavení záznamového zařízení. V opačném případě by byl celkový výkon zařízení ovlivněn stejně jako výsledky, které by nemohly být použity k hodnocení vlastností zkoušeného materiálu, [23].

Obsluha musí správně nastavit vnitřní parametry, jako je hodnota ohniskové vzdálenosti čočky záznamového zařízení, radiální deformace čoček a tangenciální narušení čoček. To se provádí ručním posunem kamery do výchozího místa. Poté začne program ostřit napozorovanou součást. Následně se nastavují kalibrační body, které systém automaticky zaostří. Ostření je možno korigovat jemně ručním doladěním. Systém najde uzlové body, kterými se bude řídit v následném vyhodnocování, [23].

Je-li nastavení hotové, lze přistoupit k druhému bodu nastavení, kterým je úprava vnějších parametrů. Těmito parametry jsou překlad vektoru a matice rotace. Jejich nastavení vykoná software automaticky poté, co jsou potvrzeny a znovu ověřeny hodnoty vnitřních parametrů. Nastavení všech těchto parametrů je přístroj schopen udělat sám pouze z jediného zaznamenaného snímku, [23].



Obr. 25. Záznam tahové zkoušky pomocí metody DIC, [23].

Jsou-li všechny parametry nastaveny, nic nebrání provedení dané zkoušky tahem na pozorovaném materiálu a následnému vyhodnocení výsledků, které mohou být porovnány s výsledky získanými jinými metodami, [23].

Vývoj nových algoritmů digitální korelace 3D výrazně zlepšil tuto techniku a zejména se zlepšila kalibrace a zpracování systému. První měření ukazují velký potenciál pro lomovou mechaniku a mnoho jiných možností aplikací. Kvalita záznamů se neustále zlepšuje s postupem vývoje elektronických součástí, kterými jsou kamerová zařízení, záznamová média, výkony PC atd. V budoucnu se jistě stane použití těchto zařízení velmi rozšířenou formou testování materiálů, [23].

3 Experimentální část

3.1 Použité materiály

Pro experimentální zkoušení optických metod pro měření deformací u zkoušky tahem a následné porovnání byl vybrán materiál dle ČSN EN 41 6243. Tento materiál byl vybrán z důvodu požadavků firmy, a protože svými vlastnostmi se řadí do skupiny běžně testovaných materiálů.

Jedná se o středně legovanou ušlechtilou ocel 16 343, chrom-nikl-molybden vhodnou k zušlechťování. Vyznačuje se vysokou prokalitelností a je vhodná pro vysoce namáhané strojní díly. V zušlechtěném stavu se ocel vyznačuje vhodným poměrem meze kluzu a pevnosti a také vysokou houževnatostí. Vysoká houževnatost brzdí šíření únavových trhlin. Z toho důvodu se ocel vyznačuje vysokými hodnotami meze únavy při střídavém a kombinovaném způsobu namáhání. Není náchylná k popouštěcí křehkosti. Kalení se provádí do oleje nebo syntetických roztoků. V *tab. 2* je uvedeno chemické složení pro ocel 16 343.

Tab. 2. Chemické složení pro ocel 16 343.

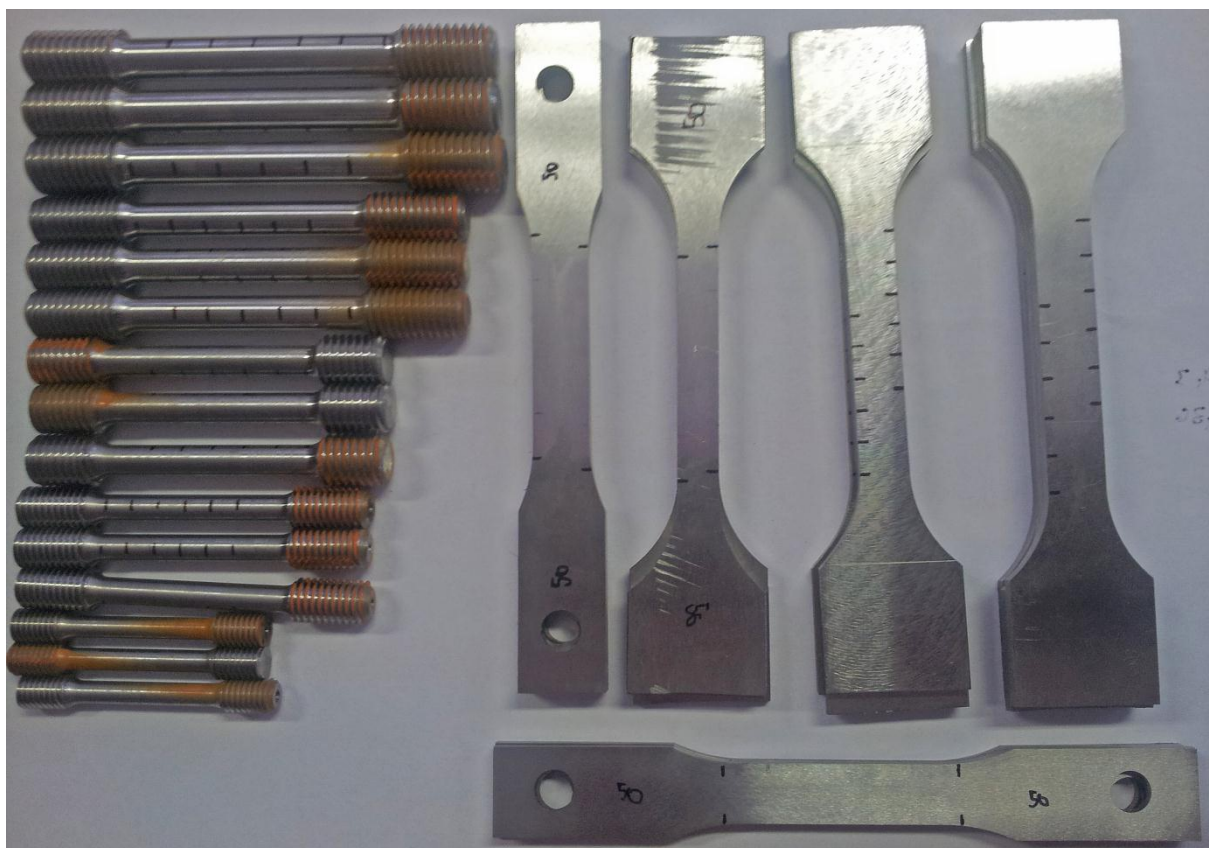
Chemické složení v hmotnostních procentech	C	Si _{max}	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	Ni	V
	0,30-0,38	0,40	0,50-0,80	0,025	0,035	1,30-1,70	0,15-0,30	0,30-0,70	-

Z oceli byla vyrobena sada vzorků, *obr. 26*. Byly zvoleny různé velikosti zkušebních tyčí o dvou základních tvarech ze základního polotovaru ve směru válcování. Jednalo se o zkušební vzorky kruhového průřezu, *obr. 27* a o ploché zkušební vzorky, *obr. 28*.

Vzorky byly odebrány z původního polotovaru nařezáním na pásové pile. Kruhové vzorky byly následně obráběny na CNC stroji. Zde byl z obrobku vytvořen zkušební vzorek kruhového průřezu, který splňoval průměr, přechodové rádiusy a správnou velikost závitů pro vhodné upevnění do zkušebního stroje. Ploché zkušební vzorky byly vyrobeny za pomoci několika brusek.

Po vyrobení byly všechny zkušební vzorky označeny a orýsovány pro následné hodnocení prodloužení po provedení zkoušky tahem. Orýsování každého zkušebního vzorku se provedlo dle hodnoty pro tažnosti A1 až A5. Hodnoty jednotlivých délek se určí z výpočtu dle *rovnice č. 6*, kterou stanovuje norma. Parametry jednotlivých délek pro vzorky jsou vloženy v *příloze č. 1*.

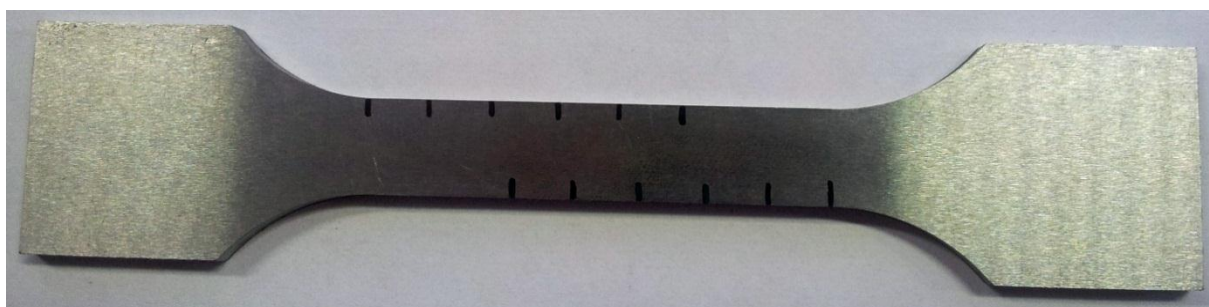
$$l = 5,56\sqrt{S} \dots\dots\dots(6)$$



Obr. 26. Část sady zkušebních vzorků připravených pro zkoušku tahem.



Obr. 27. Orýsovaný zkušební vzorek kruhového průřezu pro zkoušku tahem.

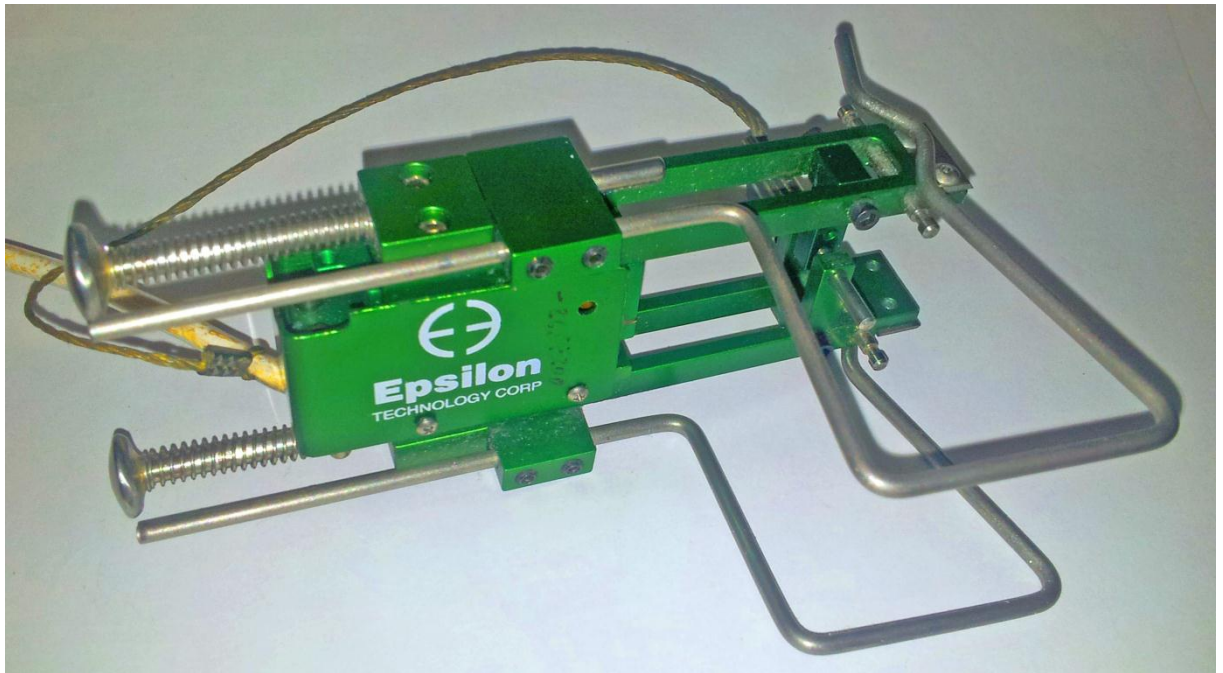


Obr. 27. Orýsovaný plochý zkušební vzorek pro zkoušku tahem.

3.2 Popis experimentálních zařízení

Pro provedení testů bylo použito několik zařízení s ohledem na vhodnost provedení zkoušky tahem a jejich univerzálnost. Univerzální trhací stroje byly využity dle jejich časového fondu. Jednotlivá zařízení budou popsána v následujícím textu.

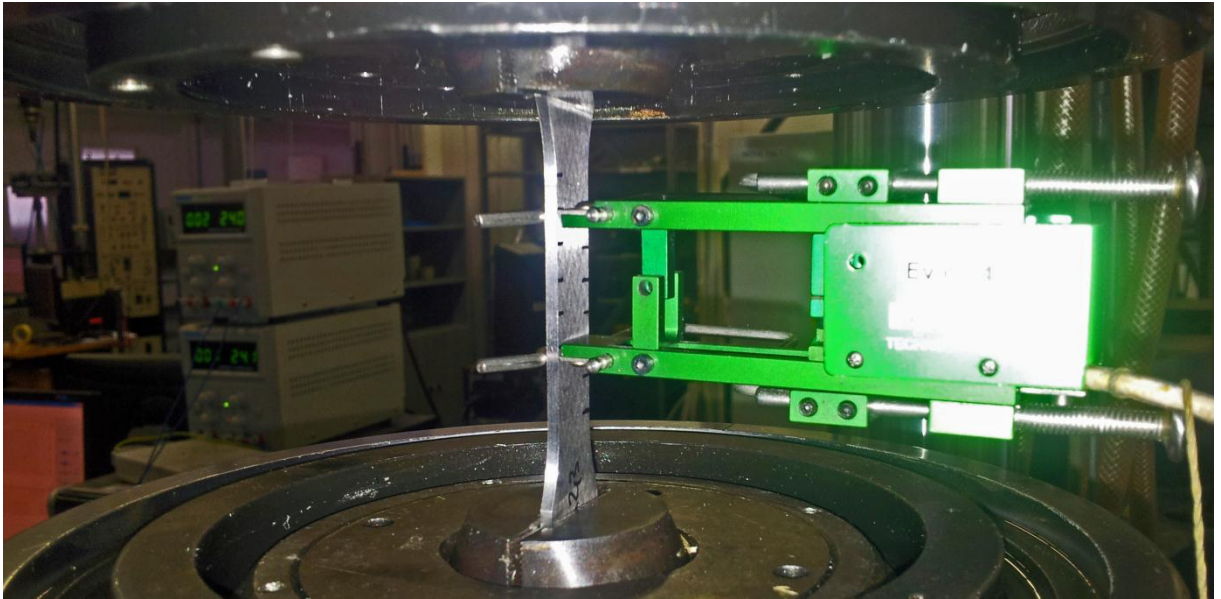
3.2.1 Tenzometrický Extenzometr



Obr. 28. Tenzometrický extenzometr od firmy Epsilon.

Zařízení spadá do kategorie tenzometrických průtahoměrů klasické konstrukce, viz obr. 28. Extenzometr se připevňuje na vzorky. Upevnění se provádí na zkušební vzorky kulatého průřezu i na ploché zkušební vzorky. Upevňovací ramena mají na svém konci břity. Ty zajistí, že v průběhu zkoušky nedojde při protažení vzorku k prokluzu extenzometru a tím k znehodnocení záznamu zkoušky.

Zařízení lze upevnit na zkušební vzorky různých velikostí. K tomu slouží posuvná ramena, která je možno zasunout nebo vysunout. Tím lze vymezit požadované sevření vzorku břitem a přidržovacím ramenem, obr. 29.



Obr. 29. Příklad nasazení tenzometrického extenzometru na zkušební vzorek.

Po celou dobu operace nasazování musí být ramena extenzometru zajištěna pojistným kolíkem. To se provádí z důvodu, aby nedošlo k porušení měřícího zařízení. Po nasazení se pojistný kolík vytáhne a zařízení je následně připraveno k měření. Je pravděpodobné, že při nasazování dojde k vychýlení ramen z nulové pozice. Proto je nutno před začátkem spuštění zkoušky hodnoty zařízení v PC programu vynulovat. Měly by ukazovat hodnotu prodloužení nulovou.

Pro správné provedení zkoušky bylo nutné zvolit extenzometr s vhodnou vzdáleností ramen l_0 . Extenzometr je schopen pomocí rozšíření ramen sledovat protažení zkoušeného materiálu jen do určité hodnoty. Námí použitý extenzometr měl hodnotu $l_0 = 25$ mm a $l_{\max} = 50$ mm.

3.2.2 Kapacitní snímač

K měření lze využít kapacitní snímač, který má obdobný způsob použitelnosti a nasazování jako tenzometrický průtahoměr. Před spuštěním testu je nutno zařízení zkalibrovat.

Nevýhodou tohoto typu snímače je, že se zvyšujícím protažením zkušební vzorku a s tím spojeným rozšiřováním ramen klesá jeho přesnost měření. Do hodnoty prodloužení o 4 mm jsou nepřesnosti zanedbatelné, ale s nárůstem prodloužení nad 4 mm výrazně začíná klesat jeho přesnost měření.

3.2.3 Video-extenzometr

Prvním typem využitého optického zařízení je video-extenzometr Ueye, obr. 30. Jedná se o kameru malých rozměrů, která se nastaví tak, aby bylo možno pozorovat vzorek bez jakýchkoliv překážek. Je umístěna na trojnohém podstavci sloužícím k nastavení kamery do

správné výšky a jejímu vycentrování. Kamera musí být ve všech směrech ve vodorovné poloze.

Po vycentrování kamery a nastavení správné vzdálenosti od vzorku je možno přejít k nastavení zaostření a clony světla. To provede obsluha ručně přímo na objektivu kamery. Kamera je připojena k počítači, kde je možno nastavit dodatečné parametry. V případě příliš tmavého obrazu, je možno připojit dodatečné osvětlovací zařízení, kterým se nasvítí pozorovaná zóna.



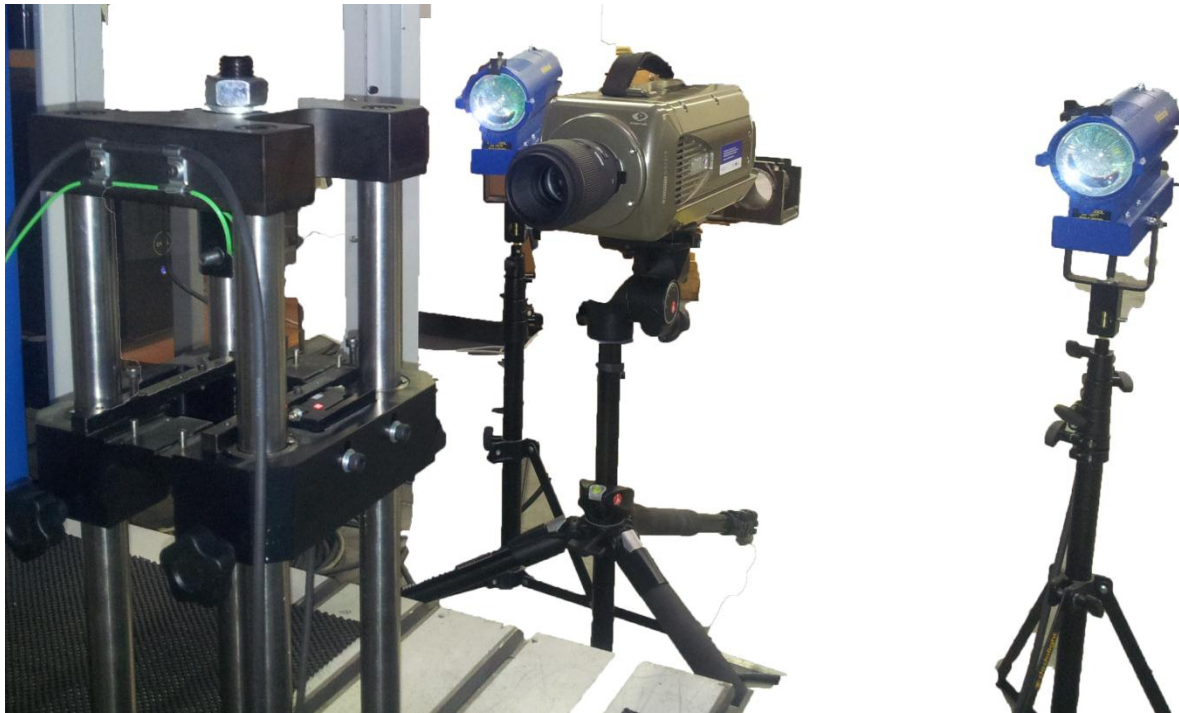
Obr. 30. Video-extenzometr od firmy uEye.

3.2.4 Vysokorychlostní kamera (HSC)

Dalším druhem použitého optického extenzometru je vysokorychlostní kamera, obr. 31. Jedná se o rozměrnější zařízení, u kterého je nutné správně nastavit pozici vzhledem ke zkoumanému zkušebnímu vzorku. K tomuto účelu sloužil trojnohý podstavec, který umožňuje manipulovat s kamerou v horizontálním směru a otáčet s ní ve třech osách tak, aby bylo možno kameru správně vycentrovat.

Po nastavení kamery do správné polohy, je nutné osvětlit scénu, k čemuž slouží boční osvětlovače. V případě, že by se toto neprovedlo, záznam z kamery by byl příliš tmavý a nebylo by možné provést vyhodnocení. Po osvětlení je nutno na kameře nastavit zaostření a hodnotu clony.

Obrazový záznam se provádí do paměťového média uvnitř kamery. Ke kontrole snímaného obrazu, k jemnému nastavení parametrů kamery, k jejímu ovládnutí a následnému vyhodnocení provedených zkoušek je nutné ji připojit k ovládacímu zařízení ve formě PC.



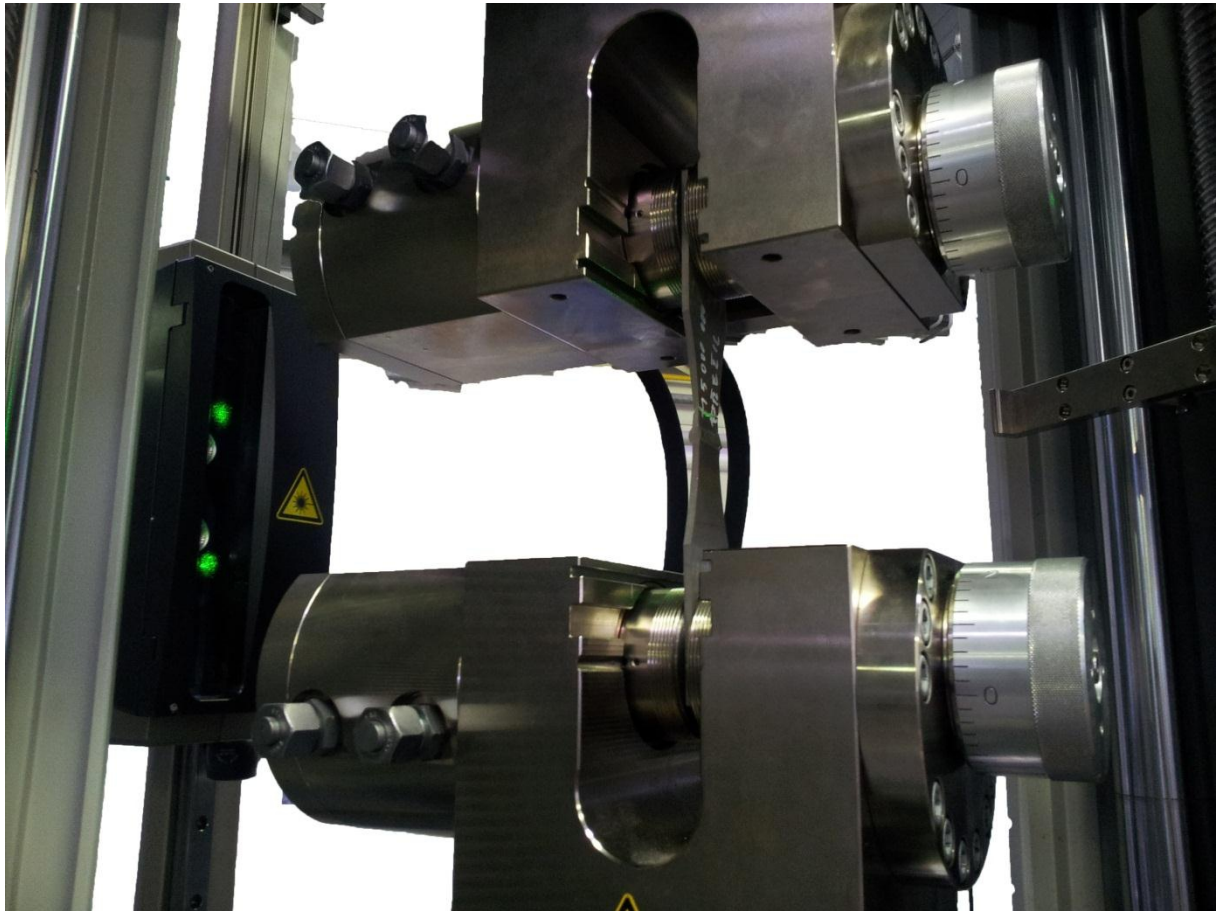
Obr. 31. Vysokorychlostní kamera (HSC) s přidavným osvětlením.

3.2.5 Laserový snímač deformace

Laserový snímač, viz obr. 32, je další typ optického zařízení využitý pro záznam deformací u zkoušky tahem v této práci. Bylo použito laserového snímače od firmy Zwick/Roel laserextens. I toto zařízení vyžaduje nastavit jeho polohu vzhledem k pozorovanému objektu. Snímač je oproti ostatním připevněn na zkušební stroji.

Lze s ním manipulovat pouze v horizontálním směru. Při posunu je vždy nutné odjistit jeho původní polohu a následně ho posunout do požadované polohy. Poté je třeba zajistit, aby v průběhu zkoušky nedošlo k jeho pohybu. To by vedlo k znehodnocení naměřených dat.

Dalším krokem při nastavování parametrů je správné zaostření na zkoušený vzorek a nastavení hodnoty clony. To lze provádět na snímacích kamerách. Ostatní parametry, jako jsou pozorované body, využití jedné či dvou kamer atd. se zvolí pomocí přidavného PC zařízení.



Obr. 32. Laserový snímač od firmy Zwick/Roel zaměřený na plochý zkušební vzorek.

3.2.6 Digital Image Correlation

Posledním použitým optickým zařízením pro záznam deformací je DIC Aramis, viz obr. 33. Jako u všech předchozích zařízení je nutné provést nastavení systému. Jedná se o dvě kamery, které je zapotřebí dát do správné polohy vzhledem k pozorovanému zkušebnímu vzorku.

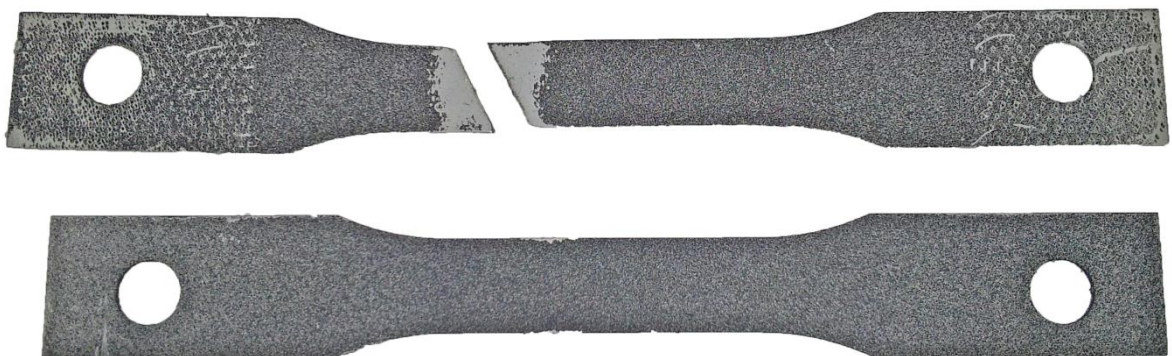
Zařízení se umístí na variabilní podstavec, jehož pomocí je možno nastavit správnou výšku, vzdálenost kamer od vzorku a vzdálenost kamer od sebe. Dle doporučení výrobce se systém umístí 80 cm od zkušebních vzorků. Mezi kamerami se vytyčí vzdálenost 328 mm.

Následně se systém nakalibruje za pomoci kontrastní destičky, která má na sobě obrazové body. Tyto body systém snímá podle toho, jak je s destičkou natáčeno v prostoru. Přitom se obsluha řídí pokyny výrobce uvedených v programu. Po správném nasnímání všech dvanácti poloh se systém nakalibruje a lze provést měření.



Obr. 33. DIC snímač Aramis zaostřený na čelisti trhacího stroje.

Pro zaznamenání deformací je zapotřebí vytvořit na povrchu součásti obrazový reliéf. Toho se dosáhne nástřikáním vzorků. V prvním kroku jsou vzorky nástřikány bílou barvou. Následně po zaschnutí jsou poprášeny černou barvou na bázi uhlíkové suspenze. To vytvoří černobílý povrch, který je schopen zařízení DIC Aramis naskenovat a následně z něj vyhodnotit deformace.



Obr. 34. Ploché zkušební vzorky s nástřikem barvy pro DIC.

3.2.7 Stroj pro zkoušku tahem Zwick

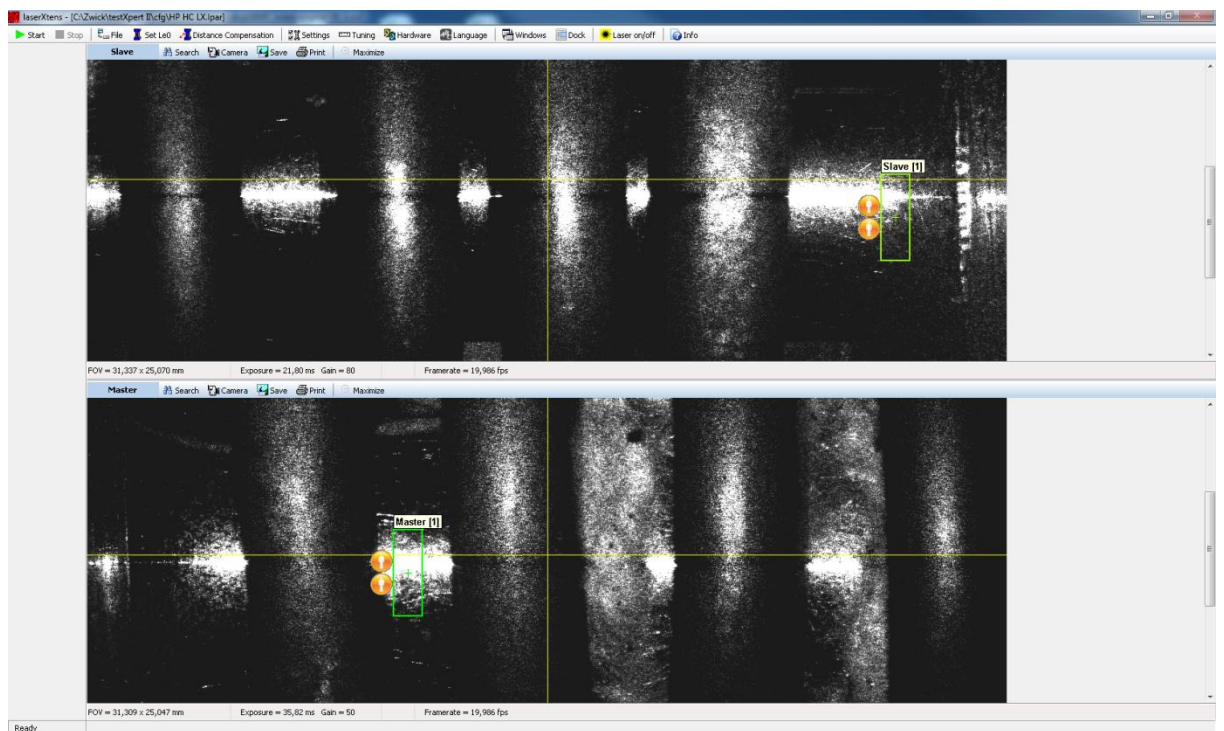
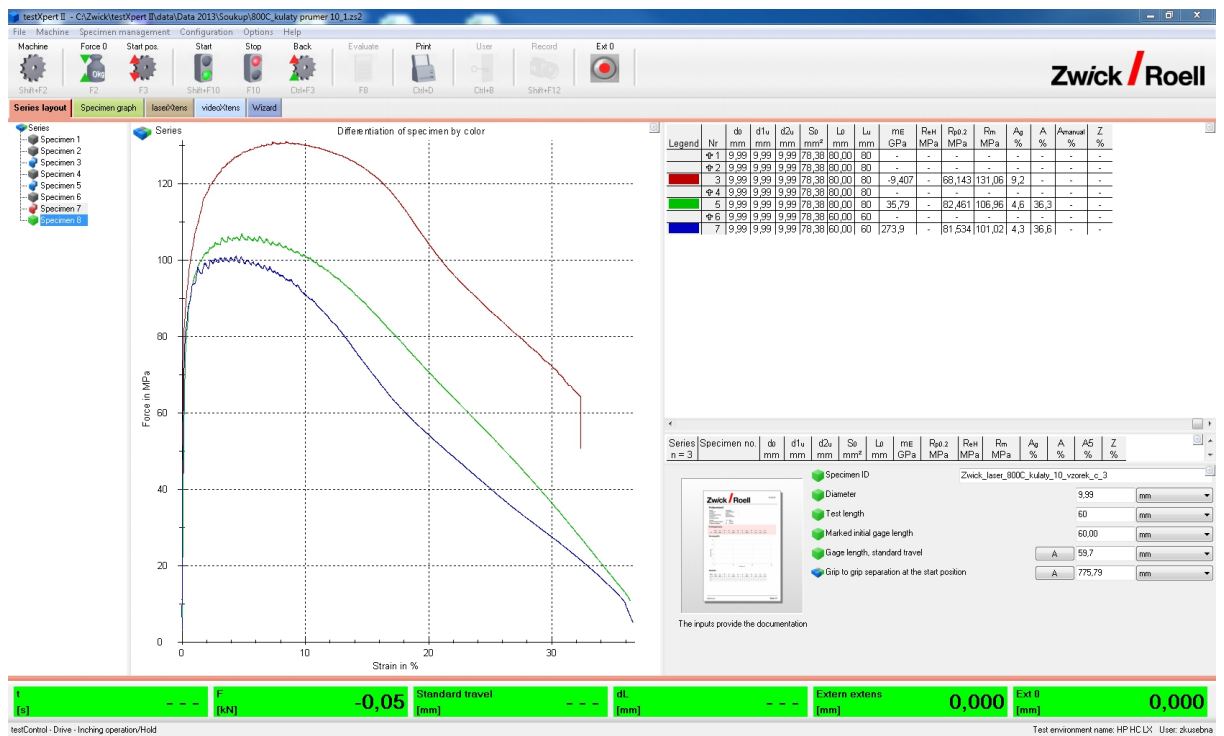
Zwick/Roell je víceúčelový trhací stroj (viz obr. 35), ke kterému lze připojit všechny typy zařízení pro snímání deformací u zkoušky tahem popsané v předchozím textu. Nejvyšší síla vyvozená strojem může být až 250 kN. Je tedy vhodný i pro testování větších vzorků.



Obr. 35. Univerzální trhací stroj Zwick/Roell.

Stroj obsahuje příčník, kterým lze pohybovat ve vertikální poloze. Tímto způsobem je možno nastavit vzdálenost čelistí nebo táhel od sebe pro správné upnutí vzorku. Ke stroji lze připojit táhla, do kterých se upínají zkušební vzorky kulatého průřezu, nebo hydraulické čelisti sloužící k upnutí plochých zkušebních vzorků. Toto upnutí je možno uskutečnit v horní i spodní testovací komoře stroje.

Před spuštěním stroje je nutno nastavit v PC jednotlivé parametry, jako je velikost vzorku, druh používaného zařízení pro záznam deformací, předběžné zatížení, ukončení zkoušky při poklesu napětí, rychlost zatěžování a další.



Obr. 36. Prostředí PC programu zkušebního stroje Zwick/Roell.

V případě optických extenzometrů je vždy v PC programu nastaven jas pozorovaného obrazu. U laserového snímáče je zapotřebí v programu nastavit povahu snímání. Tím je myšleno, zda se snímají dva pevné body, u kterých se sleduje jejich měnící se vzdálenost. Druhou možností

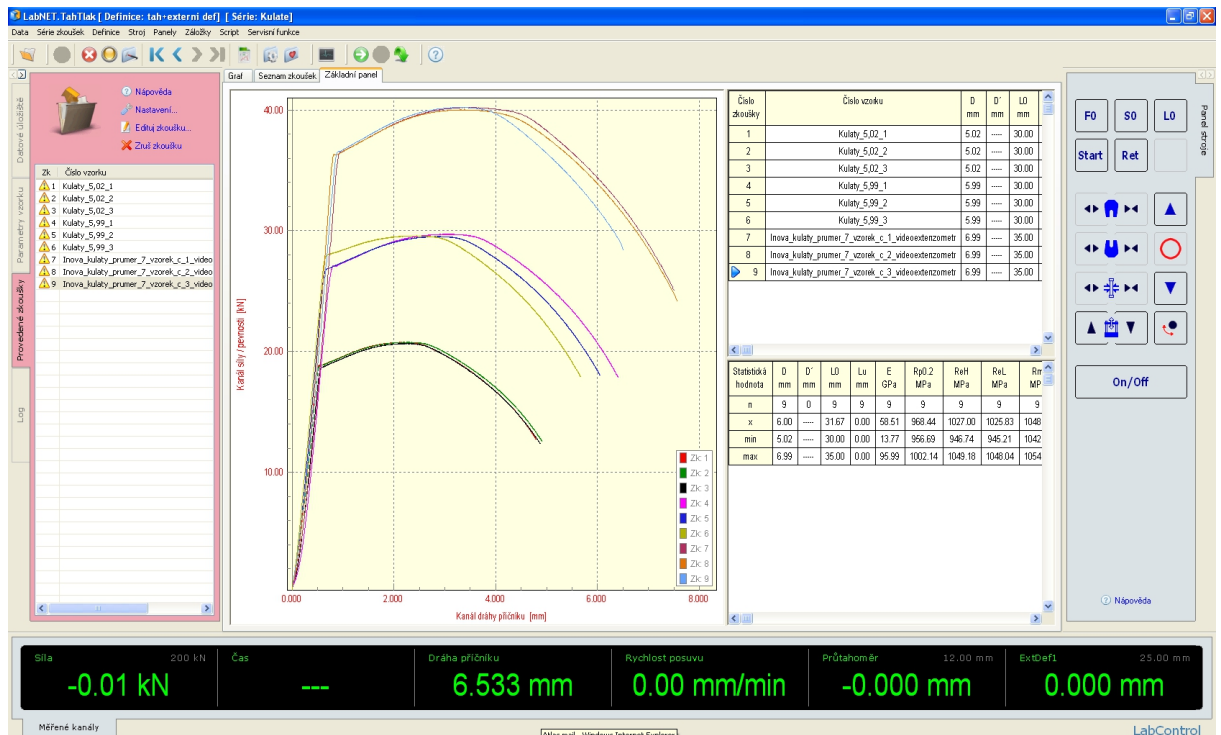
je snímání průtoku materiálu. Při měření lze využít snímání za pomoci jedné nebo dvou kamer.

Vzhled prostředí si lze prohlédnout na *obr. 36*, kde je vidět v horní části záznam tří tahových zkoušek provedených za tepla. Ve spodní části obrázku je možno vidět systém sledování průběhu zkoušky za pomoci laserového systému.

3.2.8 Stroj pro zkoušku tahem Inova

Inova je stroj podobného charakteru jako v předchozím případě, s podobnými parametry. Výjimkou je, že zařízení není vybaveno laserovým snímačem a má pouze horní komoru pro zkoušku tahem.

Lze k němu pro pořízení záznamu deformace připojit tenzometrický extenzometr, kapacitní extenzometr a dále se dá spárovat s video extenzometrem a zařízením DIC Aramis. Ovládání se příliš neliší od zařízení Zwick/Roell. Pro názornost přikládám vzhled uživatelského prostředí se záznamem devíti provedených tahových zkoušek, viz *obr. 37*.



Obr. 37. Prostedí PC programu trhacího stroje Inova.

3.2.9 Padostroj

Je trhací stroj určený pro dynamickou zkoušku tahem. Do spodní komory se za pomoci pouzder upínají zkušební tyče. V prostřední komoře je prostor určený pro manipulaci se závažím. Horní komora slouží k posuvu padacího kladiva do výchozí polohy.

Stroj je vybaven laserovým snímačem, který v době nárazu zaznamenává pohyb nárazového členu a pohyb spodní části upínacího pouzdra. Z pohybu pouzdra lze vyhodnotit hodnoty prodloužení zkušebních vzorků, délku doby potřebnou k přetržení atd. Ke stroji lze připojit sledovací zařízení ve formě vysokorychlostní kamery.



Obr. 38. Padostroj(stroj určený pro dynamické zkoušky tahem).

Před spuštěním se nastaví energie, která je využita na provedení dynamické zkoušky tahem. Tato potenciální energie se vypočte z výšky, ze které padá závaží a z hmotnosti závaží. Oba tyto parametry lze dle potřeb uživatele měnit.

3.3 Experimentální výsledky

Při experimentech byly zjišťovány základní mechanické hodnoty na sadě zkušebních vzorků o různých rozměrech. Experimenty probíhaly na zkušebních strojích s kombinací jednotlivých metod záznamu deformací. Použitá kombinace zařízení pro sledování změny protažení a zkušebních strojů je znázorněna v *tab. 4*.

Tab. 4. Seznam kombinace použitých zkušebních vzorků se záznamem jednotlivých snímačů na daných strojích.

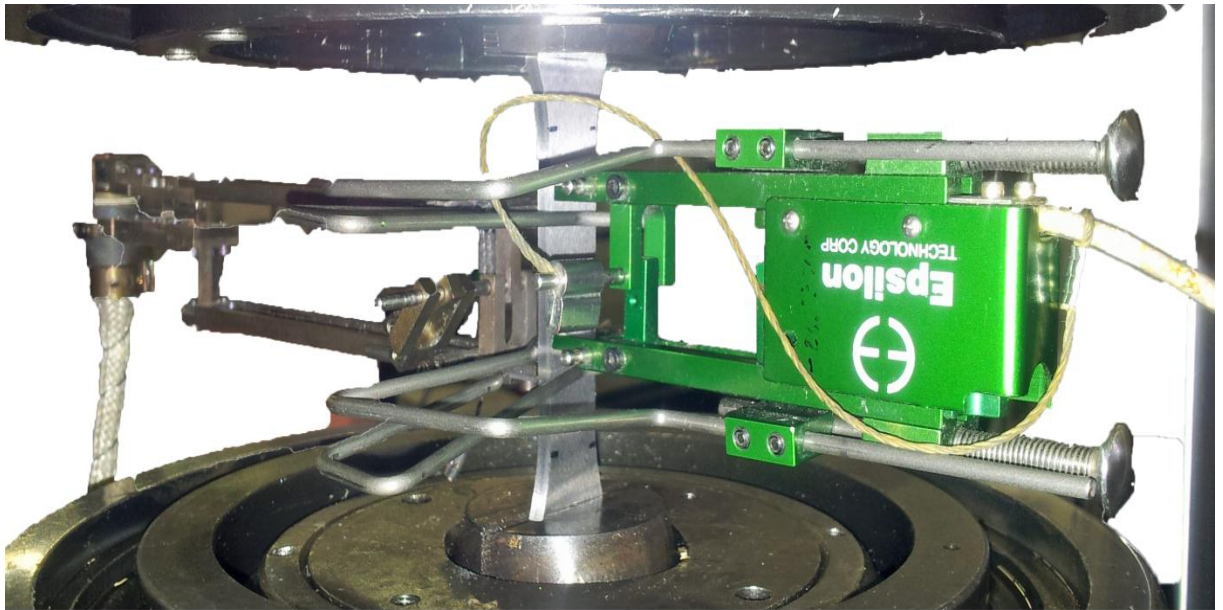
Zkušební stroj	Záznamové zařízení	Rozměry vzorků	
		Kulaté zkušební vzorky	Ploché zkušební vzorky
Inova	Kapacitní snímač (20°C)	Ø5 mm	12,55x2,30 mm
	Tenzometrický extenzometr (20°C)	Ø6 mm	12,55x3,05 mm
	Video extenzometr (20°C)	Ø7 mm	10,75x3,50 mm
	DIC (20°C)	Ø5 mm	12,60x1,01 mm
	Tenzometrický extenzometr (800 °C)	Ø8 mm	
Zwick/Roell	Laserový snímač (20°C)	Ø6 mm	
	Laserový snímač (800°C)	Ø10 mm	
	Video extenzometr (800°C)	Ø8 mm	
Padostroj	Vysokorychlostní kamera (20 °C)	Ø5 mm	10,00x1,00 mm

Kapacitní a tenzometrický snímač (20°C) byl využit k porovnání hodnot mezi mechanickými a optickými metodami záznamu deformací u zkoušky tahem. Vzhledem k daným velikostem vzorků bylo možno nasadit na vzorek obě měřicí zařízení najednou. Následně se porovnaly jednotlivé záznamy zkoušek mezi sebou, i záznamy obou zařízení na jedné zkoušce.

Způsob nasazení lze vidět na *obr. 39*. Při nasazení bylo zapotřebí dbát na to, aby se obě zařízení nedotýkala a tím nedošlo k jejich vzájemnému ovlivnění. Zařízení byla připojena ke stroji Inova, který je schopen paralelně zaznamenávat informace.

Na stroji se nastavila síla předběžného zatížení o hodnotě 0,3 KN. Dále se nastavil rozměr vzorku, rychlost zatěžování, zvolená záznamová média a ukončení zkoušky při poklesu hodnoty zatěžovací síly o 90% z maximální hodnoty, tedy hodnoty pevnosti. Zatěžovací rychlost byla zvolena dle hodnot z tabulky, viz. *příloha č. 1*. Stroj při provádění zkoušky zakresluje její průběh na displeji.

Pro následné externí vyhodnocení dat je zapotřebí data vyexportovat. To se provádí ve formě textového dokumentu, ve kterém jsou uloženy hodnoty času, deformace a síly ve formě číselných dat. Data byla následně vyhodnocena a zpracována do grafů pomocí programu Excel.



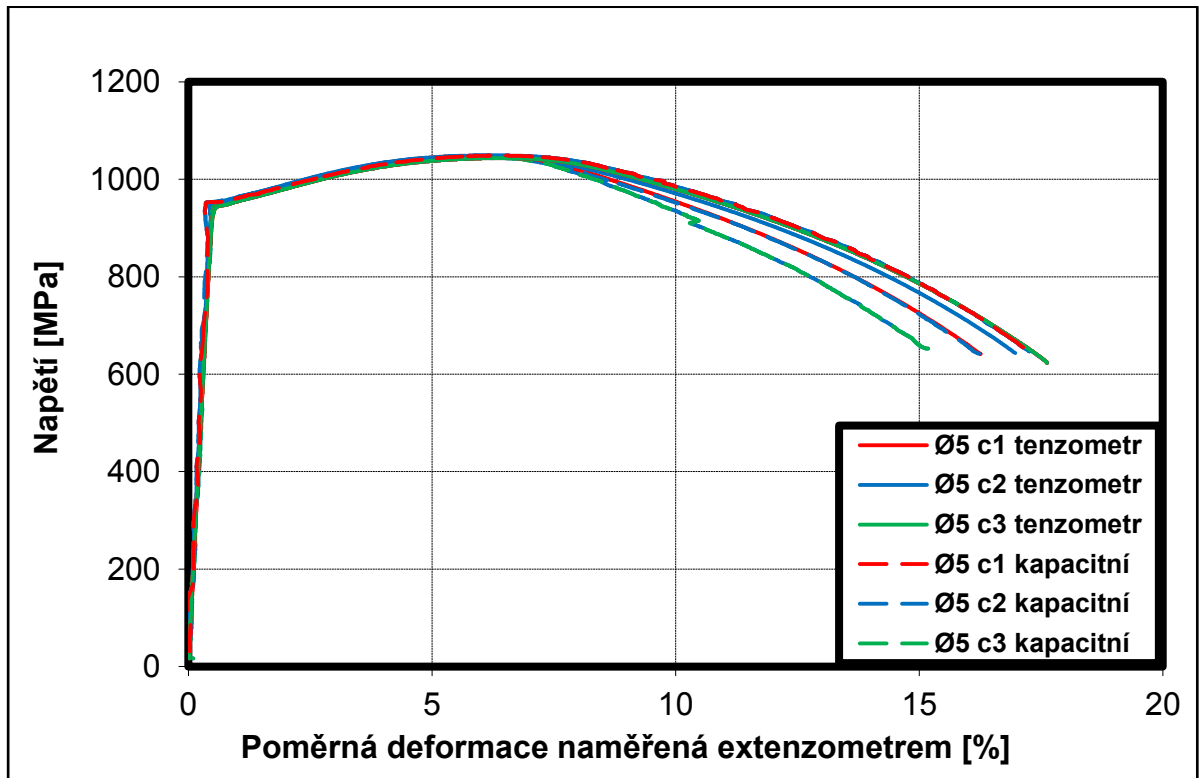
Obr. 39. Způsob nasazení extenzometru a kapacitního snímače při zkoušce tahem.

Graf č. 1 až 4 ukazuje vyhodnocení záznamu měření pro tenzometrický extenzometr a kapacitní extenzometr využitý na zkušebních vzorcích o rozměrech dle tab. 4 a při teplotě 20 °C. Z grafů je patrné, že obě metody měření nedosahovaly výrazné odchylky.

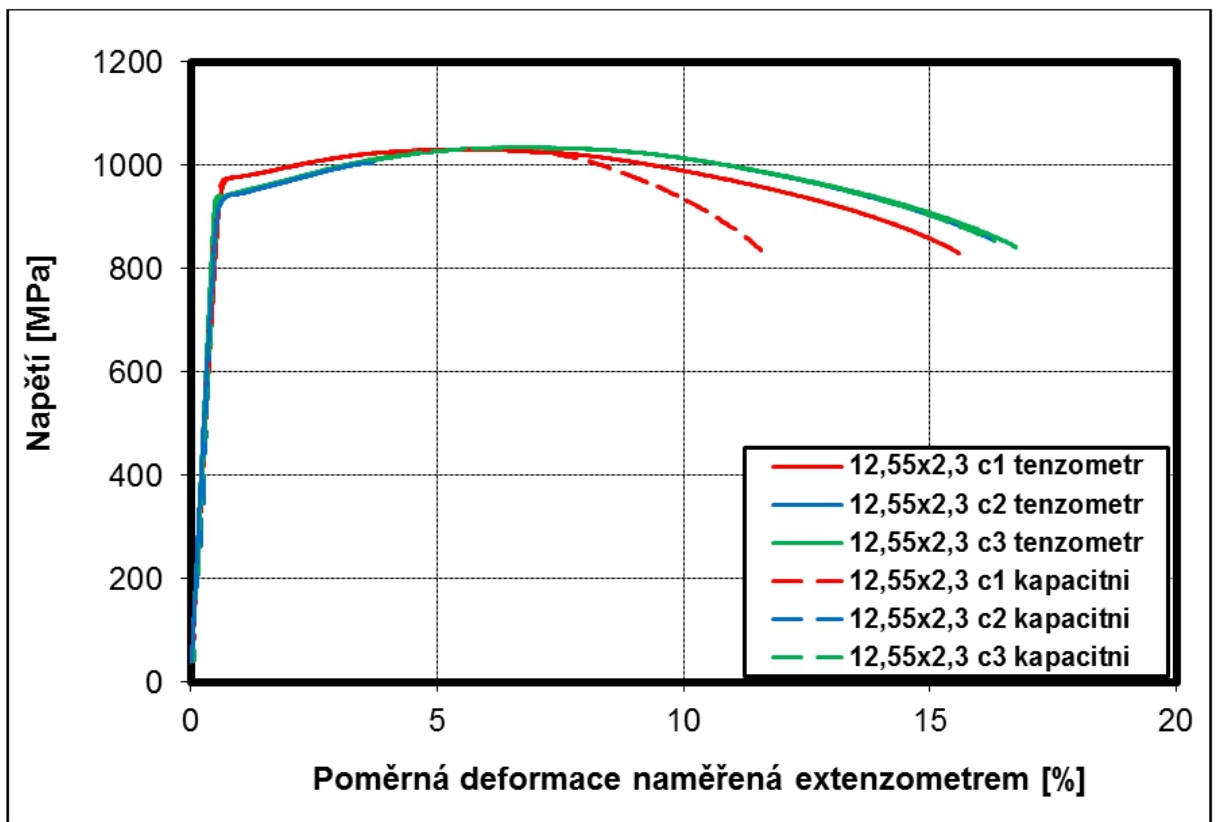
Pokud k odchýlení došlo, bylo to většinou v oblasti vytvoření krčku. Od této oblasti pro nás odchylka není směrodatná. Pro kvantitativní hodnocení byly porovnány hodnoty tří zkoušek provedené vždy na sadě tří zkušebních vzorků. Z těchto tří záznamů byla vybrána jedna reprezentativní zkouška, která nabývala průměrných hodnot. Ta bude následně využita pro porovnání jednotlivých optických i mechanických metod mezi sebou.

Lze konstatovat, že obě použité metody záznamu měření deformací pomocí mechanických snímačů mají téměř totožný průběh a není mezi nimi výrazný rozdíl. Určité rozdíly se objevily u grafu č. 2 až 4. Vždy u jednoho vzorku ze zkušební sady došlo ke zvýšení hodnot meze kluzu. Nejednalo se však o výrazně zvýšenou hodnotu.

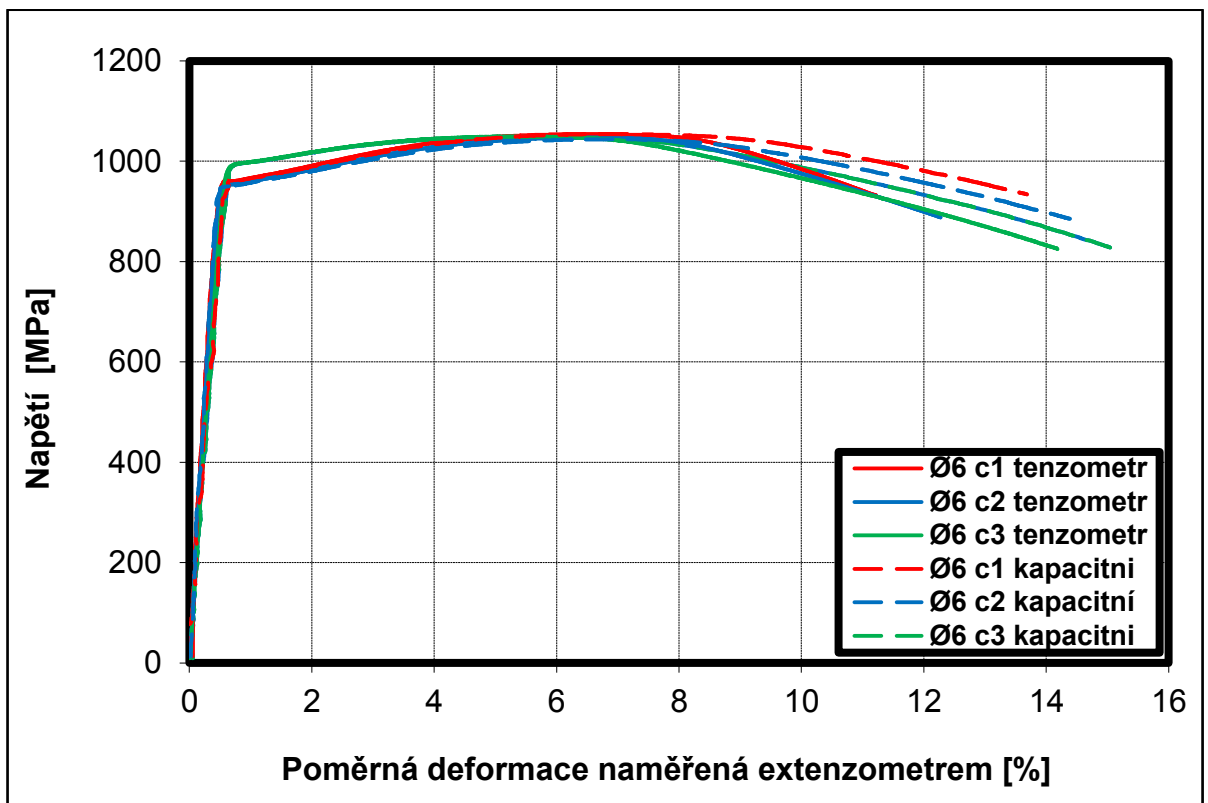
Jelikož toto nastalo vždy u jednoho vzorku z dané sady zkušebních vzorků, dá se předpokládat, že nárůst hodnot může být způsoben např. nesprávným odebráním vzorků při použití pásové pily. Další možností je nehomogenita materiálu. Ta mohla být způsobena při výrobě, kdy mohlo dojít vytvoření této nehomogenity v průběhu válcování materiálu na válcovacích stolicích. Nárůst hodnot nebyl natolik výrazný, aby zasáhl do celkového vyhodnocení dat.



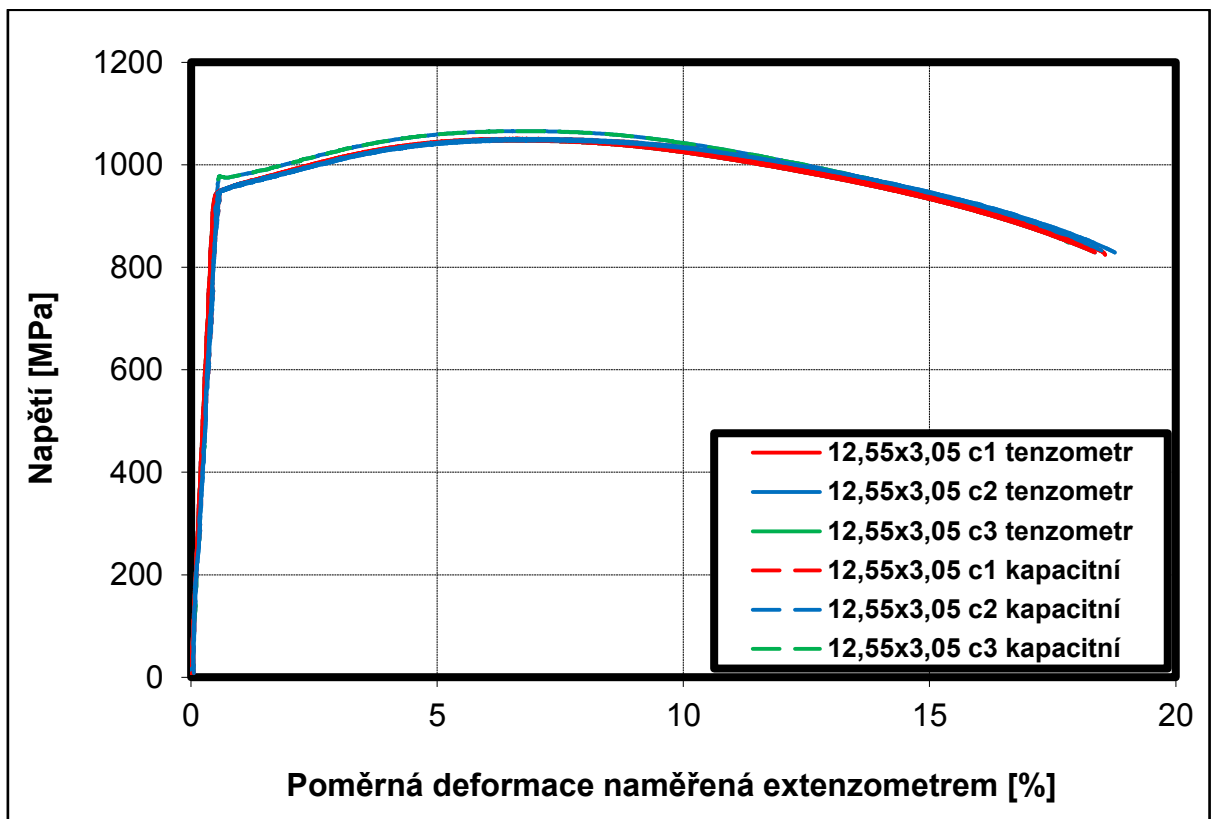
Graf č. 1. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí tenzometrického a kapacitního extenzometru na zkušebním vzorku o \varnothing 5 mm při teplotě 20°C.



Graf č. 2. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí tenzometrického a kapacitního extenzometru na zkušebním vzorku o rozměrech 12,55x2,3 mm při teplotě 20°C.



Graf č. 3. Průběh tahový zkoušek zaznamenaný pomocí tenzometrického a kapacitního extenzometru na zkušební vzorku o \varnothing 6 mm při teplotě 20°C.



Graf č. 4. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí tenzometrického a kapacitního extenzometru na zkušební vzorku o rozměrech 12,55x3,05 mm při teplotě 20°C.

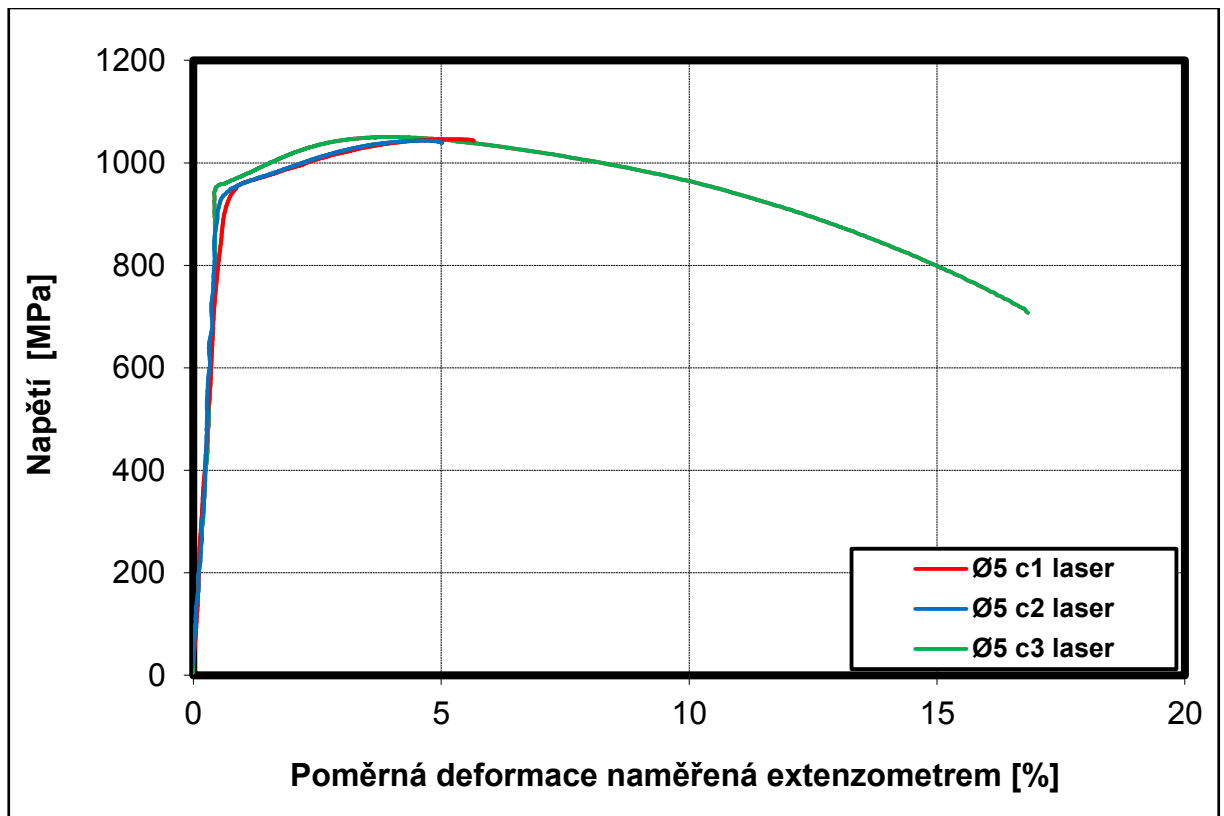
Laserový snímač (20°C) byl využit u stroje Zwick. Přímou na snímači bylo nastaveno zaostření na použité vzorky a hodnota clony. Po základním nastavení na snímacích kamerách se přešlo na nastavení parametrů v PC programu.

Bylo nastaveno předzatížení o hodnotě 0,3 MPa. Dále byly nastaveny hodnoty dle rozměrů vzorku, který byl přeměřen na několika místech. Na základě těchto hodnot se nastavila rychlost zatěžování, průměr vzorku, měřená délka a ukončení zkoušky.

Následně musely být vybrány zkoumané body. Pro tuto práci bylo zvoleno pozorování deformací dvěma kamerami. Zvolila se pozorovaná oblast. Dále bylo nastaveno, že kamery se budou pohybovat se změnou pohybu materiálu zkušební vzorku. Provedlo se jemné zaostření v softwaru stroje, změna jasu a kontrastu. Při správném nastavení byla pozorovaná oblast ohraničena zeleným obdélníkem.

Pokud by se toto nastavení neprovedlo a ohraničení oblasti by svítilo oranžově nebo dokonce červeně, zkouška by nemohla být uskutečněna, jelikož stroj by nesnímal deformace. Všechny parametry se nastavily dle zkušenosti obsluhy. Jedná se o individuální záležitost u každého zkušební vzorku.

Poté byly provedeny zkoušky na třech zkušebních tyčích o \varnothing 5 mm. Záznam měření byl vyhodnocen podle předem připraveného makra v programu Excel, do kterého se vkládaly vyexportované hodnoty po provedení všech zkoušek. Výsledky vyhodnocení je možno vidět v grafu č. 5.



Graf č. 5. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí laserového extenzometru na zkušebním vzorku o \varnothing 5 mm při teplotě 20°C.

Ze záznamu všech tří zkoušek je patrné, že nedošlo k výraznému odchýlení hodnot. Zaznamenaná data můžeme využít na závěrečné porovnání.

Video-extenzometr (20°C) je snímač, který nebylo možno připojit přímo k univerzálnímu stroji pro zkoušku tahem. Avšak lze ho s ním nakalibrovat dle frekvence zaznamenávání. Pro tuto metodu bylo zapotřebí nejprve orýsovat zkušební vzorky bílou a černou barvou, která vytvořila přechodové značky. Snímač je schopen zaznamenávat pouze přechod barev černé a bílé.

Dále musela být naměřena vzdálenost takto označených přechodů, která se zadala do softwaru video extenzometru. To je prováděno z důvodu zkalibrování přístroje. Na záznamovém zařízení se vybere druh snímání těchto značek. Může být vybrán přechod černá-bílá, černé pozadí a bílé popředí, nebo černé popředí a bílé pozadí.

Volba přechodu závisí na využití osvětlení vzorku. Je-li vzorek zaznamenáván bez osvětlovacího zařízení, vyberou se přechody značek černá-bílá. Umístí-li se na vzorek přídavná zařízení ve formě sledovaných značek, které jsou vyvedeny mimo zařízení, a je-li následně vzorek osvětlen zepředu, pozadí bude černé. Vzorek spolu s pozorovanými vyvedenými značkami se budou jevit jako světlé body. Pokud se pozadí osvětlí pomocí světelné tabule, která funguje jako světlá plocha, vzorek se jeví jako tmavý pozorovaný objekt.

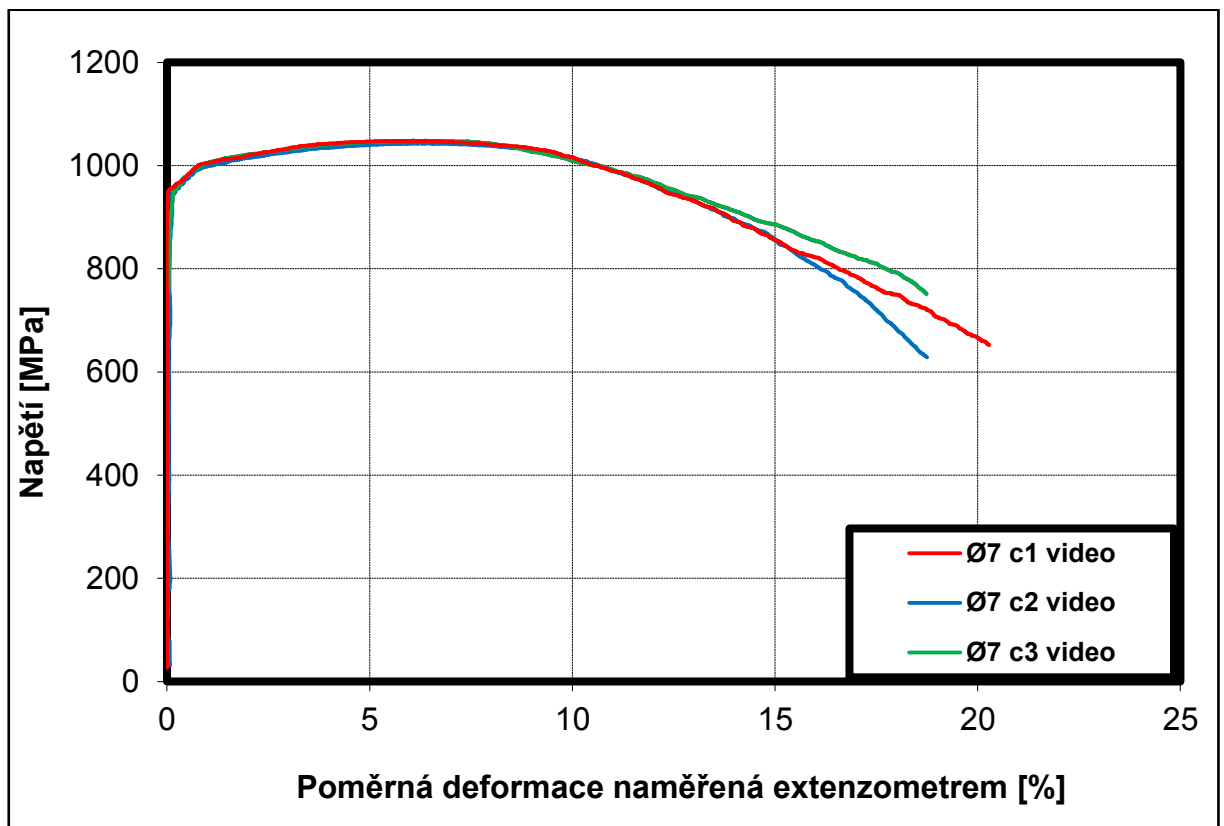
Pro pozorování při 20°C byla vybrána metoda orýsování kontrastními značkami. To také bylo nastaveno v menu programu záznamového média. Dále se nastavila kamera do správné polohy a vzdálenosti od vzorku tak, aby video extenzometr zachytil průběh zkoušky na celém zkušebním vzorku. Bylo provedeno zaostření na objektivu záznamového média a následné nastavení hodnoty clony (taktéž na objektivu přístroje).

V dalším kroku se provedlo jemné nastavení hodnot v softwaru pro ovládání video extenzometru. Bylo provedeno zaostření, nastavila se hodnota jasu a kontrastu tak, aby přechody značek byly co nejvýraznější, a nastavila se vzdálenost pozorovaných přechodových značek. Bylo provedeno znovu automatické vyhledání značek, popř. oprava těchto pozorovaných bodů. Dále byla nastavena rychlost snímání o frekvenci 0,1 sn/s.

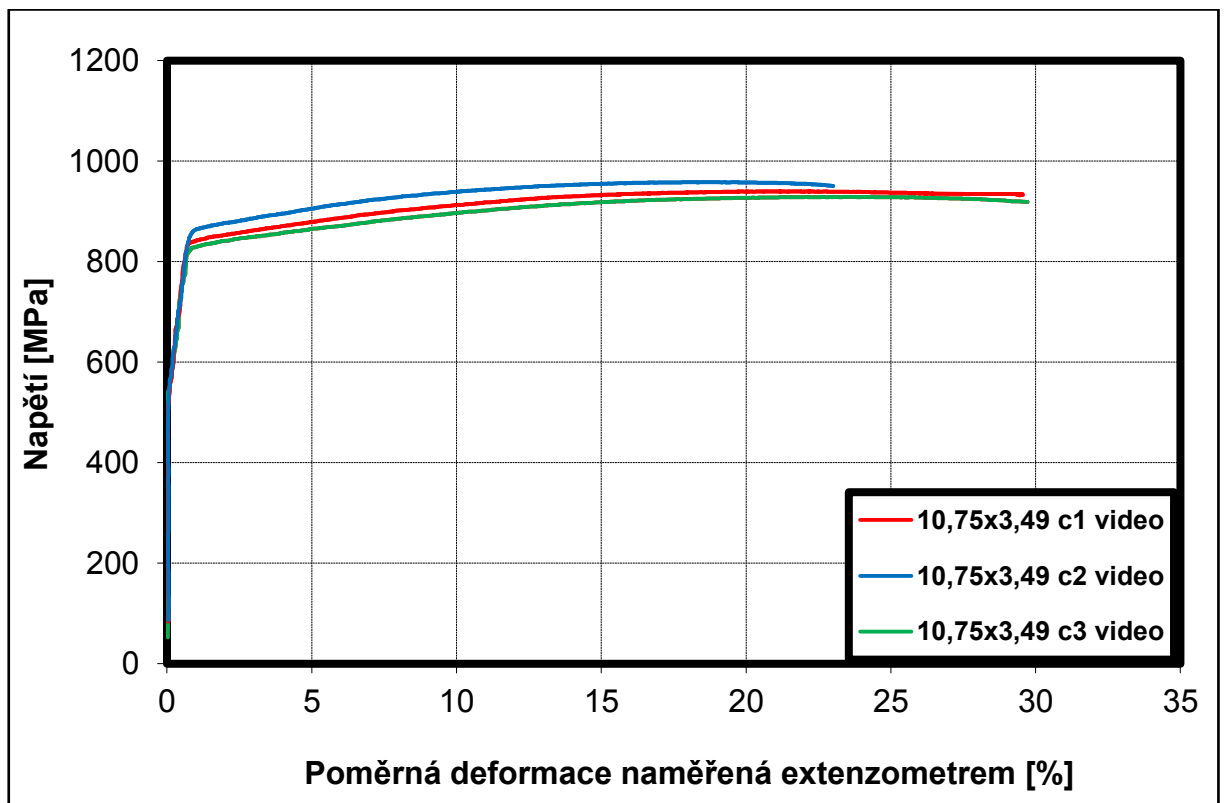
Na stroji Inova byla nastavena hodnota předběžného zatížení 0,3 KN. Rychlost zatěžování byla opět vybrána dle tabulky, viz. *příloha č.1*. Byly zadány rozměry zkoušeného vzorku, ukončení zkoušky při poklesu maximální síly o 90%, záznamová frekvence a stroje se připravily na zkoušku.

Po opětovném překontrolování všech zadaných dat bylo zapotřebí začátek záznamu zkoušky provést tak, aby započal ve stejnou chvíli a naměřené hodnoty si odpovídaly dle časového záznamu.

Zaznamenaná data byla následně vyexportována ve formě textového souboru a zpracována v programu Excel. Výsledky záznamu lze vidět na *grafu 6* a *7*. Z obou grafů je patrná skutečnost, že video extenzometr má problém se záznamem deformací do meze úměrnosti a v *grafu č. 6* nejsou deformace patrné až do meze kluzu. Z těchto důvodů nelze provést následné hodnocení Youngova modulu.



Graf č. 6. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí video-extenzometru na zkušební vzorku o $\varnothing 7$ mm při teplotě 20°C .



Graf č. 7. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí video-extenzometru na zkušební vzorku o rozměrech 10,75x3,49 mm při teplotě 20°C .

Pro ploché zkušební vzorky o rozměrech 10,75x3,49 vyšly hodnoty a průběh *grafu č. 7* na první pohled jiné, než v ostatních měřeních. Proto bylo nutné před provedením dalších zkoušek provést znovu proměření všech hodnot a nastavení stroje a záznamových zařízení.

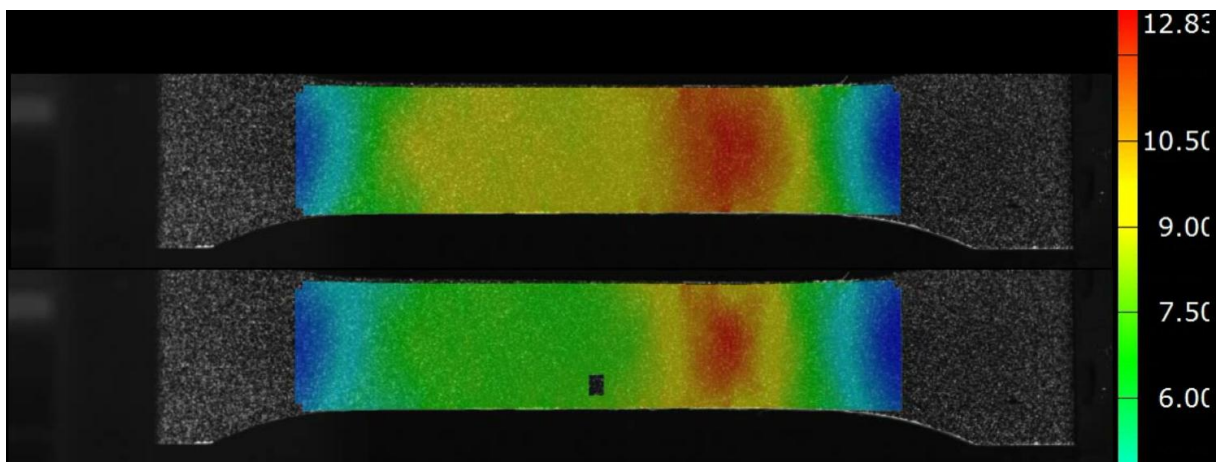
Vše bylo provedeno správně, avšak ostatní zkoušky z této sady plochých zkušebních vzorků byly podobných hodnot. Lze předpokládat, že došlo při výrobě k záměně materiálu a zaznamenané hodnoty z této sady plochých zkušebních vzorků musely být vyřazeny z následného hodnocení.

DIC je snímací zařízení, které nelze připojit přímo ke zkušebnímu stroji. Pro vyhodnocení záznamu bylo nutné nejprve nabarvit zkušební vzorky, viz *obr. 34*. Nabarvení se provádělo speciální bílou barvou, která se nastříkala na vzorky. Po jejím zaschnutí se vzorky poprášily barvou na bázi suspenze obsahující uhlíkové částí. Tímto jsme vytvořili černobílý reliéf na povrchu vzorku nutný k tomu, aby zařízení DIC Aramis bylo schopno vyhodnocovat deformace a namapovat si povrch.

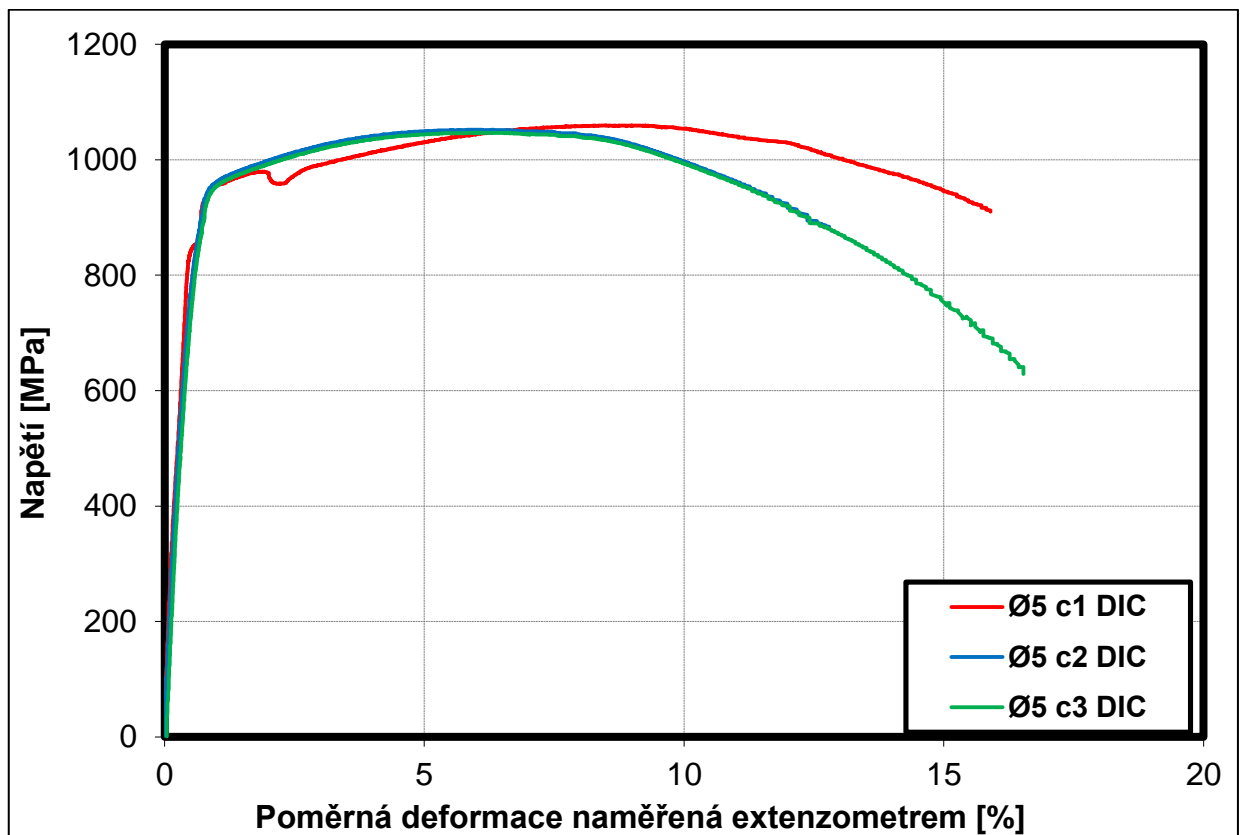
Dále bylo zapotřebí provést nastavení zařízení, ustálit ho do správné polohy, zaostřit, zvolit hodnotu clony a nakalibrovat ho. To se provádělo za pomoci speciální reflexní desky, která byla v prostoru natáčena dle požadavků zobrazených na displeji zařízení.

Po zkalibrování byly na stroji Inova nastaveny dodatečné parametry nutné k provedení zkoušky, jako je předzatižení, rychlost zatěžování, rozměry vzorku atd. Podobně jako při provádění záznamů u video extenzometru bylo zapotřebí spustit zkoušku ve stejný čas, aby si tyto hodnoty času odpovídaly a tím se usnadnilo následné hodnocení dat po jejich exportování ze záznamových zařízení.

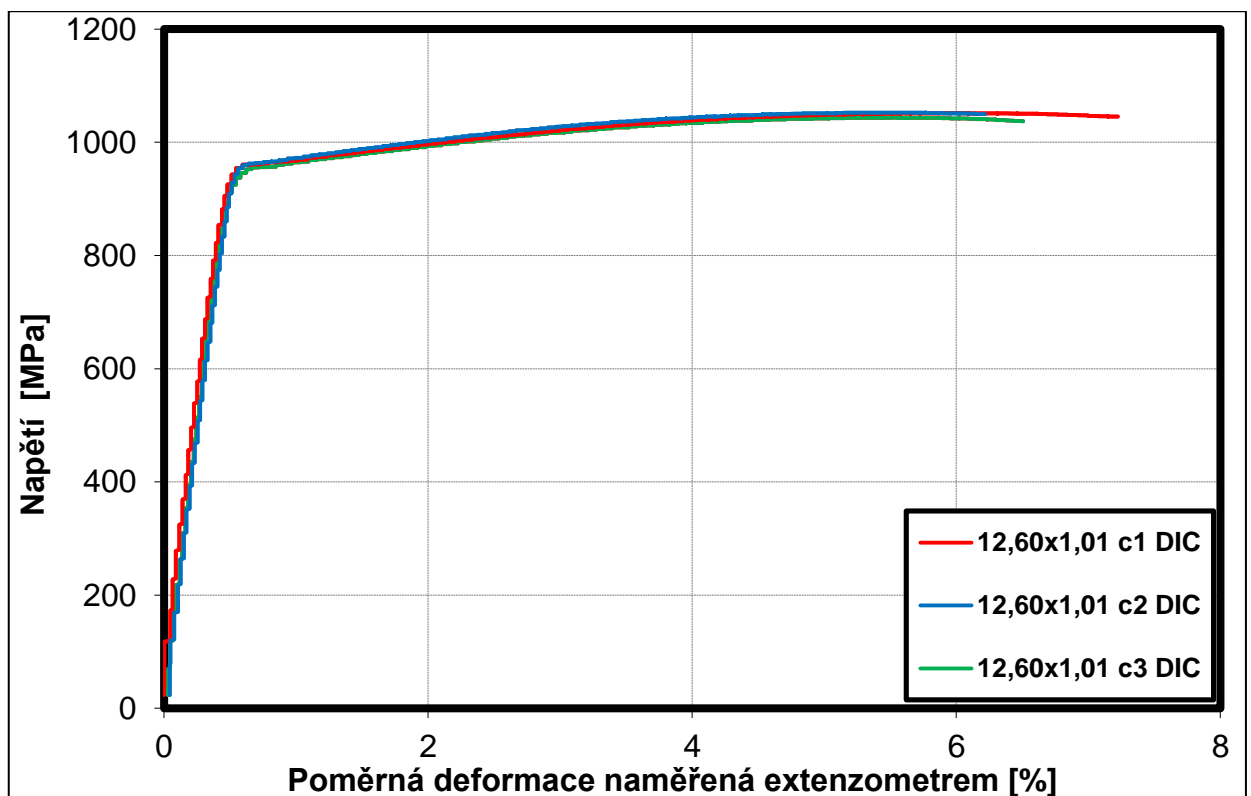
Problémem při vyhodnocování bylo, že v průběhu zkoušky docházelo k odlupování barvy a nebylo tak možné vyhodnotit příčné deformace. Na vyhodnocení podélných deformací toto nemělo vliv. Ze záznamů zkoušek je patrné, že jejich hodnoty se příliš neodchylovaly, vyjma jedné. Proto lze říci, že zkoušky byly provedeny správně. Odchýlení bylo způsobeno ztrátou adheze barvy. Obrovskou výhodou zařízení je, že je možné zpětně pozorovat, jak k porušení došlo a kde bylo nejvyšší napětí. Celou zkoušku lze takto zpětně rozebrat v postprocesoru. Příklad digitálního záznamu je uveden na *obr. 40*.



Obr. 40. Záznam deformací pořízený pomocí metody DIC Aramis.



Graf č. 8. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí DIC na zkušební vzorku o \varnothing 5 mm při teplotě 20°C.



Graf č. 9. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí DIC na zkušební vzorku o rozměrech 12,60x1,01 mm při teplotě 20°C.

Tenzometrický snímač (800°C) byl použit v kombinaci se strojem Inova. Ke stroji Inova se připevnila tepelná komora, která byla v rámci testování předehřáta na 800°C. Hodnota teploty předehřátí 800°C byla zvolena z důvodu otestování vzorků, u kterých dochází k fázovým přeměnám a z důvodu pozorování žhnoucích vzorků, které mění svoji barvu vlivem teploty.

Komora může být použita pro zkoušky provedené za zvýšených teplot, i pro zkoušky testované při teplotách pod bodem mrazu. Pro naši aplikaci bylo využito první varianty. Komora je vyzděna teplotně odolnou vyzdívkou a skelnou vatou, které fungují jako izolátory. Teploty předehřevu se dosahuje pomocí odporových vlastností kantalového drátu.

Po předehřátí byl vložen do prostoru komory testovaný vzorek, na který byl připevněn tenzometrický snímač. Od snímače pro pokojové teploty se tento liší jen minimálně. Tábla extenzometru jsou z keramického materiálu, který je schopen odolávat vysokým teplotám. Tábla jsou dlouhá z důvodu ochrany elektronických částí extenzometru. Ten je vyveden mimo komoru, aby nedošlo k jeho zničení vlivem zvýšených teplot vyskytujících se u tohoto charakteru zkoušek. Proto se u komory vyskytuje mezera, kterou lze vyvést snímací zařízení ven, viz *obr. 41*.



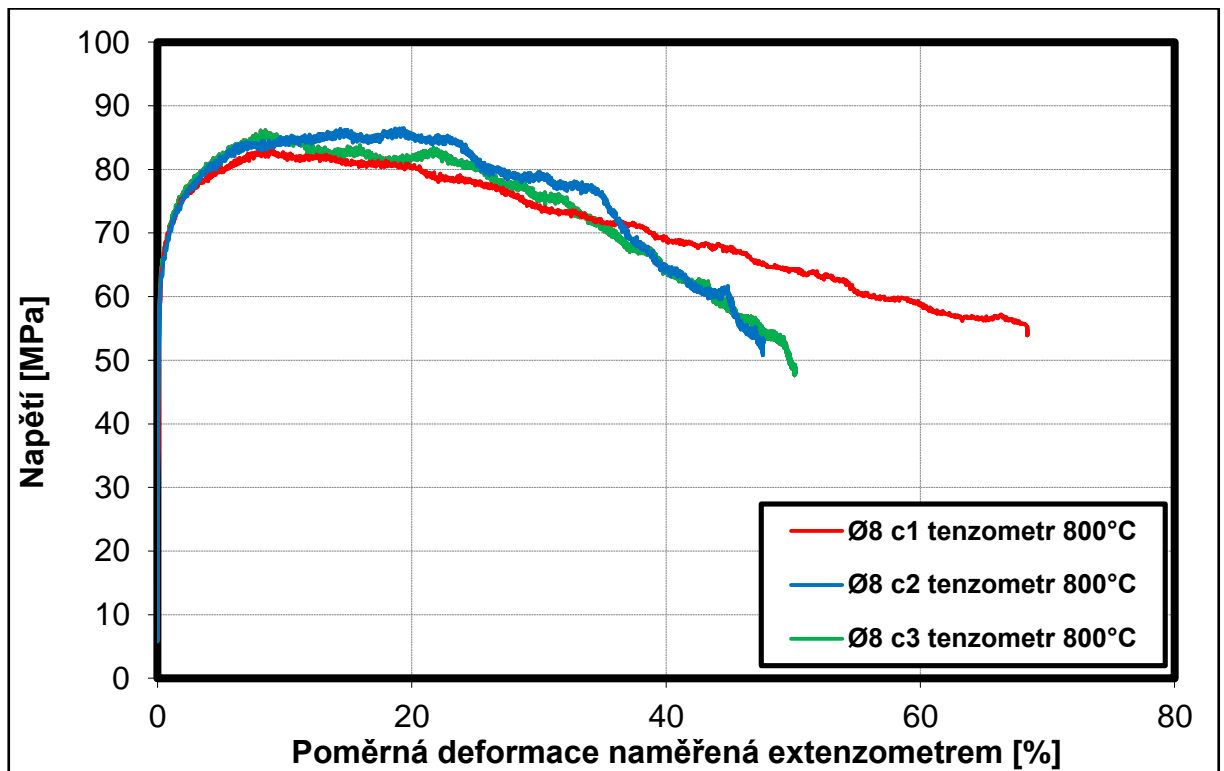
Obr. 42. Tepelná komora nasazená na táhlech zkušebního stroje Inova.

K nasazení extenzometru je zapotřebí využít provázku ze skelné vaty. Tento druh snímače nemá stavitelná táhla, která by zapříčinila vyvození síly pro upnutí na zkušební vzorku, jako je tomu u extenzometrů pro aplikace za pokojové teploty. K tomuto účelu je využít zmiňovaný provázek. Ten byl navázán na pružinky, následně obmotán okolo zkušební vzorku a pružinky se připevnil k tenzometrickému snímači po jeho přiložení ke zkušebnímu vzorku. Takto vyvozená síla zapříčiní, že snímač v průběhu testování nespadne.

Dalším krokem bylo nastavení parametrů v PC zařízení univerzálního trhacího stroje. Byla nastavena hodnota předběžného zatížení. Ta dosahovala hodnot 0,3 MPa, jako v předchozích případech testování. Dále se nastavily rozměry vzorku, ukončení zkoušky při poklesu zatížení o 100% a rychlost zatěžování.

Po provedení všech zkoušek se data exportovala ve formě textového dokumentu a následně byla vyhodnocena za pomoci počítačového programu Excel. Vyhodnocené výsledky jsou zaznamenány na grafu č. 10.

Ze záznamu zkoušek je patrné, že jednotlivé průběhy zkoušek se příliš neodlišovaly. Lze konstatovat, že zkoušky byly provedeny správně a vyhodnocená data lze dále využít.



Graf č. 10. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí tenzometrického snímače na zkušební vzorku o $\varnothing 8$ mm při teplotě 800°C .

Video-extenzometr (800°C) byl použit společně se záznamovým zařízením Zwick/Roell. Na tento univerzální trhací stroj nejde vzhledem ke konstrukci nasadit tepelná komora. Dalším důvodem použití stroje je charakter způsobu pozorování deformací zaznamenaných video extenzometrem. Ten potřebuje pro své pozorování vidět přímo pozorovaný vzorek. To by u komory nebylo možné, vzhledem k malému vstupnímu otvoru.

Z tohoto důvodu byl jako způsob ohřátí vzorku zvolen indukční ohřev. Z toho plynuly některé úpravy nutné k přípravě vzorku. Bylo zapotřebí vytvořit si termočlánek, který by hlídal teplotu nahřátí vzorku a jeho teplotu v průběhu zkoušky.

Termočlánek byl přivařen přímo na zkoušený vzorek, viz *obr. 43*, a následně byl obmotán provázkem ze skelné vaty. To se provádělo proto, aby v průběhu zkoušky termočlánek ze zkoušeného vzorku neupadl. Tím by došlo ke změně hodnot teploty přehřevu a znehodnocení dat zaznamenané zkoušky.



Obr. 43. Zkušební vzorek s přivařeným termočlánkem.

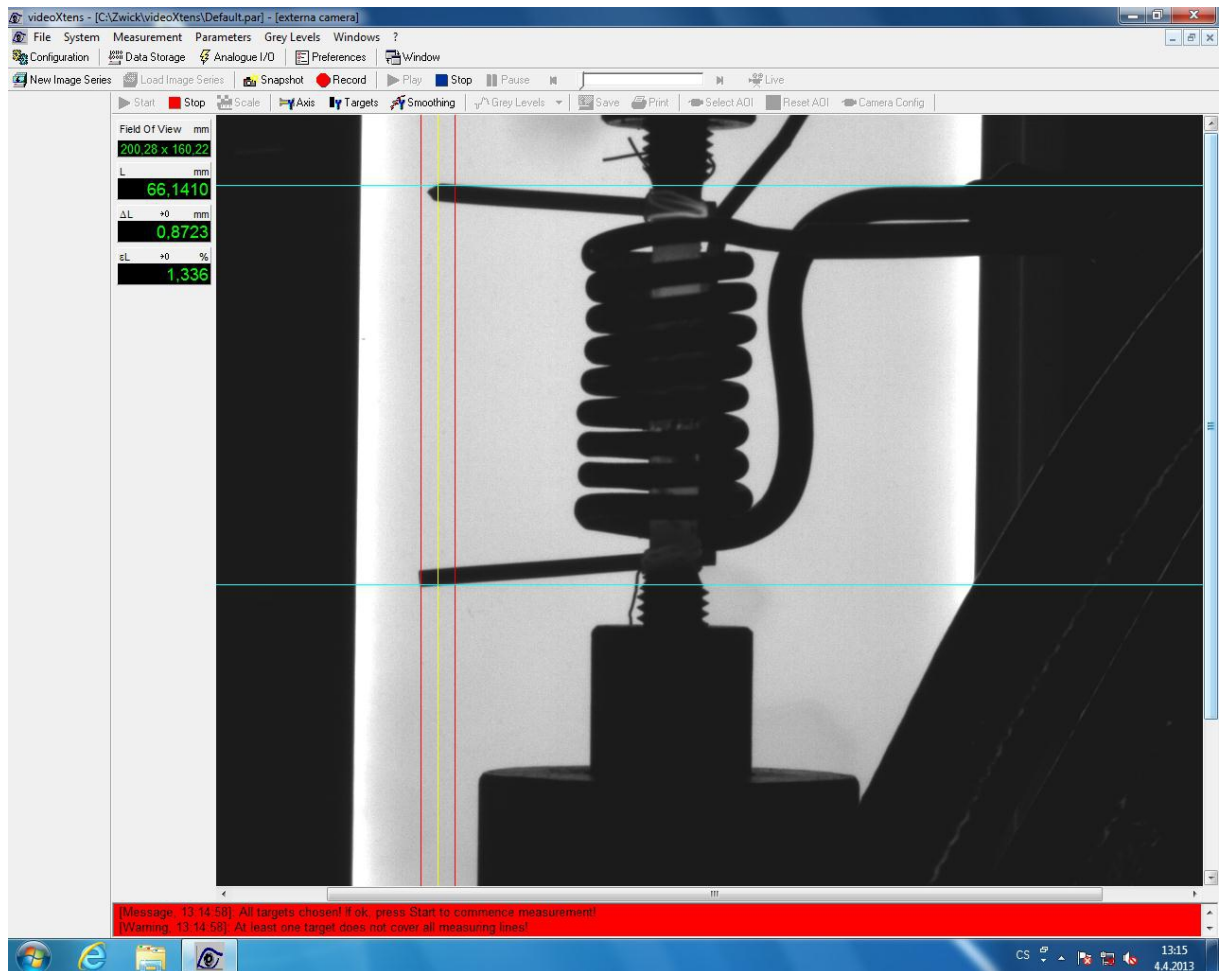
Poté se připravil indukční ohřev, kterým se provlékla takto připravená zkouška. Videoextenzometr je schopen pozorovat pouze přechod barev černá – bílá. Kdybychom označili vzorky pouze orýsováním za pomoci barev, jako tomu bylo u pozorování za pokojových teplot, nebyl by záznam možný. Při dané teplotě se barevné značky odpaří. Proto bylo zapotřebí vymyslet náhradní řešení. To spočívalo v tom, že se na vzorek připevnil keramické tyčky, viz *obr. 44*.



Obr. 44. Příprava zkušební vzorku pro provedení záznamu zkoušky při 800°C.

Následně bylo nasvíceno pozadí za pomoci světelné tabule. Proto se zkušební vzorek s přidáním tyčkami jevil na záznamu video extenzometru jako tmavý, viz *obr. 45*. Pokud bychom toto neprovedli, nebylo by možné provést pozorování.

Na ovládacím panelu indukčního ohřevu byla nastavena teplota, na kterou měl být vzorek ohřátý, a rychlost ohřevu. V době, kdy probíhalo nahřátí vzorku, se nastavil video-extenzometr do výchozí polohy. Došlo k jeho vycentrování, jako v případě měření za pokojové teploty.



Obr. 45. Vzhled PC prostředí při nastavování video-extenzometru při zkoušení zkušební vzorku při 800°C.

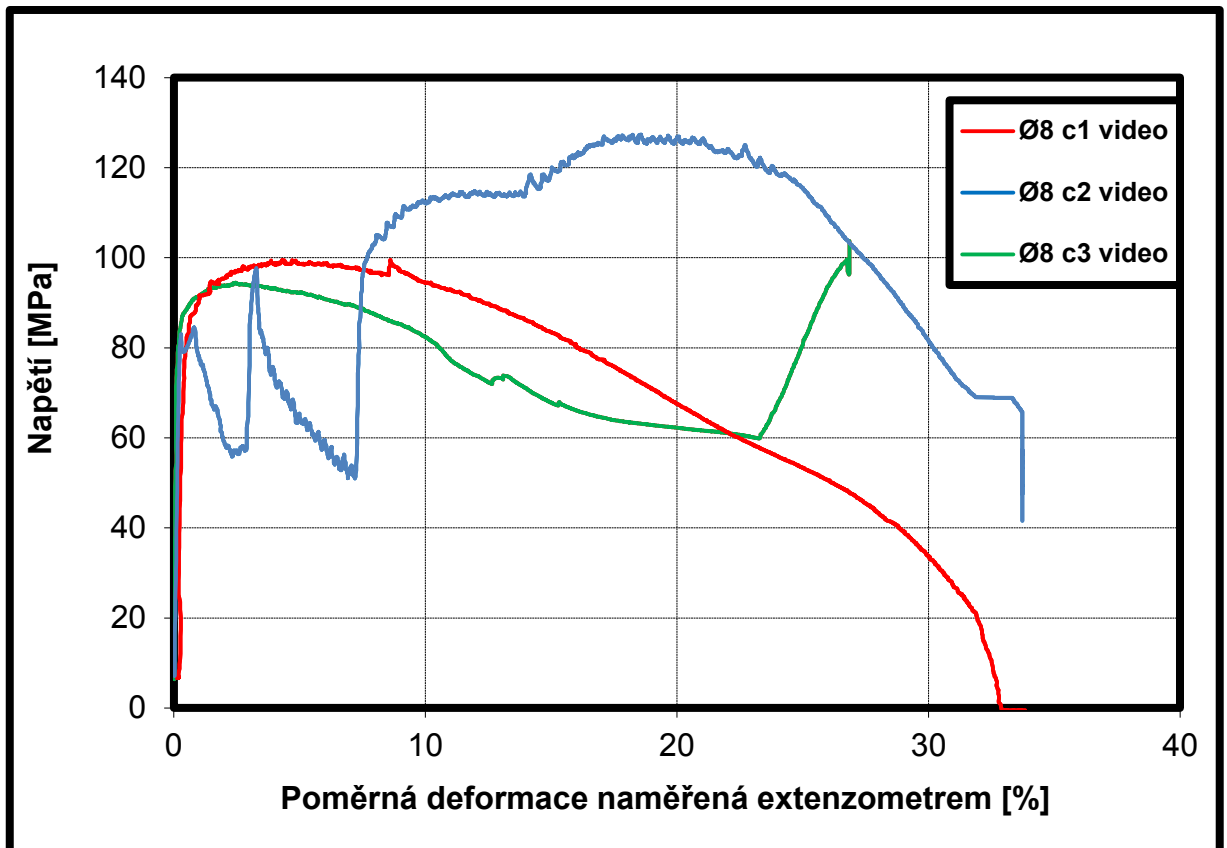
Po nahřátí na příslušnou teplotu, byla nastavena hodnota clony a kamera byla zaostřena na pozorovanou část vzorku. Dále se provedlo zkalkulování video-extenzometru a nastavení ostatních parametrů, jako v případě měření za pokojové teploty.

Na univerzálním trhacím stroji byla nastavena hodnota předběžného zatížení 0,3 MPa. Následně se provedly všechny tahové zkoušky. Vyexportovaná data byla vyhodnocena v programu Excel. Jednotlivá data bylo nutné k sobě přiřadit za pomoci spárování dat dle časů si odpovídajících.

Vyhodnocené zkoušky si lze prohlédnout na *grafu č. 11*. Ze záznamu jednotlivých zkoušek je patrné, že zkouška č. 3 nebyla provedena správně. Tento záznam jsem vložil z důvodu, aby bylo jasné, co se stane, dojde-li k nastavení nesprávných parametrů záznamového média.

Zkouška jako taková proběhla na první pohled bez větších problémů, avšak je patrné, že v průběhu zkoušky zřejmě upadl termočlánek, a proto došlo ke kolísání hodnot teploty.

Aby bylo možné zkoušky vyhodnotit jako správné, byla provedena náprava a zkouška se opakovala s novým vzorkem. Po opakování zkoušky se potvrdily hodnoty předešlých dvou měření, a proto lze tyto hodnoty následně využít pro závěrečné hodnocení porovnání jednotlivých zkoušek s využitím různých záznamových zařízení.



Graf č. 11. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí video-extenzometru na zkušební vzorku o \varnothing 8 mm při teplotě 800°C.

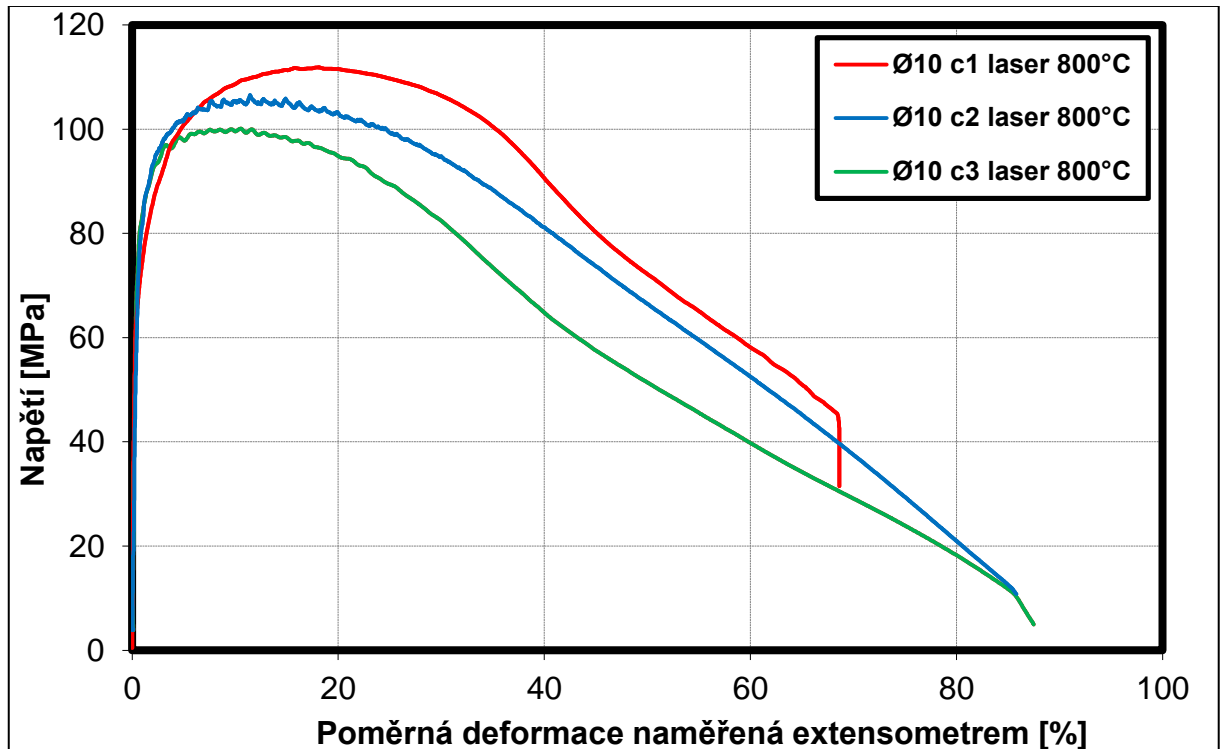
Laserový snímač (800°C). Pro tuto aplikaci by mohla být využita tepelná komora. Na záznam za pomoci laseru by byl vstupní otvor zřejmě dostatečně veliký. Komora se ale nevešla do konstrukce zařízení Zwick/Roell. Proto se zvolil jako forma ohřevu zkušebních těles indukční ohřev.

Vzorky byly připraveny obdobně jako v předchozím případě. Na vzorky se opět navařil termočlánek. Vzorek byl provlečen do vnitřku indukčního zařízení a následně upevněn do táhel univerzálního trhačického stroje. Vzhledem k povaze zařízení odpadla nutnost přidat keramické tyčky, které by bylo zapotřebí pozorovat mimo vzorek.

V počítačovém prostředí se nastavily všechny hodnoty nutné pro správné provedení zkoušky. Bylo provedeno zaostření záznamových kamer na laserovém snímači a nastavení hodnoty

clon. Dále se vzorek nahřál na požadovanou teplotu. V PC prostředí se dodatečně nastavily jemné korekce předem nastavených hodnot, které se změnilly v důsledku povahy žhnoucího tělesa.

Záznamy jednotlivých zkoušek se vyhodnotily jako v předchozích případech a jejich výsledky jsou znázorněny v grafu č. 12. Ze záznamů je patrné, že zkoušky se v jednotlivých záznamech měření odchylovaly. Tento odchyl je zřejmě způsoben nedokonalým prohřátím vzorků. Tuto nehomogenitu prohřátí způsobuje nedokonalost metody indukčního ohřevu.



Graf č. 12. Průběh tahových zkoušek zaznamenaný pomocí DIC na zkušební vzorku o \varnothing 10 mm při teplotě 800°C.

Padostroj byl využit pro dynamickou tahovou zkoušku. Pro záznam deformací se použila vysokorychlostní kamera. Dle prvotního návrhu experimentu byly použity kulaté zkušební vzorky \varnothing 8 mm. Tyto vzorky nebylo na daném zařízení možno přerazit ani při nastavení maximálních hodnot. Proto bylo zapotřebí upravit návrh testování a vzorky zmenšit na hodnotu \varnothing 5 mm. Po provedených změnách se uskutečnily nové zkoušky, u kterých došlo k přeražení všech testovaných vzorků.

Před provedením zkoušek bylo nutné vzorky orýsovat. To se provedlo černou a bílou fixou. Přechod těchto dvou barev sloužil jako značky potřebné pro zachycení deformací, které nastaly v průběhu zkoušky tahem. Vysokorychlostní kamera pracuje na stejném principu jako video extenzometr použitý pro statické zkoušky tahem. Zaznamenává sledované značky, které se vytvoří přechodem barev černá-bílá.

Po takto provedeném označení testovaných vzorků bylo nutno nastavit HSC kameru do výchozí pozice. Kamera musela být nastavena do takové vzdálenosti, aby bylo možno zachytit průběh celé zkoušky. Z důvodu povahy HSC kamery bylo pro správné osvětlení důležité dodatečné nasvícení pozorované scény. K tomu posloužily přídavné osvětlovače. Dále se provedlo zaostření na pozorovaný objekt a nastavení clony.

V přídavném PC byly do ovládacího program stroje zadány požadované parametry. Mezi tyto parametry patří hodnota nastavené výšky, ze které závaží padalo, rozměry vzorku a snímkovací frekvence.

Po nastavení těchto parametrů proběhl export dat a jejich vyhodnocení. Záznamy vyhodnocených zkoušek se nacházejí v *grafu č. 13 a 14*. Grafy se liší od těch zaznamenaných pro statické tahové zkoušky. To je dáno povahou rychlého zatěžování zkoušených vzorků a vibracemi způsobenými nárazem zátěžového mechanismu do zkoušeného vzorku.

Pro záznamy provedené laserovým snímačem není odchylka výrazná krom vzorku č. 1 o rozměrech průřezu 10,00x1,01. Zde došlo k odchýlení při záznamu, avšak při porovnání s ostatními dvěma záznamy lze konstatovat, že hodnoty Youngova modulu by si byly podobné. Ostatní hodnoty si odpovídají. Proto můžeme jednoznačně říci, že měření bylo provedeno správně. Z naměřených hodnot lze udělat závěry k porovnání jednotlivých metod záznamu deformací mezi sebou.

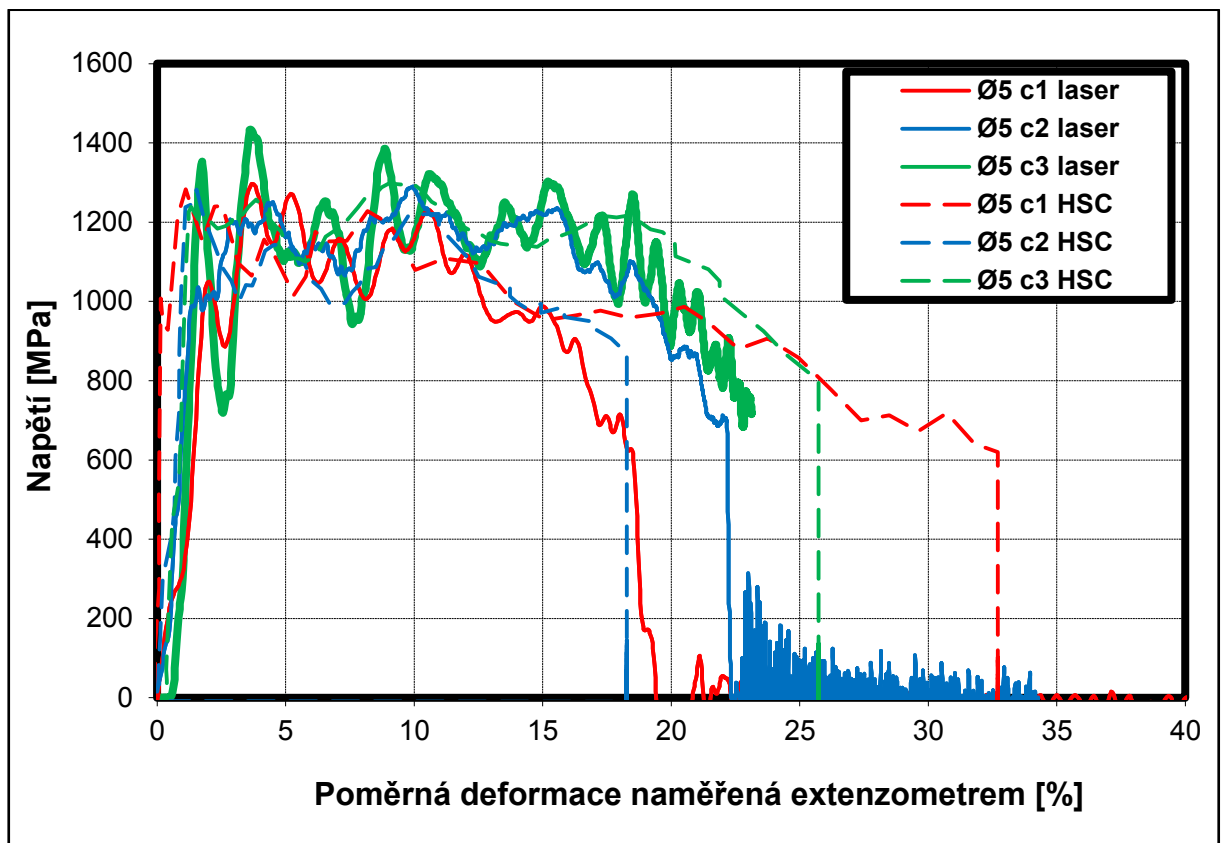
V případě záznamů provedených HSC kamerou dochází k výrazné odchylce křivek i naměřených hodnot oproti záznamům provedeným laserovým snímačem. Ta odchylka byla zřejmě způsobena povahou záznamového zařízení, nebo nedostatečnou zkušeností obsluhy.

Výsledné hodnocení transparentních zkoušek pro jednotlivé typy extenzometrů

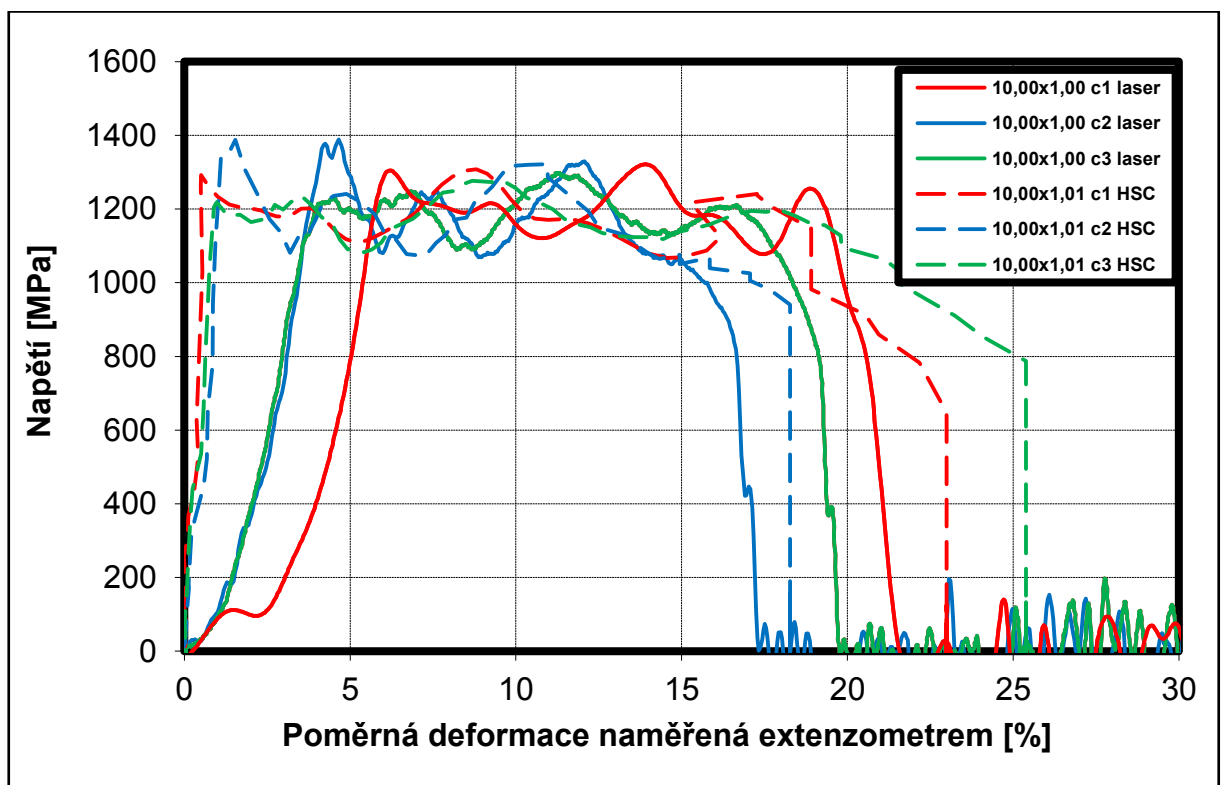
Na *grafu č. 15* lze pozorovat průběhy transparentních zkoušek měřených při 20°C, které byly vybrány z jednotlivých metod záznamů měření deformací. Ze záznamů je patrné, že se jednotlivé metody od sebe příliš neodchylovaly. Výjimkou je pouze záznam pořízený video extenzometrem.

Graf č. 16 znázorňuje výběr z transparentních zkoušek pro jednotlivé záznamy pořízené pomocí extenzometrů určených pro měření deformací u zkoušky tahem při teplotě 800°C. Zkoušky mají veliký odchyl v průběhu jednotlivých křivek.

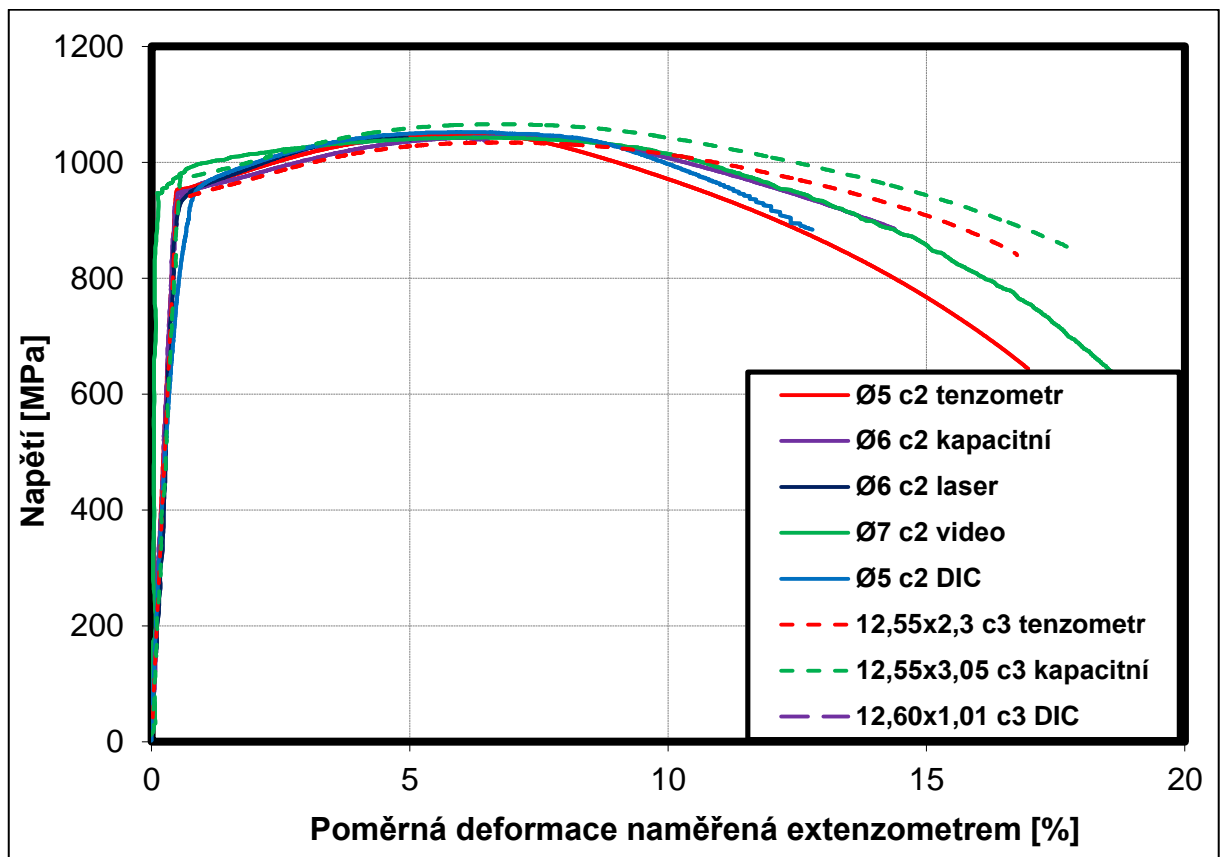
V *tabulce č. 5 a 6* můžeme pozorovat výsledky hodnot pro jednotlivá měření.



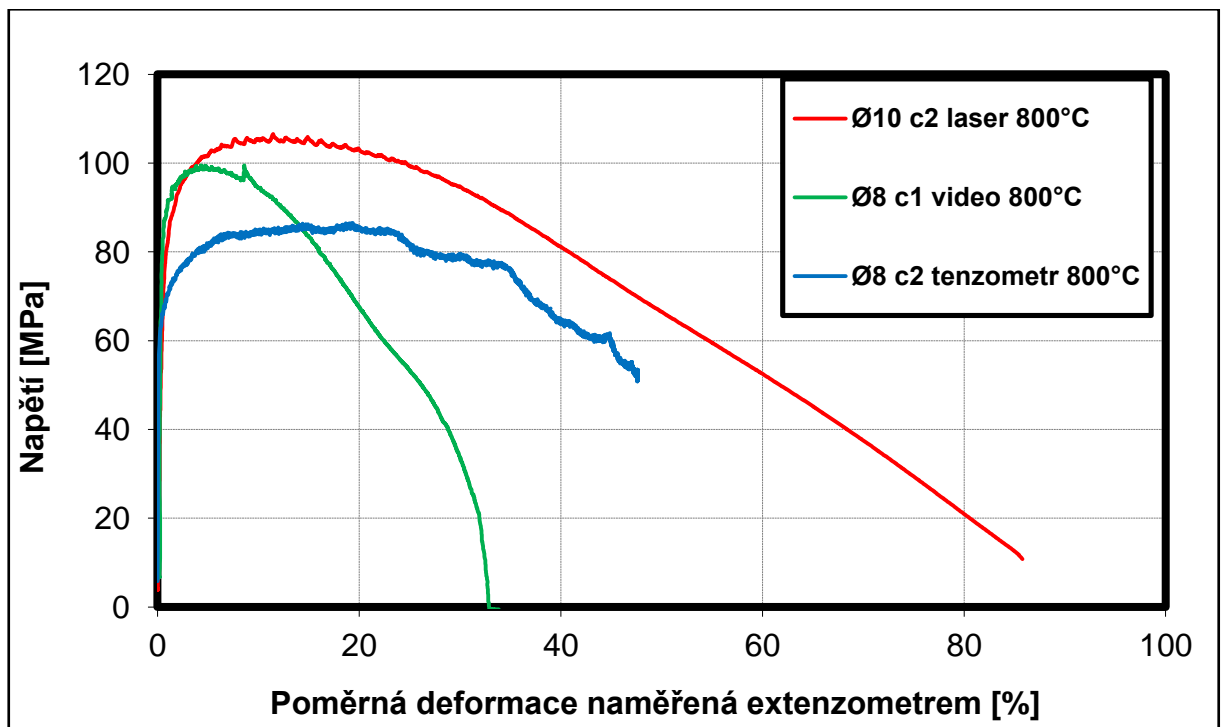
Graf č. 13. Průběh tahové zkoušky zaznamenaný pomocí HSC kamery na zkušební vzorku o \varnothing 5 mm při teplotě 20°C.



Graf č. 14. Průběh tahové zkoušky zaznamenaný pomocí HSC kamery na zkušební vzorku o rozměrech 10,00x1,00 mm při teplotě 20°C.



Graf č. 15. Průběhy reprezentativních tahových zkoušek pro jednotlivé typy mechanických a optických extenzometrů při 20°C.



Graf č. 16. Průběhy reprezentativních tahových zkoušek pro jednotlivé typy mechanických a optických extenzometrů při 800°C.

Tab. 5. Výsledné hodnoty jednotlivých měření

Specimen	Temp.	E	R _{p0,2}	R _m	A _g	A	Z	
	[°C]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]	
Inova	Ø5 c1 tenzometr	20	194,1	956,9	1048,7	5,5	18,2	62,4
	Ø5 c2 tenzometr	20	210,9	955,4	1048,7	5,6	17,8	65,0
	Ø5 c3 tenzometr	20	198,0	944,2	1043,7	5,9	17,8	61,4
	Průměr		201,0	952,2	1047,0	5,7	17,9	62,9
	Ø5 c1 kapacitní	20	230,3	953,5	1048,6	6,0	18,2	62,4
	Ø5 c2 kapacitní	20	225,9	953,4	1048,7	5,6	19,0	65,0
	Ø5 c3 kapacitní	20	200,8	941,7	1043,6	5,7	17,8	61,4
	Průměr		219,0	949,6	1047,0	5,8	18,3	62,9
	Ø6 c1 tenzometr	20	205,5	959,6	1054,0	5,9	18,0	64,1
	Ø6 c2 tenzometr	20	206,0	949,8	1047,6	6,1	17,3	63,5
	Ø6 c3 tenzometr	20	181,2	998,5	1049,9	4,9	19,3	62,7
	Průměr		197,6	969,3	1050,5	5,7	18,2	63,4
	Ø6 c1 kapacitní	20	198,0	960,1	1054,0	6,2	16,7	64,1
	Ø6 c2 kapacitní	20	205,8	948,8	1044,1	6,4	17,3	63,6
	Ø6 c3 kapacitní	20	165,2	1001,0	1049,3	4,9	19,3	62,7
	Průměr		189,6	970,0	1049,1	5,8	17,8	63,4
	12,55x2,3 c1 tenzometr	20	164,3	980,8	1030,4	4,9	16,7	26,8
	12,55x2,3 c2 tenzometr	20	179,5	942,3	1004,3	3,1	16,7	26,8
	12,55x2,3 c3 tenzometr	20	194,1	947,1	1034,4	6,3	19,5	28,6
	Průměr		179,3	956,7	1023,0	4,8	17,6	27,4
	12,55x2,3 c1 kapacitní	20	175,6	978,1	1030,2	4,9	16,7	26,8
	12,55x2,3 c2 kapacitní	20	162,7	657,2	718,9	3,2	16,7	26,8
	12,55x2,3 c3 kapacitní	20	170,8	948,1	1034,1	6,2	19,5	28,6
	Průměr		169,7	861,2	927,7	4,8	17,6	27,4
12,55x3,05 c1 tenzometr	20	203,1	948,4	1050,9	6,3	17,7	37,6	
12,55x3,05 c2 tenzometr	20	208,0	954,6	1047,6	6,0	15,9	33,3	
12,55x3,05 c3 tenzometr	20	206,6	952,5	1047,5	6,0	15,9	32,7	
Průměr		205,9	951,8	1048,7	6,1	16,5	34,5	
12,55x3,05 c1 kapacitní	20	168,6	959,5	1050,7	6,2	17,4	37,6	
12,55x3,05 c2 kapacitní	20	177,0	952,5	1047,6	6,2	15,9	32,7	
12,55x3,05 c3 kapacitní	20	177,4	977,7	1065,7	6,1	15,3	35,4	
Průměr		174,4	963,3	1054,7	6,2	16,2	35,2	
Zwick/Roell	Ø5 c1 laser	20	172,8	1031,8	1046,1	4,6	16,3	62,9
	Ø5 c2 laser	20	188,0	1122,6	1043,4	4,1	19,8	56,7
	Ø5 c3 laser	20	175,8	1049,7	1050,3	3,4	15,3	61,8
	Průměr		178,9	1068,0	1046,6	4,0	17,2	60,5
	Ø7 c1 video	20	7016,5	1052,5	1047,8	6,0	17,0	62,9
	Ø7 c2 video	20	1136,8	932,2	1042,8	6,4	18,6	62,9
	Ø7 c3 video	20	3775,0	641,8	1048,1	6,3	14,5	54,4
	Průměr		3976,1	875,5	1046,2	6,3	16,7	60,0

Tab. 6. Výsledné hodnoty jednotlivých měření

	Specimen	Temp.	E	Rp _{0,2}	Rm	Ag	A	Z
		[°C]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]
Inova	10,75x3,49 c1 video	20	1441,0	792,6	939,7	22,1	14,5	35,8
	10,75x3,49 c2 video	20	772,6	656,7	958,2	18,3	14,5	35,5
	10,75x3,49 c3 video	20	1503,0	601,2	928,8	23,4	14,5	35,7
	Průměr		1238,9	683,5	942,2	21,3	14,5	35,7
	Ø5 c1 DIC	20	158,3	954,6	1059,6	7,8	19,7	59,6
	Ø5 c2 DIC	20	161,1	934,3	1052,1	5,3	19,8	64,6
	Ø5 c3 DIC	20	155,0	934,9	1046,9	5,4	19,7	62,1
	Průměr		158,1	941,3	1052,9	6,2	19,7	62,1
	12,60x1,01 c1 DIC	20	165,7	964,3	1051,7	5,4	24,0	26,5
	12,60x1,01 c2 DIC	20	185,8	958,6	1052,3	4,8	20,0	16,7
	12,60x1,01 c3 DIC	20	202,7	950,4	1043,5	5,0	20,0	23,0
	Průměr		184,7	957,8	1049,2	5,1	21,3	22,1
	Ø8 c1 tenzometr 800°C	800	57,5	63,3	83,1	8,1	112,5	91,7
	Ø8 c2 tenzometr 800°C	800	64,2	62,7	86,5	19,2	93,8	94,9
	Ø8 c3 tenzometr 800°C	800	65,8	63,9	86,2	8,4	95,0	96,0
Průměr		62,5	63,3	85,2	11,9	100,4	94,2	
Zwick/Roell	Ø8 c1 video 800°C	800	18,6	86,7	99,5	3,8	35,5	92,3
	Ø8 c2 video 800°C	800	36,5	80,6	127,3	18,2	36,4	93,4
	Ø8 c3 video 800°C	800	85,8	85,8	98,4	26,5	36,2	90,8
	Průměr		46,9	84,4	108,4	16,1	36,0	92,2
	Ø10 c1 laser 800°C	800	30,2	63,2	111,9	17,7	25,1	95,9
	Ø10 c2 laser 800°C	800	17,4	72,9	106,5	10,8	25,6	95,7
	Ø10 c3 laser 800°C	800	17,8	77,0	100,1	10,0	26,3	95,9
	Průměr		21,8	71,0	106,2	12,8	25,7	95,9
Padestroj	Ø5 c1 laser	20	51,6	711,9	1296,8	1,2	14,0	64,0
	Ø5 c2 laser	20	82,9	1144,4	1290,6	8,4	14,0	64,0
	Ø5 c3 laser	20	111,0	1220,9	1433,7	2,3	14,1	65,4
	Průměr		81,8	1025,7	1340,4	4,0	14,1	64,5
	10,00x1,00 c1 laser	20	21,0	1125,2	1321,3	7,6	14,9	18,1
	10,00x1,00 c2 laser	20	32,7	1109,4	1388,3	0,4	11,7	18,2
	10,00x1,00 c3 laser	20	28,1	1115,7	1298,3	7,6	10,1	24,4
	Průměr		27,3	1116,8	1336,0	5,2	12,2	20,2
	Ø5 c1 HSC	20	124,4	1269,1	1282,9	0,1	14,0	65,5
	Ø5 c2 HSC	20	68,5	856,7	1282,6	-0,3	14,1	65,4
	Ø5 c3 HSC	20	103,6	922,2	1298,1	7,8	1,3	44,4
	Průměr		98,9	1016,0	1287,9	2,5	9,8	58,4
	10,00x1,01 c1 HSC	20	189,6	1251,4	1308,0	8,1	11,7	18,9
	10,00x1,01 c2 HSC	20	119,9	1354,9	1387,9	0,4	11,7	18,2
	10,00x1,01 c2 HSC	20	119,9	1354,9	1387,9	0,4	11,7	18,2
Průměr		143,1	1320,4	1361,3	3,0	11,7	18,4	

4 Diskuze výsledků

Pro experimentální hodnocení mechanických a optických metod pro záznam deformací u zkoušky tahem byl vybrán materiál 16 343. Jedná se o středně legovanou ušlechtilou ocel. Z polotovaru byla vyrobena sada zkušebních tyčí s kruhovým průřezem a plochých zkušebních vzorků. Hodnoty rozměrů jednotlivých zkušebních sad jsou uvedeny v *tabulce č. 4*. V *příloze č. 2 a 3* jsou uvedeny přesné průřezy jednotlivých zkušebních vzorků a v *příloze č. 1* jsou délkové rozměry jednotlivých zkušebních těles.

Návrh experimentu vycházel z použitých druhů zařízení a rozměrů testovaných vzorků. K testování byly použity dva univerzální stroje pro zkoušku tahem. Konkrétně se jednalo o stroje Inova a Zwick/Roell. Mezní zatěžovací hodnota pro tyto stroje je 250 KN.

Pro záznam deformací byly použity mechanické a optické extenzometry. Hlavní rozdíl mezi nimi je v nutnosti upevnění extenzometrů na zkušební těleso testovaných vzorků. Mechanické extenzometry je nutno připevňovat přímo na zkoušený vzorek. K tomuto účelu se použil tenzometrický a kapacitní extenzometr. Z optických metod byla použita videokamera, laserový snímač a DIC (digitální obrazové korelace).

Z použitých metod záznamu deformací byla vybrána vhodná kombinace připojení těchto extenzometrů k univerzálním zkušebním strojům. Daná kombinace je uvedena v *tabulce č. 4*. Následně byla provedena jednotlivá měření za pokojové teploty a při teplotě 800°C. Ze záznamů byly následně vybrány transparentní křivky, které posloužily k závěrečnému hodnocení jednotlivých metod.

První měření bylo provedeno pomocí kapacitního a tenzometrického extenzometru za pokojové teploty. Na tyto dvě metody byly použity vzorky kruhového průřezu o $\varnothing 5$ a $\varnothing 6$ mm a ploché zkušební vzorky o rozměrech 12,55x2,30 a 12,55x3,05 mm. Při měření byla využita možnost připevnění obou extenzometrů na jeden zkušební vzorek. Tím se počet naměřených dat touto metodou zdvojnásobil. Obě metody bylo možno porovnat mezi jednotlivými sadami zkušebních vzorků, mezi jednotlivými vzorky a také na jednom vzorku. Výsledky jednotlivých zkoušek znázorňují *grafy č. 1-4*. Z těchto záznamů je patrné, že většina zkoušek kopíruje jednu křivku.

K odchýlení došlo pouze ve třech případech. U $\varnothing 6$ mm se jednalo o vzorek č. 3. U plochých vzorků o rozměrech 12,55x3,05 se jednalo taktéž o vzorek č. 3. Přesné hodnoty lze pozorovat v *příloze č. 2*. Tato odchylka byla zřejmě způsobena špatným postupem při výrobě zkušebních těles. Nejpravděpodobněji nastala při dělení materiálu pásovou pilou, popř. špatným proválcováním při výrobě. To by způsobilo nehomogenitu materiálu. Nárůst hodnot nebyl natolik výrazný, aby ovlivnil výsledná vyhodnocení. Naměřené hodnoty jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v *tabulce 5 a 6*.

Laserový snímač byl použit v kombinaci se strojem Zwick/Roell. Měření za pokojové teploty se provedlo na kulatých zkušebních vzorkách o $\varnothing 5$ mm. Všechny tři zkoušky byly provedeny správně, a proto bylo možné vybrat transparentní zkoušku pro výsledné porovnání. Výsledky je možné si prohlédnout v *grafu č. 5 a tabulce č. 5*.

V případě video-extenzometru byly použity zkušební tyče kruhového průřezu o $\varnothing 7$ mm a ploché zkušební vzorky o rozměrech průřezu 10,75x3,49, pro měření deformací za pokojové teploty. Měření pro kulaté zkušební vzorky se neodchylovalo od předešlých měření, viz *graf č. 6 a tabulka č. 5*. Hodnoty si odpovídaly a křivky se téměř totožně překrývaly. Problém nastal v případě plochých zkušebních vzorků, viz *graf č. 7 a tabulka č. 7*. Výrazná odchylka nastala i v porovnání s ostatními metodami měření. Dle průběhů křivek a výsledných hodnot je patrné, že došlo při výrobě k záměně materiálu. Z tohoto důvodu bylo nutné hodnoty těchto plochých zkušebních vzorků vyřadit z celkového hodnocení.

Pro digitální obrazovou korelaci, která byla použita pro hodnocení deformací při zkoušce tahem za pokojové teploty, se využily zkušební tyče o $\varnothing 5$ mm a ploché zkušební vzorky o rozměrech 12,60x1,01 mm. Vzorky bylo nutno před provedením vlastních zkoušek nastříkat nejprve bílou barvou a následně poprášit černou grafitovou suspenzí. To bylo nezbytné k vytvoření obrazového reliéfu potřebného pro zkoumání deformací. Problém nastal při testování. Bílá základová barva nebyla příliš kvalitní, a tak v průběhu deformací docházelo k jejímu odlupování. To zapříčinilo nemožnost vyhodnocení příčných deformací. Na vyhodnocení podélných deformací toto nemělo výrazný vliv.

Malá odchylka křivky je pozorovatelná na kulatém zkušebním vzorku o $\varnothing 5$ mm, viz *graf č. 8*. Výsledné hodnoty se neliší natolik, aby ovlivnily výsledky měření, a tudíž bylo možno vybrat transparentní křivku. Záznam průběhu plochých vzorků při zatěžování byl kvalitnější, což dokazují téměř totožné křivky v *grafu č. 9*.

Pro měření deformací při 800°C byl jako první využit tenzometrický extenzometr. Měření probíhalo v teplotní komoře, kdy tenzometr musel být přichycen ke zkoumanému vzorku pomocí keramických táhel a provázku ze skelné vaty. Samotné tělo tenzometru bylo vyvedeno mimo komoru. Záznamy jednotlivých zkoušek lze pozorovat na *grafu č. 10*. Z jednotlivých záznamů je patrné, že nedocházelo k výrazné odchylce zkoušek, což potvrzují i hodnoty z *tabulky č. 6*. Měření bylo provedeno správně. Pro následná porovnání bylo jednoduché vybrat transparentní zkoušku.

Dalším použitým typem záznamového zařízení pro měření deformací při 800°C byl video-extenzometr. Zkušební vzorky byly kruhového průřezu o $\varnothing 8$ mm. Před provedením měření bylo nutné navařit termočlánek, který měřil teplotu vzorku při indukčním ohřevu. Navařená část se obmotala provázkem ze skelné vaty, aby se minimalizovalo upadnutí termočlátku v průběhu zkoušky. Tento systém nebyl ideální. Při manipulaci se vzorkem docházelo k opětovnému ulomení termočlátku. Tento stav nastal také několikrát během provádění zkoušek, které se z tohoto důvodu musely opakovat. Pro příští měření by bylo vhodné navrhnout jinou variantu připevnění termočlátku ke zkušebnímu vzorku než jen jeho přivaření.

Při vytváření zkušebních vzorků bylo nutno brát ohled na těleso indukčního ohřevu. Bylo nutné zvolit tělíska zkušebních tyčí větších délek, což přináší problém nehomogenity prohřátí. Na tělíska se nemohly nakreslit značky, jako tomu bylo v případě testování video extenzometrem za pokojové teploty. Bylo nutno připojit keramické tyčky, které byly vyvedeny mimo tělísko, aby mohly být jejich konce pozorovatelné video-extenzometrem. Tyčky se připevňovaly pouze drátkem, viz *obr. 44*. Dle mého názoru toto není nejlepší varianta a zřejmě tento způsob uchycení a měření keramických tyček připevněných na tělísku zkušebního vzorku může ovlivnit měření.

Z vyhodnocených záznamů zkoušek je patrné, že u vzorku č. 3 došlo k upadnutí termočlátku. To zapříčinilo rozkmitání hodnot, viz *graf č. 11*. Tato zkouška je přiložena z důvodu znázornění, jaký stav nastane při upadnutí termočlátku v průběhu měření. Zkouška byla následně opakována a hodnoty odpovídaly předchozím dvěma naměřeným záznamům. Ze všech tří zkoušek byla vybrána pro výsledné porovnání zkouška č. 2.

Laserový snímač byl posledním typem záznamového zařízení pro pozorování deformací u zkoušky tahem, který byl využit za teploty 800°C. Jako forma ohřevu posloužil indukční ohříváč. Problémem u tohoto měření byly rozměry zkušebních těles. Vzorky nebyly dostatečně dlouhé, aby bylo možné kamery zaostřit mimo spirálovité těleso indukčního ohřevu, viz *obr. 36*. Bylo nutné pozorované body zkoumat mezi prostory vinutí spirály. Muselo se velmi dbát na to, aby se spirála indukčního zařízení nedotýkala vzorku nebo vyvedeného termočlátku. Ten zde byl připevněn stejným způsobem jako v předchozím případě. Pokud by došlo k posunu spirály, laserový snímač by ztratil pozorované body a měření by bylo znehodnoceno.

Indukční ohřev není ideální variantou pro dodání tepla zkoušenému vzorku. Na *grafu č. 12* lze pozorovat průběhy jednotlivých zkoušek zaznamenaných na zkušebních tělesech o $\varnothing 10$ mm. Ze záznamů je patrné, že dochází k určitému rozptylu. Tento rozptyl není způsoben špatným nastavením záznamového zařízení, ale nedokonalostí homogenního prohřátí indukčním ohřevem. Výsledné hodnoty lze pozorovat v *tabulce č. 6*.

Po rozboru jednotlivých zkoušek byly transparentní záznamy daných metod měření proloženy, viz *graf č. 15*. Lze jednoznačně konstatovat, že jednotlivé metody měření deformací u zkoušky tahem se od sebe téměř nelišily. Výjimkou je záznam provedený na plochém zkušebním vzorku o rozměrech průřezu 12,55x3,05 mm. U tohoto záznamu došlo k malému nárůstu hodnot. To může být způsobeno špatným proměřením jeho rozměrových parametrů před zkouškou. Rozměry tloušťky i šířky vzorku se po délce tělesa měnily, a proto nebylo snadné určit jejich přesné hodnoty. Nárůst hodnot není natolik výrazný, aby to v praxi ovlivnilo vyhodnocené výsledky.

Částečně se taktéž odlišoval vzorek o $\varnothing 5$ mm, jehož záznam deformací byl proveden pomocí DIC. Lišil se u něj odklon křivky do meze kluzu. Odklon nebyl natolik výrazný, aby to ovlivnilo konečné vyhodnocení naměřených hodnot. Youngův modul závislý na tomto odklonu se shodoval s hodnotami vyhodnocenými v ostatních měřeních, a proto lze říci, že ani tato metoda se neliší ve výsledcích od ostatních.

Výrazná neshoda nastala u porovnání průběhu tahové zkoušky zaznamenané pomocí video-extenzometru na vzorku č. 2 o $\varnothing 7$ mm. Do meze kluzu nebyl video-extenzometr schopen zaznamenávat téměř žádné deformace. Jediné co se z naměřených hodnot shodovalo s ostatními metodami, byla mez pevnosti, která nezávisí na volbě použitého extenzometru. Pro kontrolu bylo provedeno porovnání i u ostatních záznamů zkoušek zaznamenaných touto metodou a výsledky byly obdobné. Z tohoto důvodu není vhodné používat metodu k vyhodnocování v praxi. Její aplikaci bych spíše uvažoval jako okrajovou.

Při porovnání zkoušek testovaných za tepla bylo využito proložení jednotlivých transparentních záznamů z extenzometru, videa a laserového snímače a DIC, viz *graf č. 16*. Ze záznamů je patrné, že jednotlivé metody se výrazně lišily. Vzhledem k předchozímu porovnávání jednotlivých zkoušek mezi sebou u daných metod, byla použita jako etalon

zkouška zaznamenaná v tepelné komoře pomocí tenzometrického snímače. U této metody se průběhy jednotlivých záznamů téměř shodovaly.

Průběhy grafů tahových zkoušek a výsledné hodnoty byly rozdílné. Tyto výsledky nebyly zkeslené špatným nastavením záznamových zařízení, ale použitím daného ohřívacího zařízení. Termočlánek byl navařen na zkušební tělese. Při pohybu tělesa by mohlo dojít k posuvu termočláneku mimo indukční spirálu. Tím by se ovlivnila zpětná vazba kontroly teploty, což by vedlo k nárůstu teploty. Tento případ nenastal. Projevil by se poklesem pevnostních charakteristik. Z grafu č. 16 vyplývá, že pevnostní charakteristiky naopak rostly.

Příčina tohoto jevu bude zřejmě způsobena nedokonalostí prohřátí zkoušeného vzorku. Ačkoliv termočlánek mohl ukazovat teplotu na povrchu 800°C, teplota uvnitř zkoušeného vzorku mohla být nižší. To by způsobilo nárůst charakteristik, který můžeme pozorovat. Ovšem dle zákona vedení by měla teplota z povrchu vedením prohřát postupně i jádro vzorku. Vzorky se nechávaly na dané teplotě cca 5 minut, což by měla být dostatečná doba k vyrovnání teplot.

Lze tedy předpokládat, že nárůst těchto teplot může souviset i s jiným parametrem. Nejpravděpodobněji se jeví možnost, že se ferit nestihl přeměnit na austenit. Pro další zkoumání by bylo zapotřebí navrhnout experiment, který by se zabýval vlivem délky času prodlevy výdrže na dané teplotě a jejím následným vlivem na pevnostní charakteristiky testované u zkoušky tahem.

Z výsledných měření lze konstatovat, že při testování materiálů u zkoušky tahem nedochází k rozdílným naměřeným hodnot pro jednotlivé metody záznamu deformací, vyjma jednoho. Metodou, která se odchyľuje od ostatních, je záznam pořízený video-extenzometrem. Do meze kluzu tento záznam nevykazuje téměř žádné deformace, a proto není možné hodnotit hodnoty nacházející se pod mezí kluzu.

U zkoušek provedených za teploty 800°C lze jednoznačně říci, že jediná metoda použitelná pro kvalitativní měření je tenzometrický snímač v kombinaci s tepelnou komorou. U laserového snímače a video extenzometru je omezená schopnost měřit v teplotní komoře. To není způsobeno povahou snímačů, ale navržením experimentu s indukčním ohřevem. Lze tedy konstatovat, že by bylo zapotřebí v budoucnu navrhnout experiment, jenž by byl zaměřen pouze na snímání laserovým snímačem např. v kombinaci s tepelnou komorou.

Dynamické zkoušky jsou specifickým druhem zkoušek a jejich průběh je jiný než u zkoušek statických. V průběhu deformace způsobené nárazem závaží dochází postupně ve velmi krátkém čase (v řádu ms) k porušení zkoušeného vzorku. Vzorkem se po nárazu šíří vibrace, které mohou ovlivnit měření. Vliv vibrací na průběh zkoušky lze vidět na grafu č. 13 a 14.

Na grafu č. 13 se nachází vyhodnocení dynamických tahových zkoušek pro vzorky o Ø 5 mm. Záznamy deformací byly pořízeny pomocí laserového snímače a HSC snímače. Zaznamenaná data byla vyhodnocena a jejich konkrétní hodnoty jsou v tabulce č. 6. Z grafu je patrné, že u HSC kamery dochází k výrazným rozdílným naměřeným hodnot oproti hodnotám zaznamenaným laserovým snímačem.

Video-extenzometr se neosvědčil ani u tohoto druhu testování. U vzorku č. 1 jsou hodnoty Youngova modulu naprosto rozdílné od ostatních záznamů měření. U vzorku č. 2 a 3 odklon

křivky kopíruje ostatní zkoušky zaznamenané pomocí laserového snímače. Hodnota poměrné deformace se taktéž liší.

Pro testování plochých zkušebních vzorků je situace poněkud jiná, viz *graf č. 14*. Zaznamenané hodnoty, např. mez kluzu a mez pevnosti, si pro jednotlivá měření odpovídají. U vzorku č. 1 lze sledovat, že v průběhu záznamu pomocí laserového snímače došlo na začátku záznamů k ruchům. Ty ovlivnily výsledná měření, a proto je hodnota Youngova modulu odlišná od ostatních dvou hodnot zaznamenaných pomocí laserového snímače.

Záznamy pořízené HSC kamerou se v oblasti Youngova modulu výrazně liší od těch, které byly pořízeny laserovým snímačem. Nastal podobný případ jako u statických zkoušek tahem. I u těchto zkoušek se video-extenzometr neosvědčil a hodnoty poměrného prodloužení a Youngova modulu neodpovídaly předchozím měřením.

Závěrem lze říci, že krom video-extenzometru jsou mechanické i optické snímače porovnatelné v rámci naměřených hodnot. Nesmírnou výhodou optických snímačů je, že nemusí být v kontaktu s měřeným vzorkem. Lze je tedy bez problémů použít např. pro měření tahových zkoušek tenkých plechů, drátů, nebo na velmi malé zkušební vzorky. Jejich univerzálnost je v tomto ohledu ohromná.

U mechanických snímačů je výhodou jejich cena a není potřeba zdlouhavého nastavování parametrů. Úspora času zvyšuje produktivitu, avšak proti tomuto druhu snímačů je jejich nemožnost univerzálního použití. Na různé druhy vzorků je zapotřebí mít snímače rozdílných velikostí a např. na tenké plechy by snímač vzhledem k jeho hmotnosti ani umístit nešel. Při volbě použitého snímače je potřeba se zamyslet, pro jakou aplikaci bude využit.

5 Závěr

V rámci diplomové práce byla řešena problematika záznamu deformací u zkoušky tahem s využitím optických metod měření a jejich následným porovnáním s metodami mechanickými. Zkoušky tahem byly provedeny dle norem ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 6892-2.

Mezi využití metody byly zařazeny z mechanických snímačů tenzometrický snímač a kapacitní snímač. Z optických metod bylo využito měření pomocí laserového snímače, video-extenzometru a digitální obrazové korelace (DIC). Pro vyvození síly byly použity dva univerzální tahové stroje, konkrétně Zwick/Roell a Inova. Tyto stroje byly využity pro statické zkoušky tahem za pokojové teploty a za zvýšených teplot 800°C. Pro zkoušky za zvýšených teplot byla použita jako forma ohřevu tepelná komora a indukční ohřev. Dále byl využit Padostroj pro ověření použitelnosti těchto zařízení u dynamických zkoušek tahem.

Materiálem pro testování byla zvolena ocel 16 343. Jedná se o běžnou ocel, která splňovala parametry našeho testování. Pro testování byla vyrobena sada testovacích vzorků o různých rozměrech. Jednalo se o zkušební tyče kruhového průřezu i o ploché zkušební tyče. Vyrobene zkušební tyče byly řádně označeny a dle vhodnosti rozděleny pro jednotlivá testování.

Testování pro daný extenzometr bylo prováděno vždy na sadě tří zkušebních tyčí stejných rozměrů. Tyče byly proměřeny a následně otestovány. Z otestované sady tří zkušebních tyčí byla vybrána jedna transparentní zkouška, která nabývala průměrných hodnot. Ta sloužila k závěrečnému hodnocení. V tomto hodnocení se porovnávaly jednotlivé metody mezi sebou.

Závěrečné hodnocení je rozděleno na tři základní části. V první části jsme se zabývali zkouškou tahem za pokojové teploty. Ze záznamů je patrné, že jednotlivá měření se nijak výrazně neodchyľují. Všechny metody záznamů deformací jsou srovnatelné, vyjma záznamů pořízených video-extenzometrem. Deformace zaznamenané v průběhu zkoušek se liší od ostatních metod měření. Vlivem nesprávného záznamu deformací provedených tímto snímačem nebylo možné provést vyhodnocení Youngova modulu, což je jistě důležitý parametr, který se zjišťuje u zkoušky tahem.

Při porovnání za zvýšených teplot bylo z výsledků patrné, že jediná použitelná metoda v praxi, je záznam provedený v tepelné komoře pomocí tenzometrického snímače. Ostatní dvě metody (laserový snímač a video-extenzometr) nedosahovaly správných hodnot, které by se daly od těchto měření předpokládat. Tento rozdíl u jednotlivých měření byl dán vlivem nehomogenního ohřevu způsobeného indukčním ohřevem.

U testování dynamických tahových zkoušek byl záznam deformací proveden pomocí laserového snímače a vysokorychlostní kamery (HSC). Z výsledků měření je patrné, že lepších výsledků dosahoval laserový snímač.

Závěrem lze tedy konstatovat, že krom video-extenzometru jsou si všechny snímače v přesnosti záznamu podobné. Rozhodující vliv při jejich využití tedy bude hrát cena a aplikace, na kterou budou využity.

6 Literatura

- [1] The Basics of Testing Plastics, ed. S.B. Drickoll, ASTM Manual Series ML 35, ISBN 0-8031-2079-6; 1998
- [2] SKÁLOVÁ, J, R KOVAŘÍK a V BENEDIKT. ZÁPADOČESKÁ UNIVERSITA V PLZNI. Základní zkoušky kovových materiálů. 3. vyd. Plzeň: Tiskové středisko ZČU, 2003. ISBN 80-7082-623-1.
- [3] VUTBR. *Zkouška tahem*. [online]. 2012 [cit. 2013-03-05].
Dostupné z: ime.fme.vutbr.cz/files/.../nomd/zkouska%20tahem.doc
- [4] PROFESSIONAL TESTING COMPANY LIMITED. *Tensile test* [online]. 2011 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://www.professionaltesting.co.th/web_page/tensile-test
- [5] Norma ČSN 42 0315 (420315). *Zkoušení kovů. Zkušební tyče válcové s hladkými válcovými hlavami pro zkoušku tahem*. [online]. 2012 [cit. 2013-03-05].
Dostupné z: <http://shop.normy.biz/detail/3596>
- [6] DOCER. *Electronic Tensile Testing Machines* [online]. 2012 [cit. 2013-03-05].
Dostupné z: <http://www.docer.com.cn/en/plist.asp?id=2>
- [7] ATEAM. *Mechanické vlastnosti* [online]. [cit. 2013-03-05].
Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf
- [8] *Kapacitní senzory: Obecné vlastnosti* [online]. [cit. 2013-03-05].
Dostupné z: http://147.229.68.118/~adamek/uceb/DATA/s_4_1.htm
- [9] DICONT. *Kapacitní snímač polohy CPT 1A: Návod na montáž, obsluhu a údržbu* [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.dicont.cz/soubory/190355033762821.pdf>
- [10] PANELOVÁ MĚŘIDLA. *Kapacitní snímač CBN5-F46-E2* [online]. 2013 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.panelovameridla.cz/panelovameridla/eshop/40-1-KAPACITNI-SNIMACE/100-3-Kvadrove-snimace/5/354-Kapacitni-snimac-CBN5-F46-E2>
- [11] WIKIPEDIA. *Schéma meandru extenzometr*. [online]. 2012 [cit. 2013-05-03].
Dostupné z : http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor:Strain_gauge.svg&page=1
- [12] MTS. *Immersible Extensometer* [online]. 1995 [cit. 2013-05-03].
Dostupné z: http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev_004706.pdf
- [13] MTS. *Advantage High Elongation Extensometer* [online]. 2012 [cit. 2013-05-03].
Dostupné z: http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/mts_006403.pdf
- [14] VPG. *Stress, Strain and Strain Gages*. [online]. 2013 [cit. 2013-03-05].
Dostupné z: http://www.vishay.com/brands/measurements_group/guide/index.htm

- [15] INSTRON. *Non-contacting Video Extensometers* [online]. 2012 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://www.instron.com/wa/acc_catalog/prod_list.aspx?cid=452&cname=Non-contacting%20Video%20Extensometers
- [16] INSTRON. *Non-contacting Video Extensometers* [online]. 2012 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://www.instron.com/wa/acc_catalog/prod_list.aspx?cid=452&cname=Non-contacting%20Video%20Extensometers2
- [17] ODBORNE ČASOPISY. *HSC kamery* [online]. 2012 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32518
- [18] EMERALD. *Machine vision developments at IPOT 2005* [online]. 2012 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1509423&show=>
- [19] ALLIEDVISIONTEC. *Video extenzometr* [online]. 2012 [cit. 2013-03-07]. <http://www.alliedvisiontec.com/uploads/media/AVT-Guppy-PROhand.jpg>
- [20] KUBELA, Petr. *Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery*. Brno, 2009. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16031. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Aleš Polzer.
- [21] ZWICK/ROELL. *LightXtens Extensometer* [online]. 2012 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://www.zwick.de/de/produkte/extensometer/beruehrungslose-extensometer/lightxtensr.html>
- [22] ZWICK/ROELL. *Extensometer LaserXtens Compact* [online]. 2012 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://www.zwick.de/de/produkte/extensometer/beruehrungslose-extensometer/laserxtensr-compact.html>
- [23] DANTEC DYNAMICS. *Measurement Principles - Digital Image Correlation (DIC)* [online]. 2008 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1030>
- [24] WEBMAG VJ. *Caméra Phantom* [online]. 2010 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://blog.lecollagiste.com/article-35492240.html>

7 Přílohy

PŘÍLOHA č. 1.

Tabulka deformačních rychlostí dle rozměrů vzorků

								součinitel proporcionality				
								5,65	4,52	3,39	2,26	1,13
								tažnost	tažnost	tažnost	tažnost	tažnost
								A ₅	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁
Série	Ø D mm	L _c mm	rychlost mm/min	deformační rychlost 1/s	F _{max} kN	plocha mm ²	L ₀ mm	L ₀ mm	L ₀ mm	L ₀ mm	L ₀ mm	
1	16	96	8,6	0,0015	211,1	201,06	80	64	48	32	16	
2	10	60	5,4	0,0015	82,5	78,54	50	40	30	20	10	
3	8	60	5,4	0,0015	52,8	50,27	40	32	24	16	8	
4	7	50	4,5	0,0015	40,4	38,48	35	28	21	14	7	
5	6	42	3,8	0,0015	29,7	28,27	30	24	18	12	6	
6	5	30	2,7	0,0015	20,6	19,63	25	20	15	10	5	
7	4	22	2,0	0,0015	13,2	12,57	20	16	12	8	4	
8	3	19	1,7	0,0015	7,4	7,07	15	12	9	6	3	
9	2	9,5	0,86	0,0015	3,3	3,14	10	8	6	4	2	
10	1,5	9	0,81	0,0015	1,9	1,77	8	6	5	3	2	
11	1	2	0,18	0,0015	0,8	0,79	5	4	3	2	1	
	š mm	t mm				plocha mm ²						
12	24,56	8,19			0,0015	211,1	201,06	80	64	48	32	16
13	15,35	5,12	62	5,6	0,0015	82,5	78,54	50	40	30	20	10
14	12,28	4,09	62	5,6	0,0015	52,8	50,27	40	32	24	16	8
15	10,74	3,58	60	5,4	0,0015	40,4	38,48	35	28	21	14	7
16	9,21	3,07	62	5,6	0,0015	29,7	28,27	30	24	18	12	6
17	7,67	2,56	27	2,4	0,0015	20,6	19,63	25	20	15	10	5
18	6,14	2,05	27	2,4	0,0015	13,2	12,57	20	16	12	8	4
19	4,60	1,53				7,4	7,07	15	12	9	6	3
20	3,07	1,02				3,3	3,14	10	8	6	4	2
21	2,30	0,77				1,9	1,77	8	6	5	3	2
22	1,53	0,51				0,8	0,79	5	4	3	2	1
23	12,50	3,08				40,4	38,48	35	28	21	14	7
24	12,50	2,26				29,7	28,27	30	24	18	12	6
25	12,50	1,57				20,6	19,63	25	20	15	10	5
26	12,50	1,01				13,2	12,57	20	16	12	8	4
27	12,50	0,57				7,4	7,07	15	12	9	6	3
28	12,50	0,25				3,3	3,14	10	8	6	4	2

PŘÍLOHA č. 2

Tabulka rozměrů a tažností testovaných vzorků kruhového průřezu

Záznamové zařízení	Vzorek	D ₀ mm	D _u mm	L ₀ mm	L ₀ A1 mm	L ₀ A2 mm	L ₀ A3 mm	L ₀ A4 mm	L ₀ A5 mm	L _u A1 %	L _u A2 %	L _u A3 %	L _u A4 %	L _u A5 %
Videoextens	Ø7 vzorek č. 1	7,2	4,26	34,82	11,13	18,27	26,15	33,82	40,89	54,58%	26,88%	21,06%	17,43%	13,58%
Videoextens	Ø7 vzorek č. 2	6,99	4,27	35,1	10,63	18,11	26,58	34,32	41,28	52,07%	29,54%	26,75%	22,75%	18,11%
Videoextens	Ø7 vzorek č. 3	6,99	4,75	35,32	11,36	18,75	26,31	33,34	40,71	62,52%	34,12%	25,46%	19,24%	16,48%
Tenzometr	Ø6 vzorek č. 1	5,99	3,58	30	9,76	16,25	22,61	29,15	35,37	62,94%	35,64%	25,82%	21,66%	18,10%
Tenzometr	Ø6 vzorek č. 2	5,99	3,62	30	9,25	15,72	22,61	28,89	35,22	54,42%	31,22%	25,82%	20,58%	17,60%
Tenzometr	Ø6 vzorek č. 3	5,99	3,66	30	8,68	15,95	22,35	29,06	35,55	44,91%	33,14%	24,37%	21,29%	18,70%
Kapacitní	Ø6 vzorek č. 1	5,99	3,58	30	9,76	16,25	22,61	29,15	35,37	62,94%	35,64%	25,82%	21,66%	18,10%
Kapacitní	Ø6 vzorek č. 2	5,99	3,62	30	9,25	15,72	22,61	28,89	35,22	54,42%	31,22%	25,82%	20,58%	17,60%
Kapacitní	Ø6 vzorek č. 3	5,99	3,66	30	8,68	15,95	22,35	29,06	35,55	44,91%	33,14%	24,37%	21,29%	18,70%
Tenzometr	Ø5 vzorek č. 1	5,02	3,08	25	7,36	13,22	18,72	24,3	29,3	46,61%	31,67%	24,30%	21,02%	16,73%
Tenzometr	Ø5 vzorek č. 2	5,02	2,98	25	7,87	13,53	18,8	24,56	29,79	56,77%	34,76%	24,83%	22,31%	18,69%
Tenzometr	Ø5 vzorek č. 3	5,02	3,13	25	7,91	13,13	18,96	24,25	29,4	57,57%	30,78%	25,90%	20,77%	17,13%
Kapacitní	Ø5 vzorek č. 1	5,02	3,08	25	7,36	13,22	18,72	24,3	29,3	46,61%	31,67%	24,30%	21,02%	16,73%
Kapacitní	Ø5 vzorek č. 2	5,02	2,98	25	7,87	13,53	18,8	24,56	29,79	56,77%	34,76%	24,83%	22,31%	18,69%
Kapacitní	Ø5 vzorek č. 3	5,02	3,13	25	7,91	13,13	18,96	24,25	29,4	57,57%	30,78%	25,90%	20,77%	17,13%
Laser	Ø6 vzorek č. 1	6,02	3,68	30	9,45	15,95	23,04	29,13	35,1	56,98%	32,48%	27,57%	20,97%	16,61%
Laser	Ø6 vzorek č. 2	6,02	3,71	30	10,16	15,87	22,55	29,29	34,97	68,77%	31,81%	24,86%	21,64%	16,18%
Laser	Ø6 vzorek č. 3	5,99	3,71	30	9,26	15,75	22,68	29,1	35,1	54,59%	31,47%	26,21%	21,45%	17,20%
DIC - Aramis	Ø5 vzorek č. 1	5,02	3,19	20	6,93	10,77	15,29	18,98	23,91	38,05%	34,63%	27,42%	18,63%	19,07%
DIC - Aramis	Ø5 vzorek č. 2	5,01	2,98	20	7,96	11,42	15,31	19,73	23,95	58,88%	42,75%	27,58%	23,31%	19,51%
DIC - Aramis	Ø5 vzorek č. 3	5,02	3,09	20	7,23	11,12	15,32	19,25	23,93	44,02%	39,00%	27,67%	20,31%	19,17%
Laser 800°C	Ø10 vzorek č. 1	9,98	2,01	40					62,56					
Laser 800°C	Ø10 vzorek č. 2	10,01	2,08	40					62,78					
Laser 800°C	Ø10 vzorek č. 3	10,01	2,02	40					63,15					
Videoextens 800 °C	Ø8 vzorek č. 1	8,02	2,22	40/50					54,20/64,88					
Videoextens 800 °C	Ø8 vzorek č. 2	8,01	2,06	40/50					54,57/64,66					
Videoextens 800 °C	Ø8 vzorek č. 3	7,99	2,43	40/50					54,48/65,13					
Tenzometr 800 °C	Ø6 vzorek č. 1	7,99	2,3	40					84,98					
Tenzometr 800 °C	Ø6 vzorek č. 2	7,94	1,8	40					77,52					
Tenzometr 800 °C	Ø6 vzorek č. 3	7,96	1,6	40					78,01					
Videoextens (padostroj)	Ø5 vzorek č. 1	4,99	2,93	25	6,57	12,72	18,3	23,04	28,51	31,66%	27,45%	22,24%	15,43%	14,27%
Videoextens (padostroj)	Ø5 vzorek č. 2	4,98	2,93	25	7,03	12,86	17,97	23,2	28,53	41,16%	29,12%	20,28%	16,47%	14,58%
Videoextens (padostroj)	Ø5 vzorek č. 3	5,02	3,75	25	6,94	12,95	18,69	24,15	25,33	38,25%	28,98%	24,10%	20,27%	0,92%

PŘÍLOHA č. 3

Tabulka rozměrů a tažností testovaných plochých vzorků

záznamové zařízení	Vzorek	H ₀	B ₀	L ₀	L ₀₋₅₀	H _u	B _u	L _{u50}	L ₀ A1	L ₀ A2	L ₀ A3	L ₀ A4	L ₀ A5	L _u A1	L _u A2	L _u A3	L _u A4	L _u A5
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	%	%	%	%	%
Videextens	10,75x3,49 vzorek č.1	10,75	3,49	35	50,29	8,08	2,98	57,29	10,89	18,13	25,69	33,41	40,91	55,57%	29,50%	22,33%	19,32%	16,89%
Videextens	10,73x3,50 vzorek č.2	10,73	3,5	35	50,51	8,17	2,96	56,26	10,56	17,89	26,03	33,24	40,13	50,86%	27,79%	23,95%	18,71%	14,66%
Videextens	10,68x3,47 vzorek č.3	10,68	3,47	35	50,59	8,15	2,96	57,09	9,89	19,4	25,87	32,8	40,51	41,29%	38,57%	23,19%	17,14%	15,74%
Tenzometr	12,55x3,05 vzorek č.1	12,55	3,05	35		9,95	2,4		10,18	18,45	26,39	33,63	41,11	45,43%	31,79%	25,67%	20,11%	17,46%
Tenzometr	12,55x3,05 vzorek č.2	12,55	3,05	35		10,1	2,55		9,67	17,85	25,31	33,22	40,59	38,14%	27,50%	20,52%	18,64%	15,97%
Tenzometr	12,55x3,05 vzorek č.3	12,55	3,05	35		10,1	2,45		9,15	18,23	25,49	32,97	40,45	30,71%	30,21%	21,38%	17,75%	15,57%
Kapacitní	12,55x3,05 vzorek č.1	12,55	3,05	35		9,95	2,4		10,18	18,45	26,39	33,63	41,11	45,43%	31,79%	25,67%	20,11%	17,46%
Kapacitní	12,55x3,05 vzorek č.2	12,55	3,05	35		10,1	2,55		9,67	17,85	25,31	33,22	40,59	38,14%	27,50%	20,52%	18,64%	15,97%
Kapacitní	12,55x3,05 vzorek č.3	12,55	3,05	35		10,1	2,45		9,15	18,23	25,49	32,97	40,45	30,71%	30,21%	21,38%	17,75%	15,57%
Tenzometr	12,55x2,30 vzorek č.1	12,55	2,3	30		10,3	2,05		9,34	16,08	22,41	28,87	35,51	55,67%	34,00%	24,50%	20,29%	18,37%
Tenzometr	12,55x2,30 vzorek č.2	12,55	2,3	30														
Tenzometr	12,55x2,30 vzorek č.3	12,55	2,3	30		10,3	2		8,87	15,9	22,07	29,17	35,85	47,83%	32,50%	22,61%	21,54%	19,50%
Kapacitní	12,55x2,30 vzorek č.1	12,55	2,3	30		10,3	2,05		9,34	16,08	22,41	28,87	35,51	55,67%	34,00%	24,50%	20,29%	18,37%
Kapacitní	12,55x2,30 vzorek č.2	12,55	2,3	30														
Kapacitní	12,55x2,30 vzorek č.3	12,55	2,3	30		10,3	2		8,87	15,9	22,07	29,17	35,85	47,83%	32,50%	22,61%	21,54%	19,50%
Laser																		
Laser																		
Laser																		
DIC - Aramis	12,60x1,01 vzorek č.1	12,6	1,01	20		11,42	0,82		5,72	10,76	14,93	19,45	22,96	43,00%	34,50%	24,42%	21,56%	14,80%
DIC - Aramis	12,60x1,01 vzorek č.2	12,6	1,01	20		11,16	0,95		5,85	9,94	14,59	19,46	23,23	46,25%	24,25%	21,58%	21,63%	16,15%
DIC - Aramis	12,60x1,01 vzorek č.3	12,6	1,01	20		11,26	0,87		5,78	10,28	15,02	19,62	23,13	44,50%	28,50%	25,17%	22,63%	15,65%
Laser 800°C																		
Laser 800°C																		
Laser 800°C																		
Videextens 800°C																		
Videextens 800°C																		
Videextens 800°C																		
Tenzometr 800°C																		
Tenzometr 800°C																		
Tenzometr 800°C																		
Videextens (padostroj)	10,00x1,00 vzorek č.1	10,00	1,01	20		8,81	0,93						22,98					14,90%
Videextens (padostroj)	10,00x1,00 vzorek č.2	10,00	1,01	20		9,30	0,88						22,33					11,65%
Videextens (padostroj)	10,00x1,00 vzorek č.3	10,00	1,01	20		8,59	0,92						22,98					14,90%