

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aplikace a porovnání metod kontaktního a bezkontaktního měření
deformace

Autor: **Marek MELZER**

Vedoucí práce: **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Marek MELZER**
Osobní číslo: **S16B0315P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Aplikace a porovnání kontaktního a bezkontaktního měření deformace**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

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

Osnova bakalářské práce:

1. Popis problematiky deformace těles
2. Technologie měření deformace
3. Experimentální program (rozšíření o nový test)
4. Zpracování naměřených dat pro systém ARAMIS
5. Aplikace systému Aramis
6. Diskuze výsledků a porovnání metod kontaktního a bezkontaktního měření deformace
7. Závěr

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Klement, J., Plánička, F., Vlk, M. *Modelová podobnost, elektrická odporová tenzometrie, experimentální určování zbytkových napětí, vyhodnocení experimentálně získaných dat* **Fakulta aplikovaných věd, Plzeň 2004**

Hoffmann, K. *An Introduction to Measurements using Strain Gages* **Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt 1989**

Janoušek, J. *Výzkumné zprávy - Návod na aplikaci bezkontaktního zařízení pro 3D analýzu deformací (systém ARAMIS), Návod na aplikaci tenzometrické ústředny QuantumX (univerzální měřicí zesilovač MX840)* **Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2015**

Janoušek, J., Balda, M. *Strain gage measurements for accurate yield point determination* **Experimentální analýza napětí, 2013**

další nalezené články z portálu <http://www.sciencedirect.com>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jaromír Janoušek**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: **19. září 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Melzer	Jméno Marek	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 – Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVISTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Aplikace a porovnání metod kontaktního a bezkontaktního měření deformace		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	62	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	22
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p style="text-align: center;">ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL</p> <p style="text-align: center;">POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce se zabývá problémem měření deformace zkušebních vzorků. Deformace vzorků byla měřena kombinací kontaktních a bezkontaktních metod měření. Z naměřených dat se vyhodnotily deformace naměřené jednotlivými metodami. Poté se dosažené výsledky z kontaktního a bezkontaktního měření porovnaly mezi sebou.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA</p> <p style="text-align: center;">JEDNOSLOVNÉ POJMY,</p> <p style="text-align: center;">KTERÉ VYSTIHUJÍ</p> <p style="text-align: center;">PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Deformace, kontaktní extenzometr, laserový extenzometr, tenzometrická ústředna, Aramis, zkušební vzorek, statická zkouška tahem, nízko cyklová únava</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Melzer	Name Marek	
FIELD OF STUDY	B2301 - Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	NAME Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF WORK	Aplication and comparison of contact and contactless measuring deformation		

FACULTY	Mechanical engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 And eq. A4)

TOTALLY	62	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	22
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with the problem of measuring the deformation of the test specimen. Deformation of the specimen was measured by a combination of contact and contactless measurement methods. Using the measured data the results of deflection were evaluated for both methods. Then the results achieved with contact and contactless measurements were compared among themselves.
KEY WORDS	Deformation, contact extensometer, laser extensometer, strain gauge, Aramis, test specimen, static tensile test, low fatigue cycle

Tato práce vznikla za finanční podpory projektu SUSEN CZ.1.05/2.1.00/03.0108, který je realizován v rámci Evropského fondu regionálního rozvoje (ERDF).

1	ÚVOD	- 8 -
2	VYUŽÍVANÉ TECHNOLOGIE MĚŘENÍ DEFORMACE	- 9 -
2.1	KONTAKTNÍ MĚŘENÍ	- 9 -
2.1.1	<i>Extenzometry</i>	- 9 -
2.1.2	<i>Tenzometrické měření</i>	- 11 -
2.2	BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ.....	- 20 -
2.2.1	<i>Video extenzometr</i>	- 20 -
2.2.2	<i>Laserový extenzometr</i>	- 21 -
2.2.3	<i>Digitální obrazová korelace</i>	- 22 -
2.2.4	<i>Systém Aramis – popis, zpracování a prezentace dat</i>	- 23 -
3	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	- 27 -
4	EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	- 28 -
4.1	STROJ PRO ZKOUŠKU TAHEM ZWICK.....	- 28 -
4.2	LASEROVÝ EXTENZOMETR LASERXTENS	- 29 -
4.3	STROJ INOVA PRO NÍZKO CYKLOVOU ÚNAVU	- 30 -
4.4	EXTENZOMETR EPSILON 3542	- 30 -
4.5	TENZOMETRICKÁ ÚSTŘEDNA QUANTUMX	- 31 -
4.6	SYSTÉM ARAMIS 4M.....	- 31 -
4.7	APLIKACE SYSTÉMU ARAMIS.....	- 32 -
5	VÝSLEDKY	- 35 -
5.1	ZKOUŠKA TAHEM OCELI P91	- 35 -
5.2	ZKOUŠKA TAHEM OCELI 15.142	- 39 -
5.3	NÍZKOCYKLOVÁ ÚNAVA OCELI T671	- 42 -
5.4	NÍZKOCYKLOVÁ ÚNAVA OCELI T552	- 48 -
5.5	POROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	- 51 -
5.5.1	<i>Zkouška tahem oceli P91</i>	- 51 -
5.5.2	<i>Zkouška tahem oceli 15 142</i>	- 52 -
5.5.3	<i>Nízkocyklová únava oceli T671</i>	- 53 -
5.5.4	<i>Nízkocyklová únava oceli T552</i>	- 55 -
6	DISKUZE VÝSLEDKŮ	- 56 -
7	ZÁVĚR	- 58 -
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 60 -

1 Úvod

Při zpracování kovových materiálů tvářením, jejich mechanickém zkoušení nebo při jejich zatěžování v provozu dochází často ke změně tvaru, velikosti a ke změně jejich mechanických a chemických vlastností. Změna tvaru se obecně nazývá deformace. Deformace vznikne, působí-li na materiál vnější účinky. Může se jednat jak o účinky silové, tak o účinky teplotní.

Výpočet velikosti deformace a její měření má největší váhu v úlohách pružnosti a konstruování. Jelikož se klade velký důraz na bezpečnost, je důležité správně dimenzovat součásti a zvolit vhodný materiál, který bude mít odpovídající mechanické vlastnosti. Každý materiál má různé mechanické vlastnosti a znalost těchto vlastností je důležitá pro správné použití. Mechanické vlastnosti materiálů se zjišťují mechanickými zkouškami. Špatná volba materiálu nebo špatné dimenzování může zapříčinit nesprávnou funkci součásti. Jak je popsáno v [1] existují určité filosofie dimenzování, které definují přístup k bezpečnosti provozu. Jednou z filozofií je dimenzování na konstrukce tzv. bezpečné při poruše (fail-safe). Tato filosofie vzešla z požadavku maximálního využití konstrukce, připouští vznik poruch i v primární části, avšak vylučuje náhlé selhání celé konstrukce. V případě poruchy musí ostatní části přenášet provozní zatížení (viz například staticky přeúčtená konstrukce). V případě filosofie konstrukce s přípustným poškozením (damage tolerance), při které nejsou rovněž vyloučené poruchy, jsou přijata však taková závazná opatření, která musí zajistit jejich včasnou identifikaci a zabránit jejich rozšíření do takové míry, která by způsobila vážnou nebo katastrofickou poruchu. Další filozofií je dimenzování na bezpečný život (safe-life). Konstrukce navržené dle filozofie safe-life musí splňovat požadavek, že během projektované životnosti nesmí vzniknout porucha. Respektive pravděpodobnost vzniku poruchy je krajně malá. Za krajně malou pravděpodobnost se ve strojírenství považuje pravděpodobnost menší než 10^{-3} až 10^{-5} . V letectví jsou podmínky ještě zpřísněny na pravděpodobnost menší než 10^{-6} . Vzhledem k vysokým nárokům na výkonové parametry strojů, s rostoucími nároky na jejich spolehlivost a bezpečný provoz, je nutné se zabývat otázkou vzniku deformací a podobných přetvoření, které vedou k poškození materiálu. Pokud se součást deformuje, je možné, že dojde k rychlému porušení součásti, což může zapříčinit finanční ztráty, kvůli nutnosti opětovného návrhu a výpočtu součásti, nebo může dojít k ohrožení lidského zdraví.

Vytvoření obecného modelu, který by důkladně popisoval proces poškození, je velmi složité z důvodu četné rozmanitosti jednotlivých parametrů (například podmínky provozu, geometrie vzorků, atd.). Z tohoto důvodu je nutné proces poškození náležitě sledovat a získávat dostatečné množství informací pro možnost správného popsání a porozumění daného děje.

V rámci této bakalářské práce došlo právě ke sledování několika různých procesů deformace na různých materiálech s využitím kontaktních a bezkontaktních metod sledování deformace. Svě zázemí poskytla společnost Centrum výzkumu ŘEŽ s.r.o., když pro tyto účely byla využita infrastruktura projektu SUSEN (Sustainable Energy, CZ.1.05/2.1.00/03.0108).

2 Využívané technologie měření deformace

K měření deformace se používají různé přístroje a metody, které vznikaly a vznikají s postupným vývojem techniky. Tyto přístroje mají za úkol zjištění pokud možno co nejpresnějších hodnot změřených během laboratorních zkoušek nebo při běžném provozu daných konstrukčních součástí.

Základní rozdělení metod měření deformace je na kontaktní měření a bezkontaktní. V následujících kapitolách budou popsány metody kontaktního a bezkontaktního měření deformace, které byly použity v praktické části bakalářské práce.

2.1 Kontaktní měření

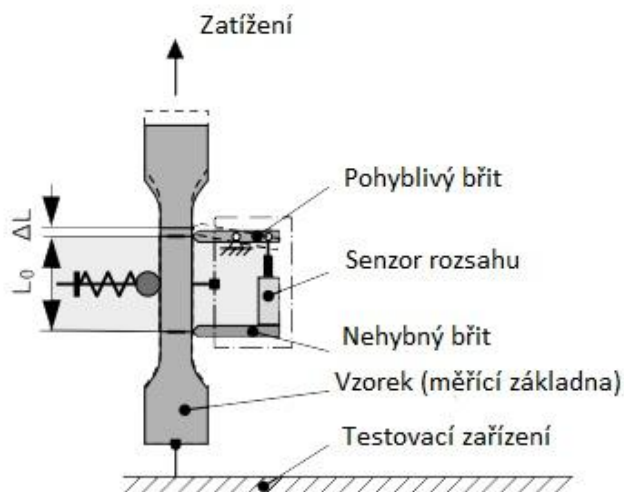
Ke kontaktnímu měření deformací se používají mechanické snímače. Mechanické snímače fungují tak, že se upevní na zkušební těleso a pomocí deformačních členů zachycují jeho délkovou změnu. Deformační člen určuje vzniklou poměrnou deformaci například změnou odporu nebo změnou kapacitní indukce. Rozdělit mechanické snímače lze na mechanické průtahoměry, extenzometry a tenzometry.

2.1.1 Extenzometry

Extenzometr je zařízení, které se využívá k měření změn délky těles vlivem jejich zatěžování nebo odlehčování. Kontaktní extenzometry se rozdělují do několika skupin podle hlavního účelu použití na klasické axiální extenzometry, vysokoteplotní extenzometry, příčné a diametrální extenzometry a multiaxiální extenzometry, které se používají například pro zkoušení kombinovaného namáhání krut a tah (tlak). Pomocí extenzometrů lze testovat různorodé materiály, jako jsou kovy, plasty, keramika nebo kompozity. Extenzometry lze připevnit na ploché vzorky i na vzorky kruhového průřezu. Připnutí a odepnutí těchto extenzometrů na vzorek se obvykle provádí manuálně. Nicméně aby se minimalizovalo chybné nastavení, jsou některé produkty vybaveny motorizovaným systémem pro připnutí a odepnutí ze vzorku. Kontaktní extenzometry se dělí na dva základní typy, připínající Clip-on extenzometry a extenzometry se senzorovými rameny.

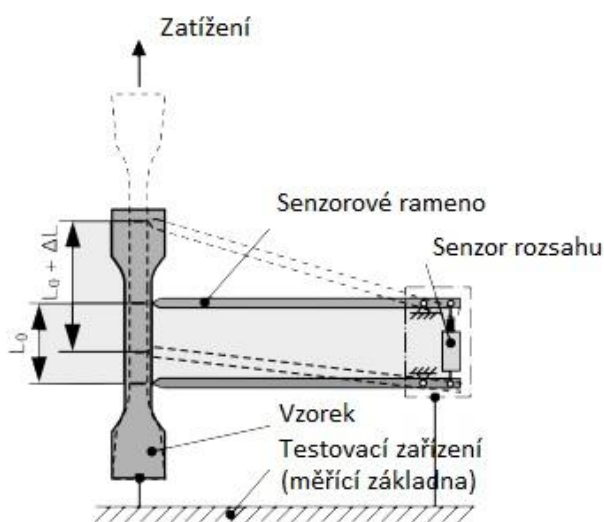
Na obrázku 1 je zobrazeno schéma měření pomocí clip-on extenzometrů, tedy extenzometrů, které se připínají na vzorek. Tento typ extenzometrů je nejčastěji používán pro měření za pokojové teploty. Podle [2] se extenzometry pro kontaktní měření připínají k měřenému vzorku pomocí upevňovacích ramen. Tyto upevňovací ramena musí působit na vzorek dostatečnou přitlačnou silou, aby nedocházelo k prokluzu extenzometru během experimentu. Ramena extenzometru mají danou určitou vzájemnou vzdálenost. Tato vzdálenost je označována jako měřicí základna (gauge length) a je jedním z charakteristických rozměrů extenzometru. Jistou analogií pro měřicí základnu lze najít u zkoušky tahem, kde je na začátku zkoušky definována počáteční délka vzorku L_0 . Ramena jsou během upevňování na měřený vzorek zaaretovaná pojistným kolíkem, čímž je zajištěna přesná poloha ramen a správná hodnota měřicí základny.

Některé typy extenzometrů mají vzdálenost ramen nastavitelnou a lze si tak zvolit různou měřicí základnu. Po upevnění extenzometru na vzorek se pojistný kolík vyjme. Druhou charakteristickou veličinou extenzometrů je maximální rozsah rozpětí (measuring length) ramen během zkoušky. Tato hodnota se udává v procentech z měřicí základny nebo přímo v milimetrech.



Obr. 1. – Schéma měření deformace s připnutým extenzometrem [2]

Na obrázku 2 je zobrazeno schéma měření pomocí extenzometrů se sensorovými rameny. Podle [3] se tento typ extenzometrů může na vzorek připevnit manuálně, ale nejčastěji se využívají pro plně automatizované testování. Při automatizovaném měření jsou extenzometry se sensorovými rameny ke vzorku připevněny automaticky pomocí motorizovaného systému. Tento princip měření dokáže produkovat mnohem více opakovatelné výsledky nežli klasické kontaktní extenzometry. Výhoda těchto extenzometrů je, že mohou zůstat připevněny ke vzorku až do jeho porušení a dokážou měřit prodloužení vzorku až do 1000 mm se stejnou přesností.



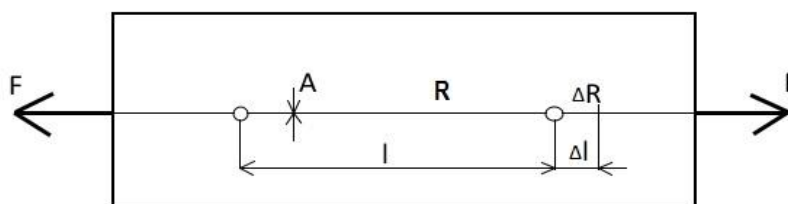
Obr. 2. – Měření s použitím extenzometru se sensorovými rameny [2]

2.1.2 Tenzometrické měření

Jelikož přímé měření napjatosti není možné, je elektrická odporová tenzometrie, jako všechny ostatní metody, metodou nepřímou. Při řešení deformace těles je potřeba znát závislost napětí na deformaci $\sigma = f(\varepsilon)$. Ta je obecně získána experimentálně ve formě pracovního diagramu ze záznamu statické zkoušky tahem. Princip elektrické odporové tenzometrie bude vysvětlen podle [4] Tenzometr pro elektrickou odporovou tenzometrii je v podstatě rezistor, jehož odpor se mění v závislosti na deformaci povrchu měřeného tělesa. Velikost této deformace tělesa je zjištěna pomocí změny odporu tenzometru. Poměrná změna elektrického odporu tenzometru je dána deformací jeho elektricky vodivé části. Základní tenzometrická rovnice je

$$\frac{\Delta R}{R} = f(\varepsilon) = k\varepsilon, \quad (2.1)$$

kde k je součinitel deformační citlivosti a jeho hodnotu je možné stanovit pomocí obrázku 3, na kterém je plochá tyč o konstantním průměru. S touto tyčí je spojen vodič o délce l , průřezu A a o měrném odporu ρ .



Obr. 3. – Tyč spojená s elektrickým vodičem [7]

Odpor vodiče R je dán vztahem $R = \rho \frac{l}{A}$ a změní se o ΔR , pokud se změní délka tyče o Δl , průřez vodiče A , nebo se změní měrný odpor ρ vlivem teploty. Pokud se předpokládá změna všech veličin, potom se změna odporu vodiče ΔR vyjádří logaritmováním vztahu pro odpor vodiče na obrázku 7

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln A \Rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (2.2)$$

kde $\frac{dl}{l}$ je poměrné prodloužení ε a poměrná změna průřezu bude vyjádřena jako

$$\frac{dA}{A} = -2\mu\varepsilon \quad (2.3)$$

pak poměrná změna odporu bude

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon - (-2\mu\varepsilon) + \frac{d\rho}{\rho} = \varepsilon \left(1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon} \right). \quad (2.4)$$

Potom vztah pro k má tvar $k = \left(1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon} \right).$ (2.5)

Součinitel k nabývá hodnoty $k = 1+2\mu$ pokud se zanedbá poměrná změna odporu s deformací. Pro kovy je Poissonovo číslo μ přibližně 0,3 a $k \doteq 1,6$ pro přímý vodič. Pro většinu kovových tenzometrů se hodnota k pohybuje v rozsahu od dvou do čtyř.

Podle [5] by měly být při vybírání tenzometrů položeny následující otázky: „Jaký je rozsah dostupných typů tenzometrů?“; „Jaké jsou možnosti a variace aplikování tenzometru?“; „Jaké jsou vnější vlivy, které ovlivňují tenzometrické měření?“. V praxi neexistuje takový tenzometr, který by splňoval všechna požadovaná kritéria. Z tohoto důvodu existují různé typy tenzometrů. Před začátkem měření musí být splněny dva základní požadavky. První požadavek je, aby měřící úkol měl jednoznačný cíl, musejí být známy detaily celého měřícího procesu a musejí být dány okrajové podmínky. Druhým požadavkem je, aby byl určený druh tenzometru, který bude použit při měření. Tabulka 1 je vhodná pro splnění prvního požadavku. V této tabulce jsou vypsány nejdůležitější faktory, které mají vliv na výběr typu tenzometru. Tyto faktory jsou rozděleny do pěti skupin. Tabulka může být použita jako kontrolní pomůcka pro uživatele, aby nepřehlédnul důležité body.

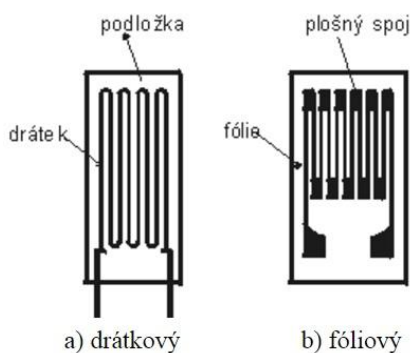
Problematika měření
Primární problém: měření deformace
Sekundární problém: Experimentální analýza, bezpečnost systému, atd.
Podmínky mechaniky v místě měření
Stav napjatosti: víceosá, dvouosá, neznámá napjatost, předem známá napjatost
Topografie pole napjatosti: homogenní, heterogenní, kombinované
Způsob namáhání: statické (amplituda, směr, hodnota napětí), dynamické (cyklické, Střídavé, mívivé, amplituda, atd.)
Počet možných měření do doby porušení
Okolní podmínky
Doba měření: Pouze jednou, krátkodobé, krátkodobé opakované, dlouhodobé, dlouhodobé opakované, atd.
Teplota: hodnota, rozsah teplot (během měření, před měření, mezi měřeními), koeficient teplotní roztažnosti komponenty
Rušivé efekty: Vlhkost (voda, led, pára), olej (parafín, hydraulický olej), tlak, elektrické pole, magnetické pole, přenos energie
Elektrické podmínky v místě měření
Měřící obvod: čtvrtmost, půlmost, plnomost
Zdroj tenzometru: Stejnoseměrný, střídavý
Kabeláž: délka, odpor, kapacita, odolnost vůči vnějším vlivům
Aplikační podmínky
Materiál komponenty: lepící a svařovací vlastnosti
Ošetření povrchu: opískování, odolnost vůči rozpouštědlům
Vedení kabelů
Prostorové podmínky: Tenzometr, kabeláž, ochranné čidlo

Tab. 1. - Seznam požadavků při výběru tenzometru [5]

Podle [4] se odporové tenzometry dělí podle konstrukce na drátkové, fóliové a polovodičové. Tenzometry se skládají ze dvou hlavních částí, vinutí a nosič. Vinutí je elektricky vodivou částí tenzometru a je přilepeno na nosič. Materiál vinutí bývá nejčastěji konstantan (60% Cu a 40% Ni). Využití tohoto materiálu je z důvodu malé závislosti jeho odporu na změnách teploty a pro jeho linearitu změny poměrného odporu na deformaci. Tenzometry mají vinutí s různými odpory, nejběžněji 120 nebo 350 Ω . Zatímco tenzometry s odporem 120 Ω se podle [6] používají, protože tyto tenzometry mají menší spotřebu energie a méně se zahřívají, tak tenzometry s odporem 350 Ω vysílají při měření většími signály a dokážou tak pracovat s delšími kabely. Nosič vinutí je nejčastěji vyroben z papíru, epoxidové pryskyřice, fenolické pryskyřice vyztužené vlákny anebo bakelitu.

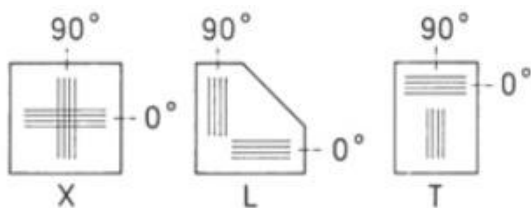
Drátkový tenzometr viz obrázek 4a) je vyroben z vodivého drátku nejčastěji o průměru 0,025 mm a délce vinutí 3÷150 mm. Toto vinutí je nalepeno na destičku o tloušťce 0,07 mm, která slouží jako nosič vinutí. Drátkové tenzometry podléhají při malém počtu vinutí příčné deformaci, což je nežádoucí. Pro odstranění působení příčné deformace byly vyvinuty meandrové nebo mřížkové snímače, které mají zesílené přechody ve smyčkách.

Fóliový tenzometr viz obrázek 4b) se skládá z vinutí, které má tvar tenkých rovnoběžných pásek. Pásky jsou spojeny na koncích silnou příčnou vazbou. Fóliové tenzometry se vyrábějí leptáním vinutí v tenké fólii, která má maximální tloušťku 0,015 mm. Vinutí je nejčastěji vyrobeno z konstantanu nebo chromniklu. Fóliové tenzometry dobře odvádějí teplo, jsou výhodnější pro přenos deformace z povrchu součásti do měřicího vinutí a jsou méně citlivé na příčnou deformaci.

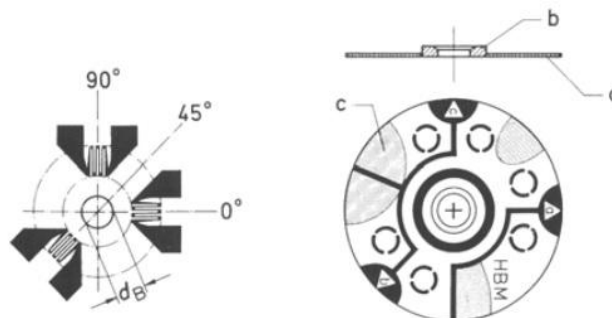


Obr. 4. – Drátkový a fóliový tenzometr [7]

Tenzometry se dělí podle počtu, umístění a natočení vinutí na podložce. Nejzákladnější tenzometry jsou tenzometry jednoduché pro měření deformace v jednom směru, viz obr. 4. Dále se používají tenzometrické kříže, viz obr. 5, které se používají pro měření deformací při známých směrech hlavních napětí nebo pro měření krouticího momentu na hřídeli kruhového průřezu. Tenzometrické růžice, viz obrázek 6, se vyrábí s rozdílnými úhly natočení vinutí vůči sobě například 45° nebo 60° a používají se pro vyšetřování hlavních délkových přetvoření. Dalším typem mohou být tenzometrické řetězce, viz obrázek 7, které se používají pro měření gradientu deformace.



Obr. 5. – Tenzometrický kříž [8]



Obr. 6. – Tenzometrické růžice [8]

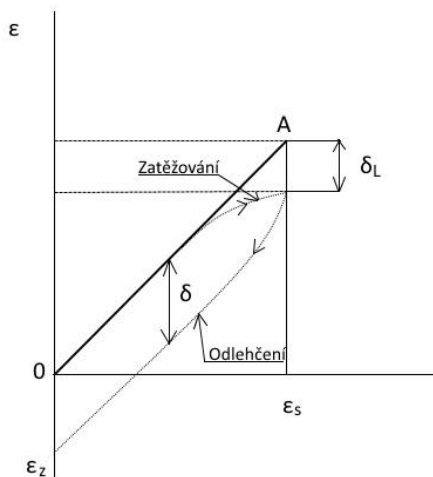


Obr. 7. – Tenzometrické řetězce [8]

Podle [4] musí mít tenzometry určité vlastnosti, aby měření bylo co nejpřesnější. Různé vlastnosti mohou být zapříčiněny různou kvalitou materiálu drátku a fólie, kvalitou nosiče nebo typem použitého lepidla. Pro zjištění vlastností tenzometrů musí být oceňovány, tzn., musí být určen součinitel deformační citlivosti k . Vlastnosti, které se u tenzometrů sledují, jsou linearita, hystereze, posunutí nuly, relaxace, příčná citlivost a deformační součinitel.

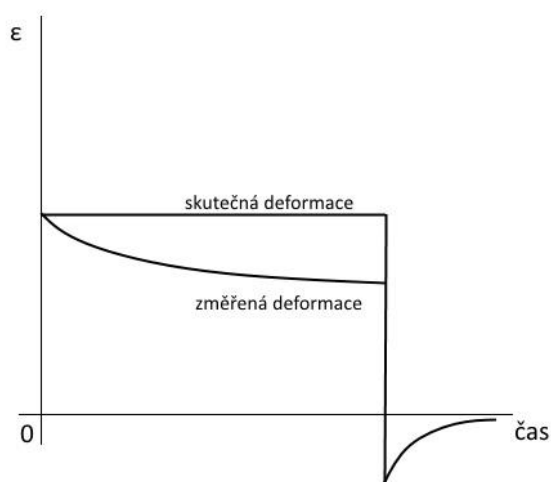
Linearita, hystereze a posunutí nuly jsou vysvětleny podle obrázku 8, na kterém je zobrazena závislost skutečné deformace ϵ_s a deformace změřené ϵ . Přímka směřující od nuly k bodu A představuje ideální stav při lineární závislosti. Pokud je tenzometr zatěžován a odlehčován dochází k odchýlení od ideálního stavu. Tato odchylka je označena na obrázku δ_L a pohybuje se kolem 0,1 %. Jelikož křivka odlehčování leží pod křivkou zatěžování, dochází k posunutí nuly ϵ_z , $\epsilon_z = (0,25-0,5) \epsilon_s$ [%].

Posunutí nuly je největší při prvních pěti až deseti cyklech a s vzrůstajícím počtem cyklů se zmenšuje. Z tohoto důvodu jsou tenzometry před vlastním měřením zatíženy minimálně pěti cykly, při nichž je deformace 125 % největší deformace, která se při měření předpokládá. Zatížení před měřením se nazývá „vytrénování tenzometrů“.



Obr. 8. – Linearita, hystereze a posunutí nuly [9]

Další sledovanou vlastností je relaxace, viz obrázek 9, která vzniká na součástech, které jsou zatíženy dlouhodobě. Při dlouhodobém zatížení se relaxace tenzometru projeví tím, že naměřená deformace bude menší i přes to, že součást je stále konstantně deformována. Pokud se tenzometr odlehčí tak se relaxace projeví deformací opačného znaménka a po čase vymizí. Na vznik relaxace má vliv změna vlastnosti podložky a lepidla.



Obr. 9. – Závislost naměřené deformace na čase [9]

Příčná citlivost patří také mezi důležité vlastnosti, které je potřeba sledovat. Příčnou deformaci je snaha minimalizovat. Při výpočtech se příčná deformace kompenzuje součinitelem příčné citlivosti tenzometru $\kappa = k_p/k_0$, kde k_0 je deformační součinitel ve směru osy tenzometru a k_p deformační součinitel v příčném směru. Potom změna odporu bude vyjádřena jako

$$\frac{\Delta R}{R} = k_0 \varepsilon_0 + k_p \varepsilon_p = k_0 (\varepsilon_0 + \kappa \varepsilon_p), \quad (2.6)$$

kde $\varepsilon_p = -\mu \varepsilon_0$.

Jelikož se tenzometry cejchují při jednoosé napjatosti, bude vztah (3.6) upraven na vztah

$$\frac{\Delta R}{R} = k_0 (1 - \mu \kappa) \varepsilon_0 = k \varepsilon_0, \quad (2.7)$$

kde $k = k_0 (1 - \mu\kappa)$ je deformační součinitel. Deformační součinitel je spolu s dalšími vlivy součástí celkového deformačního součinitele k , který udává výrobce.

Vlivy okolního prostředí na tenzometrické odporové měření jsou podle [8] rozděleny na vliv změny teploty, vliv vlhkosti a vliv tlaku. Tyto vlivy mohou mít nežádoucí účinky na měření a je bezpodmínečně nutné je kompenzovat. Vliv cyklického zatěžování je nutné také zahrnout mezi vlivy, které mohou negativně ovlivnit přesnost měření. V následující části budou tyto vlivy postupně popsány.

Sledování teploty je pro měření důležité. Změna teploty má vliv na změnu rozměrů součástí a komponent. Změna rozměru zapříčiní změnu odporu, a tím zdánlivou deformaci ε_T , což vyjadřuje vztah

$$\left(\frac{\Delta R_T}{R}\right)_1 = k\varepsilon_T = k(\alpha_s - \alpha_v)\Delta T, \quad (2.8)$$

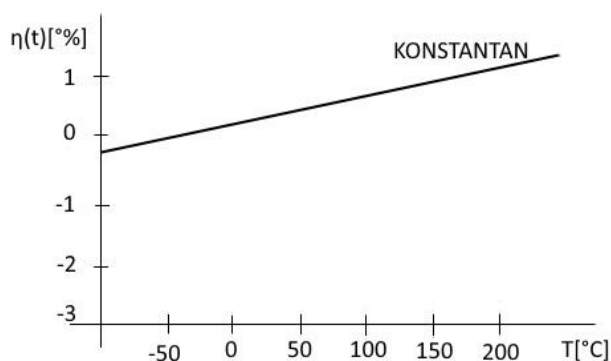
kde α_s je součinitel lineární teplotní roztažnosti materiálu součásti a α_v je součinitel lineární teplotní roztažnosti mřížky tenzometru. Při změně teploty se mění i odpor mřížky tenzometru

$$(\Delta R_T)_2 = \beta R \Delta T, \quad (2.9)$$

kde β je teplotní součinitel odporu materiálu mřížky. Dosazením druhého vztahu (2.9) do (2.8) vznikne vztah pro poměrnou změnu odporu tenzometru vlivem změny teploty

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T = [k(\alpha_s - \alpha_v) + \beta]\Delta T \quad (2.10)$$

Změna teploty má také vliv na změnu deformačního součinitele k . Na obrázku 10 je znázorněna závislost deformačního součinitele k , pro nejčastější materiál vinutí konstantan, na změně teploty. Závislost ukazuje, že změna součinitele k je při změně teploty o 1°C zanedbatelná. Z tohoto důvodu se změna deformačního součinitele k zanedbává při běžném měření a zohledňuje se jen při měření za vysokých teplot.



Obr. 10. – Závislost deformačního součinitele k pro vinutí z konstantanu [9]

Protože má změna teploty zmíněné nežádoucí účinky na měření, je třeba její účinky minimalizovat. Pro odstranění vlivu teploty se využívají tři metody. První metodou je použití kompenzačního tenzometru.

Kompenzační tenzometr má stejné vlastnosti jako tenzometr, který se zrovna používá k měření deformace součásti. Kompenzační tenzometr se nalepí na stejný materiál a sleduje změny teploty součásti v místě nalepení tenzometru měřicího deformaci.

Druhá metoda je použití samokompenzačního tenzometru. Tato metoda se používá, když není možné použít kompenzační tenzometr. Samokompenzační tenzometry nepodléhají změně odporu při změně teploty. Jedním typem samokompenzačního tenzometru je tenzometr, který má mřížku z dvou různých materiálů. Tyto materiály mají opačnou teplotní charakteristiku. Druhým, dnes používaným typem samokompenzačního tenzometru jsou tenzometry, které mají takového teplotního součinitele odporu vinutí β , že poměrná změna odporu vlivem teploty je nulová. Takové hodnoty odporu vinutí se dosáhne vhodným složením slitiny a technologickým zpracováním materiálu vinutí.

Třetí metodou je metoda korekce naměřených hodnot. Při měření tenzometrem se na měřené místo umístí termočlánek, který měří teplotu. Zdánlivou deformaci ε_T vlivem změny teploty je možné vyloučit, pokud je známá teplotní charakteristika tenzometru pro materiál součásti. Tyto charakteristiky jsou uvedeny na obale výrobce tenzometrů.

Dalším vnějším vlivem, který může negativně ovlivnit průběh měření je vliv vlhkosti. Vliv vlhkosti se sleduje především, pokud měření probíhá v prostředí o vysoké vlhkosti, při dlouhodobějším měření a u tenzometrů, které mají nosiče z organických materiálů. Pokud, je měření krátkodobé a vlhkost prostředí malá, pak se vliv vlhkosti zanedbává. Vlhkost ovlivňuje měření několika způsoby, například změnou rozměrů nosiče, snížením izolačního odporu tenzometru proti součásti, dále proniknutí vlhkosti mezi tenzometr a měřenou součást může zapříčinit prokluz tenzometru. Tenzometry lze chránit proti vlhkosti izolačními nátěry, jako jsou krycí tmel nebo silikonová pryž.

Při měření v prostředí se zvýšeným tlakem (například uvnitř tlakové nádoby) se šíří tlak všemi směry, a na tenzometr tak působí všestranná napjatost. Z této všestranné napjatosti vznikne celková deformace $\varepsilon = \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z$. Celková deformace pro všestrannou napjatost, o kterou je potřeba hodnotu poměrné deformace korigovat, se zjistí z rozšířeného vztahu Hookeova zákona

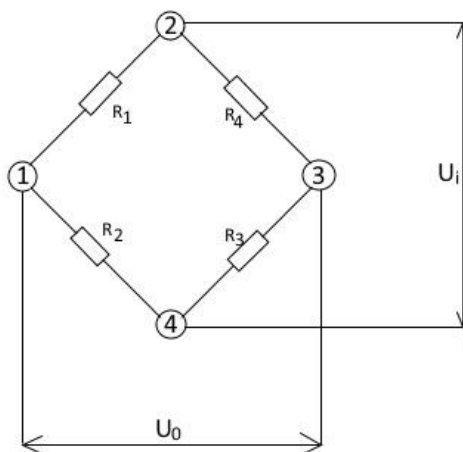
$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] = \frac{-P}{E} (1 - 2\mu) \quad (2.11)$$

Cyklické zatěžování negativně ovlivňuje některé vlastnosti tenzometrů, které jsou důležité pro přesnost měření. Při výběru tenzometru pro cyklické namáhání se berou v potaz určité vlastnosti, které musí tenzometr mít, aby byl pro cyklické namáhání vhodný. Vlastnosti, které se sledují, jsou únavová životnost vinutí tenzometrů, která klesá s rostoucí amplitudou měřené deformace, počáteční posunutí nuly, které po určitém počtu opakování roste v závislosti na amplitudě deformace a amplitudové a fázové zkreslení signálu tenzometru při měření rychlých změn a rázového namáhání.

Z experimentální analýzy [10], která zkoumala pomocí tenzometrů deformační chování nízkouhlikové oceli, vyplynulo, že jednoduché tenzometry jsou vhodné pro přesné stanovení meze kluzu. Avšak pro vyšetřování ratchetingu, tj. cyklického tečení, jsou vhodné extenzometry nebo metoda bezkontaktního měření deformace.

Podle [4] dochází při měření odporovými tenzometry k malým změnám odporů. Pro vyhodnocování těchto odporů se v praxi používá nejčastěji můstková metoda. Můstková metoda je metodou přesného měření odporů, která se používá pro určování absolutní hodnoty odporu srovnáním s referenčním odporem nebo pro určování relativní změny odporů zapojených do Wheastonova můstku.

V praxi se nejvíce používá napájení Wheastonova můstku konstantním napětím a snímání napěťového výstupu můstku obvodem s vysokým vstupním odporem. Na obrázku 11 je zapojení Wheastonova můstku, který je napájen konstantním napětím U_i . V můstku jsou zapojeny čtyři odpory R_1 , R_2 , R_3 a R_4 . Uzly 2 a 3 jsou připojeny ke zdroji a mezi uzly 1 a 4, které jsou připojeny k přístrojovému zesilovači s teoreticky nekonečným vnitřním odporem, je výstupní napětí U_o .



Obr. 11. – zapojení Wheastonova můstku [9]

Vztah pro výstupní napětí U_o je

$$U_o = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_i. \quad (2.12)$$

Výstupní napětí je rovno nule jestliže platí

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

(2.13)

Takovýto můstek je v tkzv. vyváženém stavu. Změna výstupního napětí ΔU_o je způsobena změnou odporů v můstku a je potom dána vztahem

$$\frac{\Delta U_o}{U_i} = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1-\eta), \quad (2.14)$$

kde r je poměr odporů v můstku $R_2/R_1=R_3/R_4$ a nelineární člen η je roven

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1+r}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + r \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)}}. \quad (2.15)$$

Při rovnosti všech odporů v můstku se vztah zjednoduší na vztah

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i}}{\left(\sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i} \right) + 2}. \quad (2.16)$$

Vztahy pro nelineární člen říkají, že nelinearita je nulová pro $r = 1$ při následujících rovnostech

$$R_1 = -\Delta R_2 \text{ a } \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$$

$$\Delta R_3 = -\Delta R_4 \text{ a } \Delta R_1 = \Delta R_2 = 0$$

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 \text{ a } \Delta R_3 = -\Delta R_4.$$

Tyto vztahy říkají, že můstek bude fungovat jako lineární, pokud budou aktivní odpory R_1 a R_2 , nebo R_3 a R_4 stejné a zároveň bude v dané dvojici stejná změna odporu s opačným znaménkem.

V praxi se na základě těchto vztahů využívají tři způsoby zapojení:

Plnomostové zapojení je konfigurace, kde jsou ve všech ramenech tenzometry o stejném odporu. Měření s plnomostových zapojením je nejpřesnější a tenzometry jsou teplotně kompenzovány. Častá modifikace tohoto zapojení spočívá v použití jedné dvojice tenzometrů jako kompenzační. Druhá dvojice se zapojí do sousedních ramen a nejsou poté teplotně závislé.

Půlmostové zapojení je konfigurace dvou aktivních tenzometrů například R_1 a R_2 a zbytek můstku je doplněn náhradními odpory. Použití této konfigurace například na ohýbaném nosníku, kdy jeden tenzometr je natahován a druhý zkracován, se při použití tenzometrů se stejným odporem odstraní nelinearita. Výstupní napětí je v takovém případě poloviční než při plnomostovému zapojení. Nejčastěji se půlmostové zapojení používá u jednoosé napjatosti, kde jsou tenzometry usazeny do tenzometrického kříže.

Čtvrtmostové zapojení je konfigurace jednoho aktivního tenzometru a zbytek můstku je doplněn náhradními odpory. Při této konfiguraci je můstek do jisté míry nelineární a teplotně nestabilní. Nejčastěji se tato konfigurace používá při zatěžovacích zkouškách konstrukcí. Z těchto zapojení, které se v praxi používají, vyplývá, že nelinearita má nepodstatný vliv a tudíž se rovnice (3.23) zjednoduší na vztah

$$\frac{\Delta U_o}{U_i} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (2.17)$$

Tento vztah popisuje závislost chování můstku na relativních změnách odporů. Pokud se do tohoto vztahu dosadí základní vztah pro poměrnou změnu deformace (3.2) vznikne vztah vyjadřující závislosti délkových přetvoření tenzometrů v jednotlivých ramenech můstku

$$\frac{\Delta U_o}{U_i} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

(2.18)

Vztahy, které byly odvozeny v předchozí kapitole, jsou odvozené pro ideální případ nulového odporu přívodů. V reálné praxi je změna odporů v můstku ovlivněna odporem přívodů. Měřeným délkovým přetvořením je ovlivněn pouze odpor tenzometru, pokud se v tomtéž rameni můstku vyskytne navíc přídavný odpor kabelu, je relativní změna celkového odporu daného ramene nižší. Vztah pro poměrnou změnu odporu v jednom rameni můstku se změní na vztah

$$\frac{\Delta R_1}{R_1 + R_k}, \quad (2.19)$$

kde R_k je odpor kabeláže. Přídavný odpor kabeláže ve větvích můstku lze korigovat výpočtem korekčního faktoru nebo zesílením měřícího zesilovače.

2.2 Bezkontaktní měření

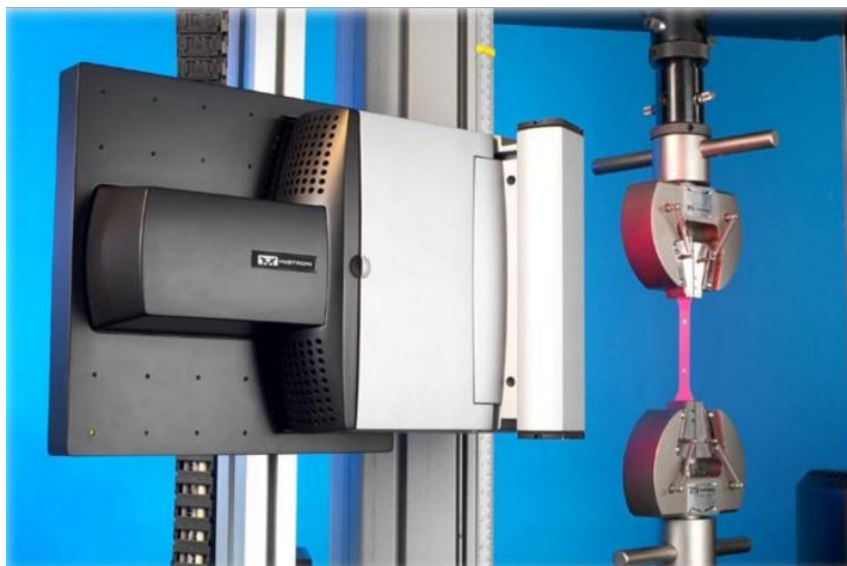
Bezkontaktní metody měření se v praxi využívají pro své výhody, které mají oproti metodám kontaktním. Tyto výhody mohou představovat naměření přesnějších hodnot, možnost změření příčné deformace, neovlivnění vzorku upnutím snímače anebo zachycení obrazu ve 3D. Optických snímačů je celá řada. Podle [3] patří mezi nejznámější video-extenzometr, laserový extenzometr a metoda digitální obrazové korelace. Klasické mechanické extenzometry je téměř nemožné využít k měření zkoušek s vysokými deformačními rychlostmi. Z tohoto důvodu, jak je popsáno v [11] a [12], bývají pro dynamickou tahovou zkoušku a pro zkoušku s vysokou rychlostí deformace používány bezkontaktní měřící metody, konkrétně metoda digitální obrazové korelace.

2.2.1 Video extenzometr

Video-extenzometr, viz obrázek 12, je dle [2] speciální digitální kamera, která je schopna zaznamenávat průběh zatěžování vzorku ve vysokém rozlišení a v reálném čase. Video-extenzometr využívá buďto klasické videokamery nebo vysokorychlostní kameru a má širokou škálu využití pro statické i dynamické namáhání. Tato metoda se dá použít na kovových materiálech, kompozitech, plastech a elastomerech s relativně velkou deformací. Při použití videokamery se na zkušební vzorek umísťují kontrastní značky ve formě teček nebo čar, popřípadě lze vzorek označit speciálním perem. Pro případ zkoušení za vysokých teplot nebo v tepelných komorách se běžně pro značení používá nástřik prášku Al_2O_3 . Obraz, který kamera zachytí, analyzuje počítačový program. Program sleduje vzdálenost středů kontrastních značek a z rozdílu vzdáleností před zkouškou a po zkoušce vypočte deformaci.

Vysokorychlostní kamera se používá především při zkouškách odolnosti proti nárazu a průrazu, pro sledování průběhu lomu nebo při zkoušce tahem s vyšší rychlostí zatěžování. Zkušební vzorek a jeho okolí musejí být během zkoušky dostatečně osvětleny. Pro osvětlení scény se nejčastěji používají halogenová nebo výbojková svítidla.

Jak je popsáno v [3] v praxi se využívá také speciální metoda měření deformace Array: Multi-camera Measuring systém. Tuto metodu využívá například výrobce video extenzometrů Zwick/Roell. Tato metoda využívá multi-kamerový měřicí systém. Rozlišení videokamery závisí na zorném poli kamery. Menší snímáný obraz videokamerou znamená lepší rozlišení snímku, ale tím se také zmenšuje měřicí rozsah. Pokud je třeba snímat velkou oblast deformace s co nejlepším rozlišením snímků, je Array skvělým řešením. Zorná pole několika videokamer umístěných vedle sebe vytvoří jeden velký snímek. Když značka opouští zorné pole jedné videokamery, plynule přejde do zorného pole videokamery umístěné vedle ní.



Obr. 12. – Video extenzometr zabudovaný do stroje pro zkoušku tahem [12]

2.2.2 Laserový extenzometr

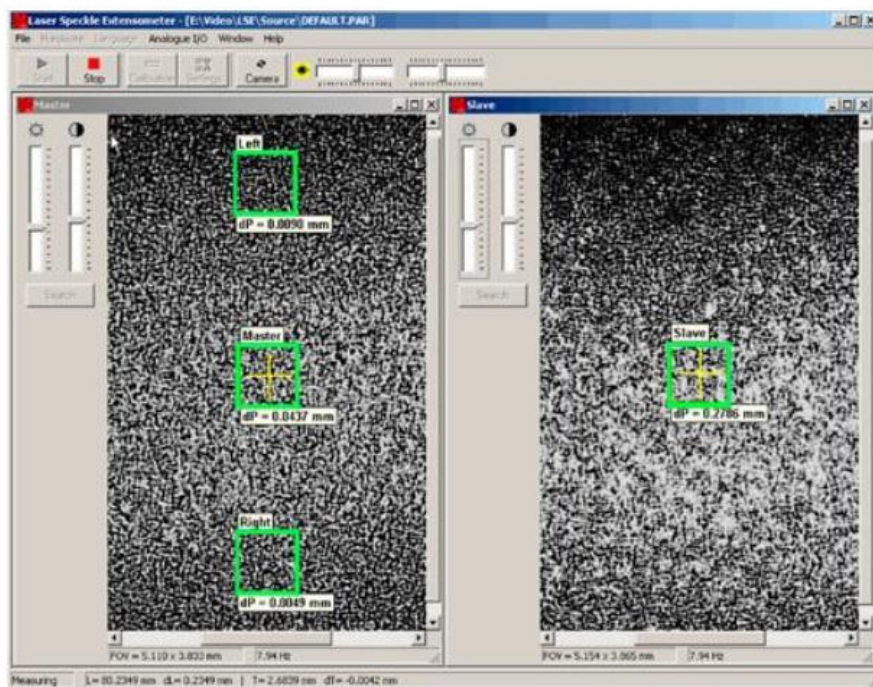
Laserový extenzometr je další bezkontaktní metodou, viz obrázek 20. Dle [2] je možné při této metodě pozorovat zkoušku do porušení vzorku. Laserový extenzometr se používá především pro tahové a tlakové zkoušky. Dále se používá při zkoušení za vysokých teplot a při měření v teplotních komorách nebo tam, kde použití kontaktního extenzometru není vhodné, z důvodu jeho možného poškození při porušení měřeného vzorku.

Laserový extenzometr se skládá ze dvou snímačů a dvou vysílačů. Vysílačem je zde laser, který osvítí povrch vzorku, tím se na povrchu vytvoří zrnitý obraz, který snímají dvě digitální kamery. Povrch vzorku zde není nutno nijak upravovat, jelikož nerovnosti povrchu zde slouží pro software jako souřadnicový systém, v němž si vytkne dané body, tzv. virtuální značky, které sleduje během zkoušky. Tato metoda je tedy výhodná v tom, že se na vzorek nemusí umisťovat značky a jen v některých případech je třeba na vzorku označit původní délku.

Snímaný obraz je vyhodnocován v počítačovém programu, viz obrázek 13. Počítačový program sleduje posun vybraných bodů na dvou po sobě jdoucích snímcích z kamery a tím vypočítá deformaci. Podle [3] se pro zkoušení velmi malých vzorků využívají single-kamerové systémy.

Takové systémy pracují s jednou kamerou, která zachytává odražené světlo od vzorku, a s jedním zdrojem laseru. Toto zařízení má omezené možnosti v délce sledování deformace. Nevýhodou je, že pro některé vzorky není možné vytvořit vlastní značky pro celou délku deformace. Délka sledování deformací je omezená a je dána zorným polem kamery. Tato nevýhoda je eliminována dvojím režimem měření deformace. Základní režim pracuje na principu sledování značek, až do momentu, kdy značky opouští zorné pole kamery. V tu chvíli se systém přepne na režim sledování toku materiálu.

V praxi se také podobně jako u video extenzometru, používá metoda Array. Tato metoda se využívá pro velmi malé i velké vzorky. Princip této metody je ve sledování vzorku čtyřmi kamerami, jejichž obrazy jsou spojeny v jeden velký snímek. Pokud se sledovaná značka dostane za hranici zorného pole jedné videokamery, přejde tak do zorného pole sousední videokamery. Teprve v momentě, kdy sledovaný bod dosáhne úplného kraje zorného pole všech kamer, přechází systém na režim sledování toku materiálu.



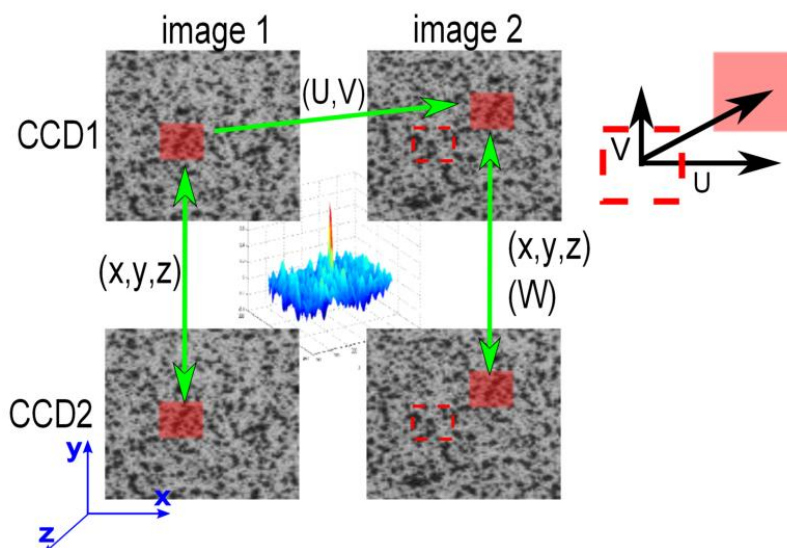
Obr. 13. – Systém pro vyhodnocování deformací pro laserový extenzometr [2]

2.2.3 Digitální obrazová korelace

Dle [2] je nejkompaktnější metodou pro vyhodnocování deformací metoda digitální obrazové korelace (Digital Image Correlation=DIC). Princip metody spočívá v záznamu průběhu zkoušky kamerou (pro případ 2D měření deformací) nebo dvěma videokamerami (3D měření deformací). Ukázka záznamu měření 3D deformací je zobrazena na obrázku 14.

Obě kamery jsou zaměřeny na společný bod z jiného úhlu, tím vzniká 3D obraz testovaného objektu. Digitální snímky, které kamery zachycují, se skládají z jednotlivých pixelů. Pixel je nejmenší stavební jednotka digitálního obrazu. Korelace je prováděna tak, že systém dokáže lokalizovat stejný pixel na dvou snímcích, z nichž jeden byl pořízen před zatěžováním a druhý po zatěžování.

Lokalizace pixelu probíhá na principu rozpoznání hodnoty stupně šedi každého jednotlivého pixelu. Samotné rozpoznání hodnoty šedi pixelu nestačí, protože v obraze může mít více pixelů stejnou hodnotu šedi, proto se kolem pixelu určí malá oblast tzv. Subset. Tyto oblasti už jsou kolem jednotlivých bodů pokaždé jedinečné a je tak možné lokalizovat odpovídající pixel na obou snímcích.



Obr. 14. - Digitální obrazová korelace [13]

DIC je možné aplikovat na široký rozsah laboratorních zkoušek nebo i při běžném provozu daných součástí. Pro DIC metodu byly vynalezeny řady systémů, které slouží pro zpracování snímků a dat z průběhu zkoušky. Mezi nejznámější výrobce této technologie patří například společnost Dantec Dynamics nebo GOMmbH. Společnost GOMmbH vytvořila systém Aramis, který je použit jako výchozí systém pro bezkontaktní měření deformace praktické části bakalářské práce a proto bude důkladně popsán v následující kapitole.

2.2.4 Systém Aramis – popis, zpracování a prezentace dat

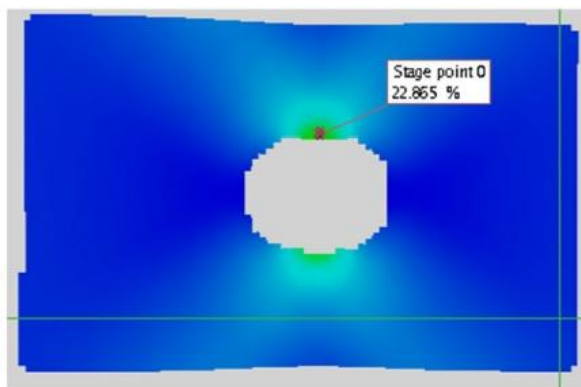
Dle dostupných materiálů výrobce [14] je Aramis optický měřicí systém pro 3D analýzu deformací, který dokáže sledovat a analyzovat vlastnosti materiálů, 3D posuny a rychlosti, povrchové napětí. A to vše jak pro statické tak dynamické zatěžování. Všechny tyto analýzy jsou prováděny v reálném čase. Tímto systémem mohou být testovány různé druhy materiálu od kovů po plasty nebo i speciální vyztužené komponenty. Nejvíce se Aramis využívá v testovacích laboratořích.

Příprava vzorků pro analýzu není časově, technicky ani finančně náročná. A vzorky se poté mohou využít k jinému účelu. Vzorky pro měření mohou být různorodé. Aramis dokáže pracovat se vzorky rozličných tvarů a velikostí. Oblasti, s kterými dovede systém pracovat, se pohybují řádově od mm^2 až do m^2 . To znamená, že je možné pracovat jak s mikrovzorky, tak velkými komponentami.

Systém Aramis je dostupný v několika typech. Mezi nepoužívanější typy se řadí 4M, 5M nebo HS. Tyto typy se liší především v rychlosti snímání kamer a jejich rozlišení. Kamery pro typ HS mají nejvyšší rychlost snímání až 4000 Hz, zároveň ale snímají snímky s nejnižším rozlišením (1280 x 1024 px). Naproti tomu typ 5M má frekvenci snímání daleko nižší (do 29 Hz), ovšem kompenzace přichází s daleko větším rozlišením (2448 x 2050 px). Pro praktickou část bakalářské práce byl pro bezkontaktní měření použit typ 4M.

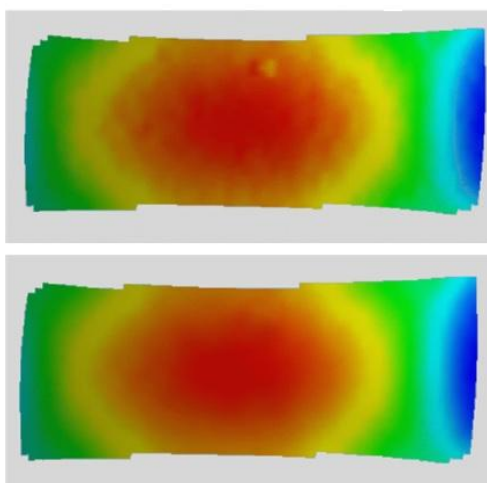
V [16] nabízí software Aramis řadu možností pro zpracování dat, podle potřeb a požadavků uživatele. Uživatel má k dispozici několik funkcí, které umožňují snadnější zpracování výsledků a pomáhají uživateli zaměřit průběh měření na pro něj důležitou oblast.

Informační bod - Je funkce, která uživateli umožňuje získat aktuální informace o stavu deformace nebo napětí v libovolném místě. Bod si lze zvolit v 3D pohledu měřeného vzorku, na povrchu součásti nebo uvnitř. Na obrázku 15 je zobrazen informační bod s textovou vlaječkou a indikací změny tvaru.



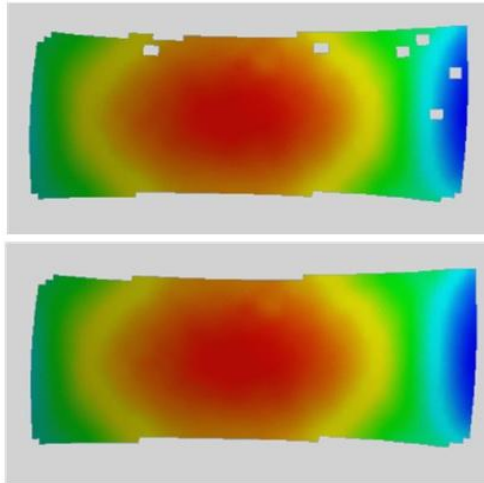
Obr. 15. – Informační bod [15]

Filtrování - Výsledné 3D pohledy je možné filtrovat a vyhladit. Filtrace a vyhlazení pomáhá zdůraznit výsledky celoplošně nebo jen na vybraných místech. Nevýhodou je, že filtr může zhoršit přesnost jednotlivých bodů. Příklad filtrace je na obrázku 16.



Obr. 16. – Příklad filtrace obrazu [15]

Interpolace - Interpolace se používá, pokud má výsledný obraz v sobě díry. Díry v obrazech mohou vzniknout například z důvodu porušení nasprejované vrstvy. Pro provedení interpolace je důležité zadat maximální rozměry díry v obraze, která má být zaplněna. Příklad interpolace obrazu je na obrázku 17.



Obr. 17. – Příklad interpolace obrazu [15]

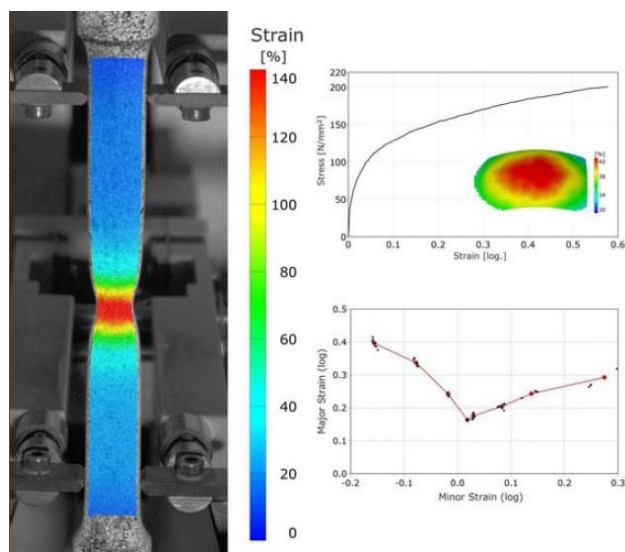
Geometrické prvky - Základními prvky jsou body, přímky, kruhy, plochy atd. Základní prvky se používají k definování objektu v 3D pohledu. Používají se především pro transformaci, analýzu nebo k dokumentaci výsledků měření.

Analytické prvky - Použitím funkce analýzy částí lze určit deformaci v bodě, mezi body, mezi bodem a přímkou, mezi bodem a plochou, úhel mezi dvěma přímkami, úhel mezi přímkou a plochou nebo úhel mezi dvěma plochami. Výsledky této analýzy lze zobrazit pomocí tabulky nebo přímo na 3D obraze.

Statistické vyhodnocení výsledků - Systém Aramis nabízí rovněž zpracování statistických dat do tabulky. Pro toto zpracování se musí předem zvolit sledovaná oblast v 3D obraze. Statistická tabulka zobrazuje informace o maximech, minimech a průměru zatížení, deformací a podobně.

Počítačový software umožňuje prezentovat data ve více variantách. Výsledky v prostorové analýze, při použití různého zpracování dat (sekce, elementy, základní prvky), je možno prezentovat kompletní zprávou nebo lze využít sejmuté snímky kamerami.

Zpráva - Standardní zprávy obsahují obrázky, diagramy z průběhu zatěžování a obrazy zachycené kamerou. S využitím zpráv lze jednoduše prezentovat výsledky měření. Uživatel má možnost nadesignovat vzhled zprávy podle vlastní potřeby a uložit pro pozdější použití. Příklad standardní zprávy ze zkoušky tahem, vyhodnocené systémem Aramis viz obrázek 18.



Obr. 18. – Vyhodnocení zkoušky tahem, při použití zprávy systémem Aramis [14]

Série obrazů a videí - Druhou možností je použít sérii obrazů a videí. Sérii obrazů je možné použít ve zprávách, jako doplnění grafů a tabulek. Lze také použít sérii obrazů zachycených kamerami a uložit je ve formátu videí. Uživatel má možnost vybrat si jen jeden určitý obraz nebo určitou sérii z jakékoli fáze měření.

3 Cíle bakalářské práce

V rámci projektu Udržitelná energetika (Sustainable Energy, SUSEN - registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0108), který je realizován v rámci Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (VaVpl) Evropského fondu regionálního rozvoje (ERDF), byla zadána tato bakalářská práce s názvem: „Porovnání metod kontaktního a bezkontaktního měření deformace“. Ze strany Západočeské univerzity v Plzni došlo k využití infrastruktury společnosti Centrum výzkumu ŘEŽ s.r.o. Tato spolupráce zahrnovala tyto cíle:

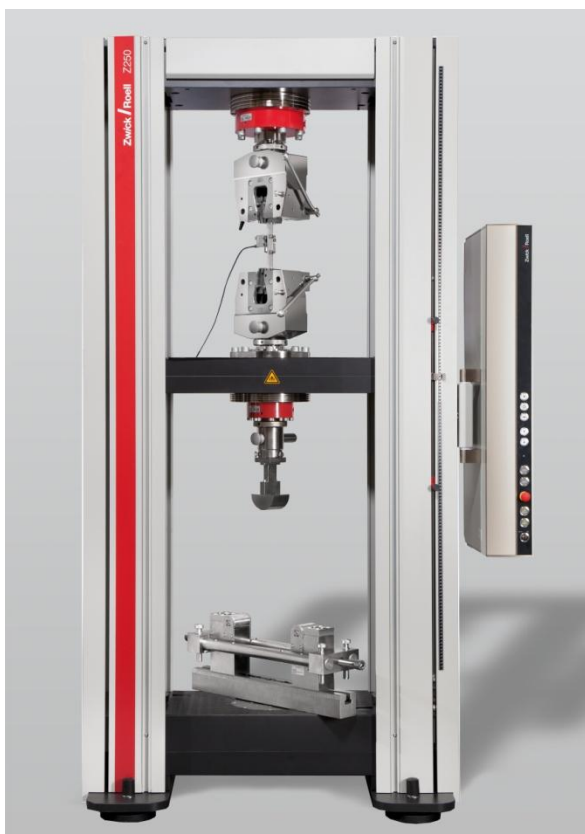
- Popis problematiky deformace těles
- Přehled využívaných technologií měření deformace
- Příprava vzorků:
 - Pro případ kontaktního měření tento proces zahrnoval očištění a zdrsnění povrchu, osovou aplikaci tenzometrů a svorkovnic, přiletování vývodů, zapojení do můstku, připojení kabeláže k měřicí ústředně Quantum X.
 - Pro případ bezkontaktního měření se jednalo o očištění povrchu, vytvoření kontrastního patternu a kalibrace systému Aramis.
- Provedení tahové zkoušky na oceli P91 na elektromechanickém trhacím stroji Zwick/Roel Z250 SH s využitím laserového extenzometru.
- Provedení testu nízkocyklové únavy na lopatkové oceli T671 na servohydraulickém stroji INOVA 100 kN.
- Provedení testu nízkocyklové únavy na lopatkové oceli T552 na servohydraulickém stroji INOVA 100 kN se stejnými podmínkami zatěžování.
- Vyhodnocení a porovnání výsledků naměřených laserovým extenzometrem a systémem ARAMIS pro případ tahové zkoušky oceli P91 a vyhodnocení a porovnání výsledků naměřených systémem ARAMIS, měřicí ústřednou Quantum X a kontaktním extenzometrem pro případ testu nízkocyklové únavy ocelí T671 a T552.

4 Experimentální zařízení

V této kapitole jsou popsány konkrétní experimentální zařízení, na kterých byly provedeny jednotlivé zkoušky, jejichž výsledky jsou vyhodnoceny a porovnány mezi sebou.

4.1 Stroj pro zkoušku tahem Zwick

Pro zkoušku tahem byl použit stroj Z250 SH od firmy Zwick, viz obrázek 19. Podle výrobce [16] může stroj pracovat s maximálním zatížením až 250 kN a je tedy vhodný i pro testování relativně větších vzorků. Vysokou tuhostí stroje a přesným vedením příčnicku je minimalizován nežádoucí mechanický vliv na zkušební vzorek. Výška pracovního prostoru je bez přídavného pohyblivého příčnicku 2260 mm. S přídavným příčnickem je maximální výška spodní části pracovního prostoru 2155 mm a maximální výška horního pracovního prostoru je 2175 mm. Přesnost uložení příčnicku na dané pozici je $\pm 2\mu\text{m}$. Rychlost příčnicku se při testovacím zatížení může pohybovat od 0,00005 mm/min až do 600 mm/min. Příčnick se bez zatížení pohybuje rychlostí 1000 mm/min. Ke stroji se dají připojit táhla pro ploché vzorky a pro vzorky kruhového průřezu. Pohonný systém stroje je AC servo-motor. Vstupní signál se přivádí pomocí digitálního kabelu a s počítačem je stroj připojen ethernetovým kabelem. Data se do počítače posílají s frekvencí 500Hz, lze zvolit i frekvenci 2000 Hz.



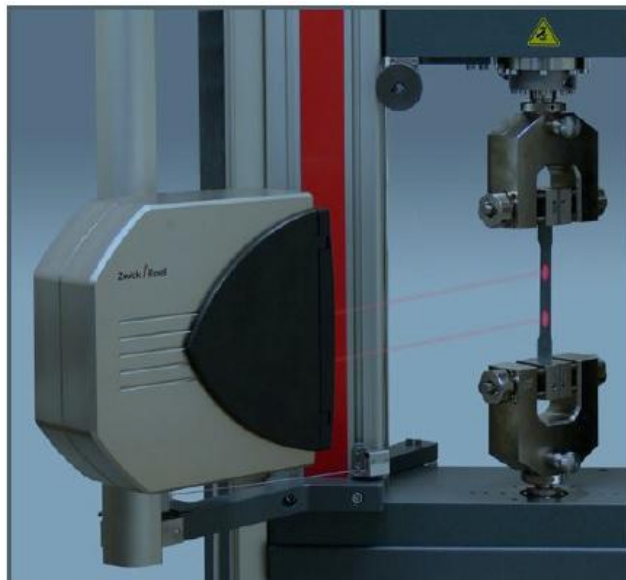
Obr. 19. – Stroj pro zkoušku tahem Zwick 250 [17]

4.2 Laserový extenzometr laserXtens

Pro bezkontaktní měření byl použit laserový extenzometr laserXtens, viz obrázek 20. Podle [3] má tento typ laserového extenzometru široký rozsah použití, od základních mechanických zkoušek (tah, tlak, ohyb), až po zkoušení variabilních komponent a podsestav.

Extenzometr laserXtens se nemusí připevnit k měřenému vzorku a laser dopadající na povrch vzorku nemá žádný vliv na vlastnosti materiálu. Při měření není třeba označovat povrch vzorku speciálními značkami a při měření vzorků v tepelných komorách tak nehrozí zničení značek vlivem vysoké teploty. Měřená délka vzorku se může pohybovat od 1,5 mm do 220 mm. Při základním nastavení je měřicí frekvence 100 Hz. Maximální sledovací rychlost na vzorku je 500 mm/min.

Aby dosáhl laserový extenzometr laserXtens maximálního výkonu a co největší přesnosti při měření musí být splněny následující podmínky. Zkoušený materiál musí dostatečně odrážet dopadající paprsek laseru, aby se na povrchu vytvořil zrnitý obraz. Tuto podmínku ve většině případů splňují kovové materiály a většina plastů. V případě, že povrch materiálu nemá potřebnou odrazivost, lze materiál ošetřit speciálními přípravky. Druhou podmínkou je, že zkušební vzorek musí být dostatečně pevně zajištěn v táhlech, aby zůstal ve stejné poloze po celou dobu testu. Poslední podmínkou je zajištění minima vibrací, aby měření bylo co nejpřesnější.



Obr. 20. – Laserový extenzometr [3]

4.3 Stroj Inova pro nízko cyklovou únavu

Pro dynamickou zkoušku byl použit servohydraulický zkušební stroj od firmy Inova. Jak je popsáno v [17] tento zkušební stroj dokáže vyvodit maximální zatížení pro statickou zkoušku tahem a tlakem 100 kN. Pro dynamické zatěžování je stroj schopen maximálního zatížení 80 kN. Základní konstrukce stroje je rám a posuvný příčník. Příčník se pohybuje pomocí regulovatelného hydraulického posuvu. Rychlost hydraulického pístu zajišťují dva servoventily. Pro případ nízkokykové únavy je možné jeden servoventil odpojit. Maximální rychlost pístu bez zátěže je $0,2 \pm 25\%$ m/s a maximální zdvih hydrostatického válce je 100 mm (± 50 mm). Stejně jako u stroje Z250 SH i zde jsou k dispozici čelisti pro různé vzorky. K dispozici jsou čelisti pro ploché vzorky o tloušťce 0,5 až 19 mm a šířky do 44 mm, a čelisti pro vzorky s kruhovým průřezem o průměru 6 až 22 mm. Stroj je řízen řídicí elektronikou EU 3000. Tato řídicí elektronika je vybavena mimo jiné i programem ITRM pro iteraci časových signálů zátěžových průběhů. Celé zkušební pracoviště stroje je napájeno dvěma hydraulickými agregáty HU 80 s průtokem 80 l/min. Jmenovitý výkon jednoho elektromotoru je 55kW a provozní tlak oleje je 28 MPa. Maximální vzorkovací frekvence je 10 kHz. Současný synchronizovaný A/D převod všech analogových vstupů je 24 bitů. Chlazení je zajištěno chladiči, které pracují na principu olej-vzduch.

4.4 Extenzometr Epsilon 3542

Pro experimentální program byl použit extenzometr Epsilon 3542-012M-010-ST. Extenzometr Epsilon 3542, viz obrázek 21, je kontaktní axiální extenzometr. Podle [18] je výhodou tohoto extenzometru, že může zůstat upevněn na zkušební vzorku až do jeho porušení. Epsilon 3542 využívá plnomostové zapojení pro kompatibilitu s jakýmkoliv podobným měřícím systémem. Linearita měření se pohybuje od 0,10 % do 0,15 % plného rozsahu měření. Měřící základna tohoto extenzometru je 12 mm a měřící rozsah je $\pm 10\%$. Rozsah teplot, při kterých lze tento model použít je -40°C až 100°C . Maximální frekvence měření tohoto modelu závisí na několika faktorech. Závisí především na měřené délce a měřícím rozsahu extenzometru, dále na tuhosti upevnění měřeného vzorku a extenzometru a na provozní frekvenci a amplitudě extenzometru. Použití pro cyklickou únavu je obtížné predikovat z důvodu závislosti aplikované amplitudy a frekvence. Použitý model je dle výrobce možné používat do provozních frekvencí až 20 Hz.



Obr. 21. – Extenzometr Epsilon 3542 [18]

4.5 Tenzometrická ústředna QuantumX

Pro měření deformace při dynamické axiální zkoušce byla použita tenzometrická ústředna Quantum X, viz obrázek 22. Podle [4] je modul napájený DC 24 V a pro komunikaci s PC užívá ethernetový kabel. Elektronika modulu je uložena v kovovém krytu, který je opatřen přídatným ochranným prvkem. Tento element rovněž usnadňuje vycentrování v případě vertikálního řazení modulů a do jisté míry chrání zařízení před mechanickým poškozením. Maximální příkon každého zařízení odpovídá přibližně 8 W. Pokud hodnota napájecího napětí trvale klesne pod 10 V, zařízení se automaticky vypne. K univerzálnímu měřicímu zesilovači MX840 je možné připojit až osm snímačů najednou. Snímače se připojují přes zásuvku D-SUB-15HD. Všechny měřicí kanály jsou galvanicky odděleny jak mezi sebou, tak od napájecího zdroje. Naopak výstup nastavitelného pomocného napájecího napětí je galvanicky spojen s obvodou vstupu příslušného kanálu.



Obr. 22. – Tenzometrická ústředna QuantumX [4]

4.6 Systém Aramis 4M

Pro zkušební testy byl použit systém Aramis 4M, jehož princip byl popsán v kapitole 2.2.4 a souvisí s bezkontaktním měřením deformace pomocí digitální obrazové korelace. Dle informací výrobce [14] je typ 4M vhodný, pokud je při měření požadována vyšší frekvence snímání i rozlišení obrazu. Aramis 4M dokáže snímat obrazy s maximální frekvencí až 168 Hz při rozlišení 2400 x 1728 px. Je možné dosáhnout ještě vyšší frekvence redukcí rozlišení kamer a to až na frekvenci 1334 Hz při rozlišení 2400 x 168 px. Na obrázku 23 je zobrazen kompletní aparatura systému Aramis 4M. Součástí sestavy je skříň, ve které je počítač. Ve skříni jsou také úložné prostory pro příslušenství, jako jsou distanční kroužky pro kamery, polarizační filtry, kalibrační panely nebo sada pro údržbu. Celá sestava je plně mobilní, není tedy problém přemístit systém k větším komponentám, s kterými není snadná manipulace.



Obr. 23. – Kompletní příslušenství systému Aramis a detail na slider(kamery a světla) [19]

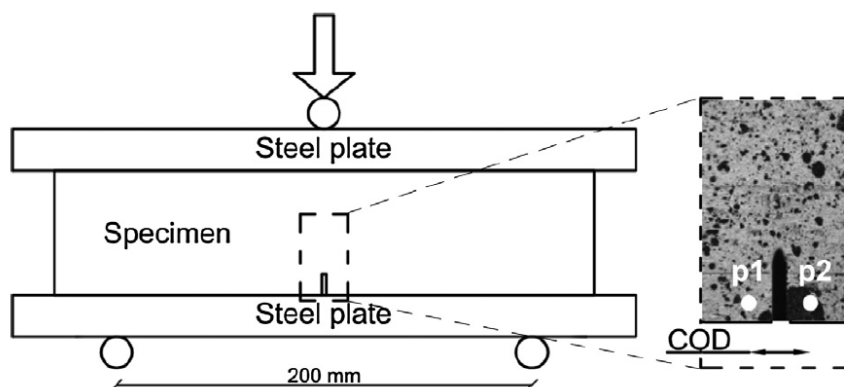
Pro případ analýzy 3D deformací zahrnuje uspořádání systému Aramis dvě kamery (viz obrázek 23) umístěné na společné ose tzv. slideru, který je dlouhý 800 mm. Kamery je možné po slideru posouvat a měnit tak úhel snímání vzorku. Podle velikosti měřené oblasti se nastaví pozice kamer na slideru a vzdálenost stativu od měřeného vzorku. Uprostřed slideru je umístěn laser, který míří na vzorek. Obě kamery se nastavují tak, aby místo dopadu laseru bylo ve středu obou snímaných obrazů. Tím se zajistí ohnisková vzdálenost kamer. Dále jsou zde umístěná LED světla o výkonu 20W, která zajišťují dobrou viditelnost a ostrost obrazu. Světla je možno volně polohovat a manipulace se provádí pomocí kulového kloubu. Celý systém je takto usazen na stativu.

4.7 Aplikace systému Aramis

Softwary založené na metodě digitální obrazové korelace často nahrazují běžné kontaktní metody měření, které dříve byly nenahraditelné. Výhody takových softwarů, jako je například systém Aramis, tkví především v jednoduchosti přípravy vzorků pro měření. Největší výhodou je však široký rozsah aplikací, v kterých lze tento software použít. Často je systém Aramis použit pro stanovení charakteristických materiálových vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří například Youngův modul, Poissonova konstanta, exponent deformačního zpevnění $[n]$ a další. Tyto vlastnosti jsou následně použity jako parametry pro numerické simulace. Numerické simulace, které pracují s metodou konečných prvků, slouží k návrhu prototypů a testování komponent. Zadání materiálových vlastností napomáhá optimalizovat okrajové podmínky vstupující do simulace.

V této kapitole jsou uvedeny a popsány aplikace systému Aramis v experimentálních studiích.

V experimentální práci [20] byla využita optická měřicí technika ke stanovení R křivky lomové houževnatosti u „hliněných“ bloků. Lomová houževnatost K_{IC} je důležitý parametr především u křehkých materiálů. Jedná se o kvantitativní způsob, jak lze vyjádřit odpor materiálu proti křehkému lomu, je-li přítomna trhlina. V minulosti bylo navrženo několik metod měření K_{IC} pro křehké materiály. Práce popisuje provedení třibodového ohybu na zkušebních tělesech typu SEPB. Tato metoda zaručuje přesné hodnoty K_{IC} , především u křehkých materiálů, u kterých je možná aplikace lineární lomové mechaniky (LELM). Vzorky SEPB vyžadují speciální přípravu, především ve fázi předkmitávání trhlin. Byly připraveny vzorky s jedním vrubem o délce 5 mm a tloušťce 1 mm. Pro získání ostré předkmitané trhliny bylo nejprve potřeba ořezat čelo vrubu s použitím žiletky a diamantové pasty. Tento druhý zářez měl délku 1 mm. Tato procedura zaručuje vznik rovné předkmitané trhliny a její lineární šíření. Trhlina se poté předkmitává vložením vzorku mezi dva nosníky viz obrázek 24. Během této fáze byl posun pole určen metodou DIC. Tímto způsobem je možné sledovat (CMOD) posun otevření trhliny a zastavit tak zatěžování při dosažení požadované délky trhliny. Následně byl vzorek s předkmitanou trhlinou konečně podroben zkoušce třibodového ohybu s cílem vyhodnocení K_{IC} . V této fázi se DIC využila k vyhodnocení posunů a napětí ve vzorku. Získané snímky byly následně zpracovány softwarem digitální obrazové analýzy, čímž se určila poloha trhliny.



Obr. 24. - Schéma předkmitání trhliny třibodovým ohybem mezi dvěma nosníky [20]

V práci [21] bylo zkoumáno strukturální chování a mezivrstvé posuny mezi CFRP pláty a ocelovými nosníky. Jedná se o ocelové nosníky zpevněné polymerními pláty, které jsou zesíleny uhlíkovými vlákny. Tyto pláty jsou na ocelové nosníky nalepeny speciálním lepidlem. Používání externě lepené výztuže z polymerních vláken pro zesílení konstrukce je jednou z nejmodernějších technologií. Schopnost zajistit stávající strukturu s dodatečnou vrstvou o vysoké pevnosti, vysokém modulu a nízké váze otvírá cestu k širokým možnostem posílení konstrukcí a jejich modernizaci. Jednoduchá instalace na místě, schopnost přizpůsobit geometrii lepené vrstvy k povrchu vzorku a vyšší odolnost proti vlivům okolního prostředí přispívá ke stále se zvyšující použitelnosti této metody. Pro sledování a vyhodnocení celoplošného mezivrstvého posunu podél nosníku byla využita 3D metoda digitální obrazové korelace.

Experiment [22] byl zaměřen na výpočet J-integrálu měřením posunutí pole metodou digitální obrazové korelace. V této práci je představena kombinace experimentální numerické techniky pro výpočet J-integrálu jako prostorový integrál u porušených vzorků. Navržená metoda je založena na celoplošném měření digitální obrazovou korelací a metodě konečných prvků. J-integrál je pravděpodobně nejvíce generalizovaný a uznávaný parametr pro určení chování lomu pružných a elastoplastických materiálů. Navržená technika má tu výhodu, že nevyžaduje měření délky lomu a ani se neomezuje na elastickou lomovou mechaniku, která předpokládá malou plastickou zónu. Hodnoceny jsou tři zkušební geometrie: dopadové napětí, tříbodový ohyb, a dvojitý ohyb torzní tyčí. Jsou zvažovány možné chyby a omezení těchto metod. Technika celoplošného měření posunů v průběhu deformace materiálu metodou DIC umožňuje stanovení posunů s přesností jednoho pixelu. Zjednodušeno je i následné zpracování a získávání parametrů, které kvantifikují mechanickou sílu tvořící porušení. DIC tak umožňuje přímý experimentální-numerický výpočet lomových parametrů, jako jsou CTOD, nebo faktor intenzity napětí.

V práci [23] je navržena experimentální metoda pro vyšetření rychlosti šíření trhlin v betonu při dynamickém zatěžování v tahu. Tato metoda je založena na zatěžování vzorků s dvěma vruby. Kompresní pulz se přenáší do vzorku s obdélníkovým průřezem pomocí Hopkinsonovy tyče. Tato experimentální konfigurace byla optimalizovaná sérií numerických simulací. Byla provedena řada experimentů na suchých a mokřích vzorcích z betonu. Měřidla trhlin a vysokorychlostní kamery v kombinaci s DIC byly použity pro určení rychlosti lomu. Výsledky experimentu ukázaly, že DIC s použitím vysokorychlostní kamery získaly přesnější výsledky, než použití klasických měřidel trhlin.

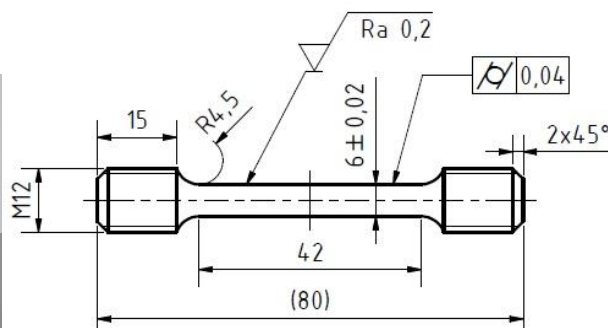
5 Výsledky

5.1 Zkouška tahem oceli P91

Pro statickou zkoušku tahem byl vybrán vzorek oceli X10CrMoVNb9-1. V průmyslu se tato ocel častěji vyskytuje pod názvem P91. Jedná se o martenzitickou žáropevnou legovanou ocel. Česká norma řadí tuto ocel do třídy 17. Jak je popsáno v [24] hlavní výhody této oceli jsou vysoká žáropevnost a plasticita při tečení, vysoká teplotní vodivost a nízká teplotní roztažnost a zvýšená korozní odolnost v prostředí vodíku, vodní páry a zplodin hoření. Podle [25] a [26] byla ocel P91 vyvinuta komplexním legováním oceli 9Cr-1Mo(V), která byla vyvíjena pro petrochemický průmysl. Tato ocel je vhodná pro použití do teplot kolem 600°C a je široce využívána při výstavbách, respektive modernizaci tepelných bloků velkých výkonů s výstupní teplotou páry okolo 593°C. Tento materiál je společně s ocelí 316L a 316L(N) hlavní kandidát pro výstavbu reaktorů čtvrté generace. Na obrázku 25b) je výkres zkušební vzorku. Průměr vzorku mezi závitovými hlavami pro upnutí je $6 \pm 0,02$ mm a délka těla zkušební vzorku je 42 mm. Na obrázku 25a) je zobrazen zkušební vzorek, na jehož povrch byl nanesen pattern pro snímání deformace systémem Aramis 4M. Nejprve se na vzorek nanese sprejem Dupli-color Aqua high quality lackspray bílá matná podkladová barva. Po zaschnutí této vrstvy se sprejem Dupli color Grafit 33 nanese vrstva černé matné barvy. Tato vrstva je zrnitá a podle velikosti snímané oblasti systémem Aramis se na vzorek aplikuje daná zrnitost. Různá zrnitost se na vzorek nanese speciální technikou sprejování, kdy se sprej škrtí prstem a mění se vzdálenost a úhel dopadu spreje na vzorek.



Obr 25a) – Vzorek oceli P91 pro zkoušku tahem



Obr. 25b) – Výkres zkušební tyčky z oceli P91

Podle [25] je tato ocel feritická, s obsahem 9 % chromu a 1 % Molybdenu. Dále je tato ocel mikrolegovaná vanadem, niobem a kontrolovaným obsahem dusíku. V tabulce 2 je zobrazeno chemické složení oceli P91, které je dáno normou a chemické složení konkrétního vzorku, který byl použit pro experimentální program. Přesné chemické složení tohoto vzorku bylo zjištěno pomocí optického emisního spektrometru s doutnavým výbojem pro analýzu pevných vodivých a nevodivých vzorků s možností tvorby koncentračních profilů Horiba GD-Profilér 2. Tabulka obsahuje hmotnostní podíly všech legujících prvků v procentech.

Chemické složení [hm. %]			C	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb	Ni	P	S	Si	Ti
Tabulkové složení	P91	min	0,08	8	-	0,3	0,85	0,06	-	-	-	-	-
		max	0,12	9,5	-	0,6	1,05	0,1	0,4	0,025	0,015	0,5	-
Vzorek	P91		0,107	8,57	0,032	0,484	0,94	0,068	0,27	0,022	0,0036	0,282	0,029

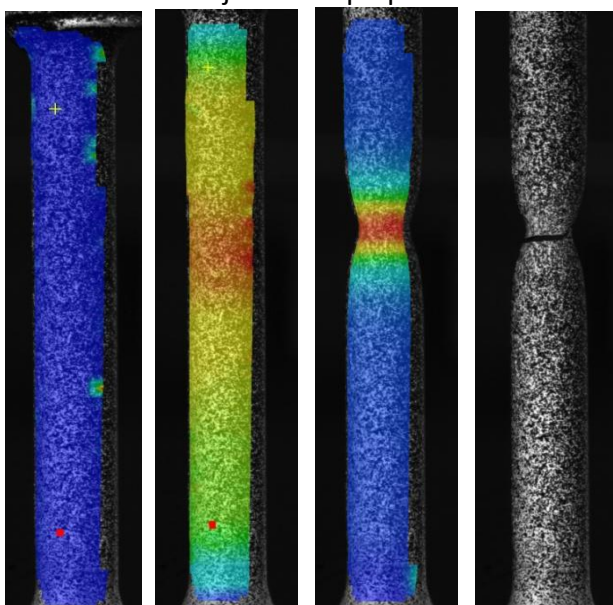
Tab. 2. – Chemické složení oceli P91

Zkouška tahem této oceli byla provedena na stroji Z250 SH od firmy Zwick. Zkouška byla řízena pomocí laserového extenzometru laserXtens a deformace byla sledována optickým měřicím systémem Aramis 4M. Na obrázku 26 je zkušební vzorek upevněn ve zkušební stroji a obě měřicí zařízení jsou připravena k měření. Nejprve bylo zapotřebí nastavit zařízení pro bezkontaktní měření Aramis 4M. Toto zařízení se postavilo do správné polohy ke stroji Z250 SH, tak aby se stativ nedotýkal stroje a vlivem vibrací během zkoušky nedošlo ke znehodnocení výsledků. Poté se provedlo nastavení polohy kamer na stativu, provedlo se jejich zaostření a zvolila se hodnota clon a rychlost závěrky kamer tak, aby obraz nebyl přexponovaný nebo příliš tmavý. Poté se provedla kalibrace s použitím kalibrační destičky. Kamery se na otočném stativu namířily na kalibrační destičku. Destička se podle instrukcí měřicího softwaru natáčela v prostoru. V dalším kroku byl na stroji Zwick připraven laserový extenzometr laserXtens ke snímání vzorku. Kamery a lasery extenzometru byly namířeny na zkušební vzorek. Poté byly nastaveny parametry potřebné k provedení zkoušky. Tyto parametry byly: předzatížení vzorku 5 MPa, rychlost zatěžování byla nastavena na $0,0067 \text{ s}^{-1}$ a dále byly nastaveny základní rozměry vzorku. Snímání samotné zkoušky bylo spuštěno až po předzatížení vzorku. Jelikož nebyl systém Aramis 4M připojen ke stroji Z250 SH muselo se zajistit, aby došlo ke spuštění měření systémem Aramis a laserovým extenzometrem laserXtens ve stejný čas, aby si snímky a hodnoty získané z obou zařízení časově odpovídaly.

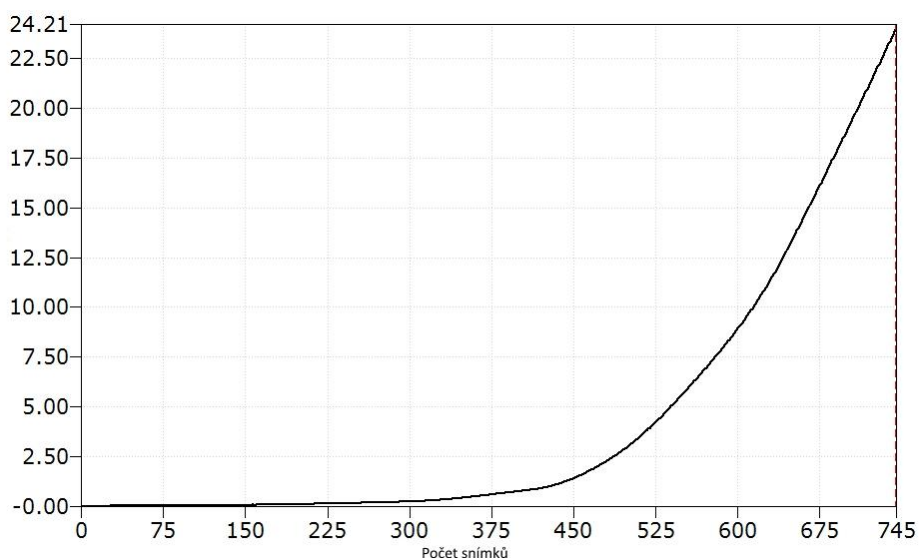


Obr. 26. – Vzorek upevněn ve stroji a připraven k experimentu

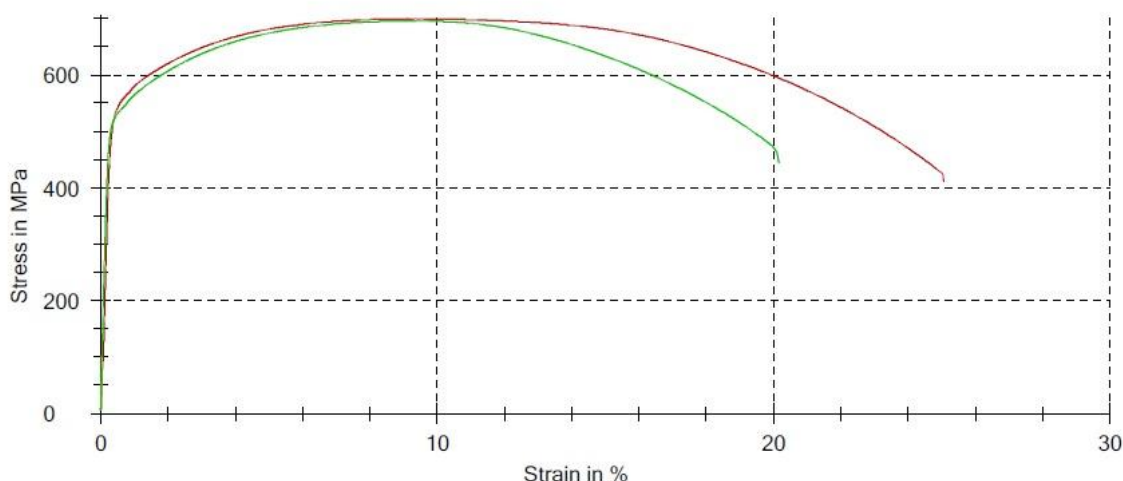
Na obrázku 27 Jsou zobrazeny snímky z pravé kamery systému Aramis. Snímky zachycují důležité fáze průběhu tahové zkoušky. Na prvním snímku je vzorek před začátkem zkoušky. Počítačový software vytvoří na povrchu vzorku barevnou mapu díky nastříkanému patternu. Barevná mapa zachycuje stupně deformace částí vzorku a barevně je rozlišuje. Čím kvalitnější je nástřik, tím je vytvořena jednodušší mapa bez hluchých míst. Modrá barva barevné mapy značí nulovou deformaci. Na druhém snímku je vzorek během probíhající zkoušky. V tomto momentu dosáhl vzorek svojí meze pevnosti v tahu 696 MPa. Barevný povrch vytvořený softwarem se mění během zkoušky podle toho, jak je vzorek v různých částech deformován. Na třetím snímku je vzorek těsně před přetržením. Na snímku je vidět charakteristický krček, ve kterém se koncentruje nejvíce napětí. Červená barva značí, že v místě krčku probíhá největší deformace. V tomto momentě byla deformace naměřená systémem Aramis 24 %. Naměřená hodnota deformace systémem Aramis je zobrazena na obrázku 28. Na posledním snímku je vzorek po přetržení.



Obr. 27. – Snímky vzorku pořízené pravou kamerou systému Aramis během zkoušky



Obr. 28. – Naměřená deformace systémem Aramis 4M



Obr. 29. – Tahový diagram statické zkoušky tahem oceli P91

Na obrázku 29 je zobrazen tahový diagram vykreslený z dat získaných pomocí laserového extenzometru laserXtens. Na diagramu jsou dvě tahové křivky. Červená křivka byla získána z tahové zkoušky druhého vzorku oceli P91. Při tomto testu nebyla deformace vzorku zároveň sledována měřícím systémem Aramis. Zelená křivka byla získána z tahové zkoušky prvního vzorku P91, u kterého byla zároveň měřena deformace systémem Aramis 4M. Hodnoty získané laserovým extenzometrem z obou testů jsou zobrazeny v tabulce 3. Mez pevnosti zkušebních vzorků byla vypočítána z podílu maximální zatěžující síly F_m a původního průřezu vzorku S_0 . U prvního vzorku dosáhla mez pevnosti hodnoty 696 MPa a u druhého vzorku dosáhla mez pevnosti hodnoty 700 MPa. Po přetržení zkušebních vzorků byla vypočtena tažnost A , která je měřítkem tvárnosti. Tažnost byla vypočítána dle vzorce

$$A = \frac{\Delta L}{L} * 100[\%]. \quad (5.1)$$

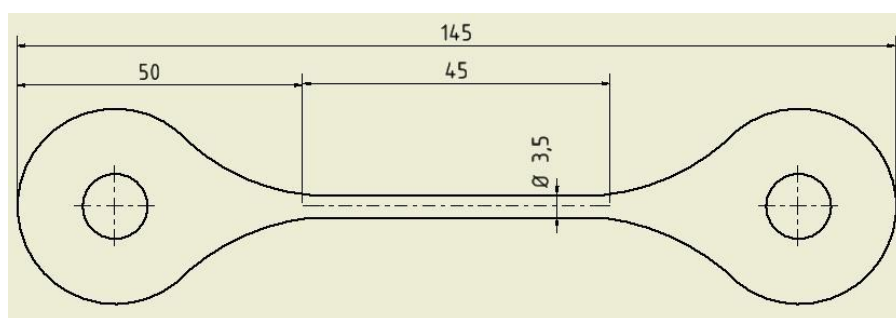
Tažnost je vyjádřena podílem poměrného prodloužení k původní délce vzorku v procentech. U prvního vzorku byla vypočítána tažnost 20 % a u druhého vzorku byla tažnost 24,8 %. Z tahového diagramu je patrné, že ocel P91 nemá výraznou mez kluzu R_e a tato hodnota se tedy zjišťuje jako smluvní napětí. Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ je tedy mezní napětí, které způsobí trvalou deformaci 0,2 % původní měřené délky. U prvního vzorku byla získána hodnota $R_{p0,2}$ 526 MPa a u druhého vzorku 540 MPa. První dva vzorky jsou porovnány s třetím vzorkem, který byl publikován v [24]. Třetí vzorek byl zkoušen bez předchozí úpravy tepelným zpracováním. Z hodnoty meze pevnosti v tahu 696,2 MPa a hodnoty $R_{p0,2}$ lze vidět, že mechanické vlastnosti třetího vzorku jsou srovnatelné s prvními dvěma vzorky. Dá se tedy předpokládat, že první dva vzorky neprošly rovněž tepelným zpracováním.

Označení vzorku	d_0 mm	S_0 mm ²	L_0 mm	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	F_m kN	A %
1 P91	6	28,27	42	526	696	19,68	20
2 P91	6	28,27	42	540	700	19,78	24,8
3 P91	5	19,63	30	534,7	696,2	13,67	-

Tab. 3. – Tabulka hodnot tahových zkoušek oceli P91

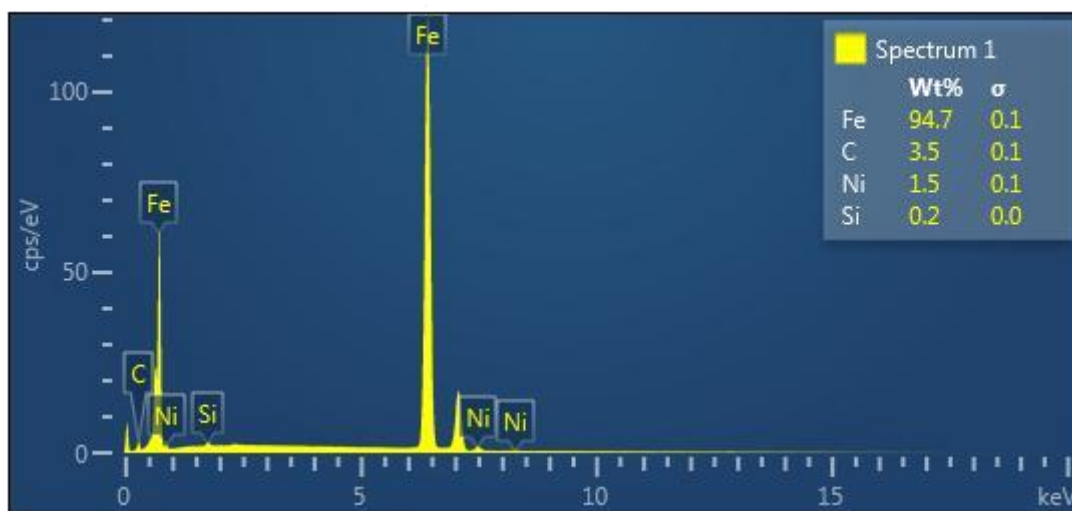
5.2 Zkouška tahem oceli 15.142

Pro druhou zkoušku tahem byl vybrán vzorek oceli 15.142. Vzorek byl vyroben práškovou metodou. Na obrázku 30 je zobrazen výkres použitého vzorku oceli. Na těle vzorku byly přítomny vruby, které zde vznikly díky použité výrobní metodě. Dle výkresové dokumentace je celková délka vzorku 145 mm a průměr těla je 3,5 mm. Průměr těla vzorku byl měřen pomocí mikroskopu. Vzorek má atypický tvar upínacích hlav pro zkoušku tahem. Tělo vzorku je válcovité a na konci přechází na ploché upínací části s otvory. Součást byla do stroje upnuta tak, aby byl vzorek natahován právě za otvory v upínacích hlavách.



Obr. 30. – Výkres použitého vzorku oceli 15 142

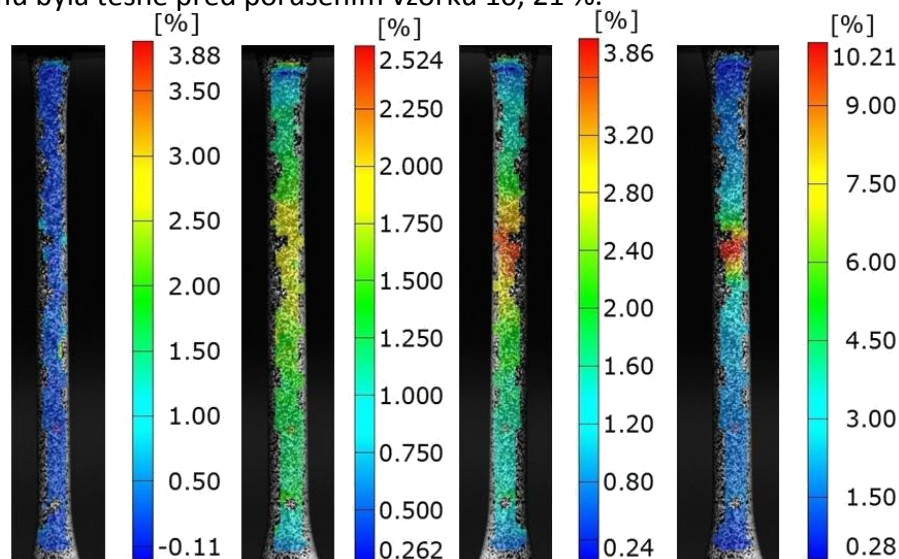
Na obrázku 31 je zobrazen výsledek analýzy chemického složení vzorku. Analýza byla provedena na optickém emisním spektrometru s doutnavým výbojem pro analýzu pevných vodivých a nevodivých vzorků s možností tvorby koncentračních profilů Horiba GD-Profilér 2. Analýza chemického složení ukázala, že vzorek obsahuje 3,5 % uhlíku, 1,5 % niklu, 0,2 % křemíku a zbylých 94,7 % patří železu.



Obr. 31. – Analýza vzorku pomocí Horiba GD- Profiler 2

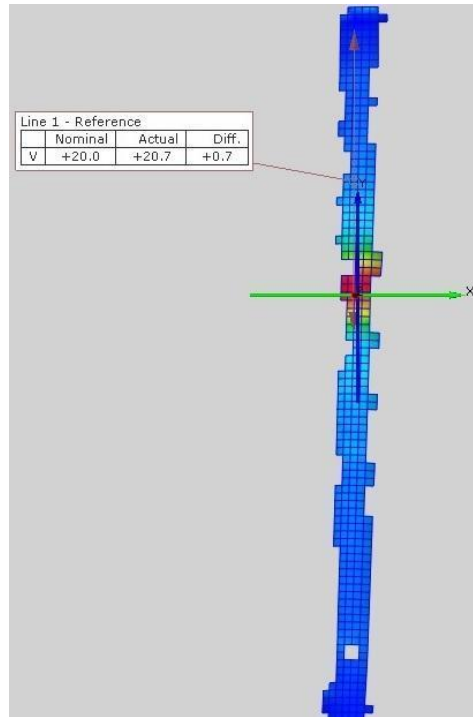
Zkouška tahem tohoto materiálu byla provedena na stroji Z250 SH od firmy Zwick. Zkouška byla řízena pomocí laserového extenzometru laserXtens a deformace byla sledována optickým měřicím systémem Aramis 4M. Zařízení pro bezkontaktní měření Aramis 4M bylo postaveno ke stroji Z250 obdobně jako u zkoušky oceli P91, viz obrázek 8. Poté se provedla příprava systému Aramis 4M pro měření. Součástí přípravy bylo nastavení polohy kamer na stativu, provedlo se jejich zaostření a zvolila se hodnota clon a rychlost závěrky kamer tak, aby obraz nebyl přexponovaný nebo příliš tmavý. Poté se provedla kalibrace s použitím kalibrační destičky. Kamery se na otočném stativu namířily na kalibrační destičku. Destička se podle instrukcí měřicího softwaru natáčela v prostoru. V dalším kroku byl na stroji Zwick připraven laserový extenzometr laserXtens ke snímání vzorku. Kamery a lasery extenzometru byly namířeny na zkušební vzorek. Poté byly nastaveny parametry potřebné k provedení zkoušky. Tyto parametry byly: předzatížení vzorku 30 MPa, rychlost zatěžování byla nastavena na $0,0067 \text{ s}^{-1}$ a dále byly nastaveny základní rozměry vzorku. Snímání samotné zkoušky bylo spuštěno až po předzatížení vzorku. Jelikož nebyl systém Aramis 4M připojen ke stroji Z250 SH muselo se zajistit, aby došlo ke spuštění měření systémem Aramis a laserovým extenzometrem laserXtens ve stejný čas, aby si snímky a hodnoty získané z obou zařízení časově odpovídaly.

Na obrázku 32 je zobrazen sled snímků pořízených systémem Aramis 4M z průběhu experimentu. Na prvním snímku nalevo je vzorek před začátkem zkoušky a při předzatížení 30 MPa. Na druhém snímku lze pozorovat změnu barevné mapy, která naznačuje vzrůstající deformaci vzorku. Třetí snímek zobrazuje další nárůst deformace vzorku, přičemž v červené oblasti se nachází místo vzorku s nejvyšší deformací. Na posledním snímku je zobrazen vzorek těsně před porušením. V tomto momentě se deformace z celé délky vzorku přesunula do jednoho místa, na obrázku zobrazeno červenou barvou. V tomto místě došlo k porušení vzorku. Místní deformace v místě lomu byla těsně před porušením vzorku 10, 21 %.



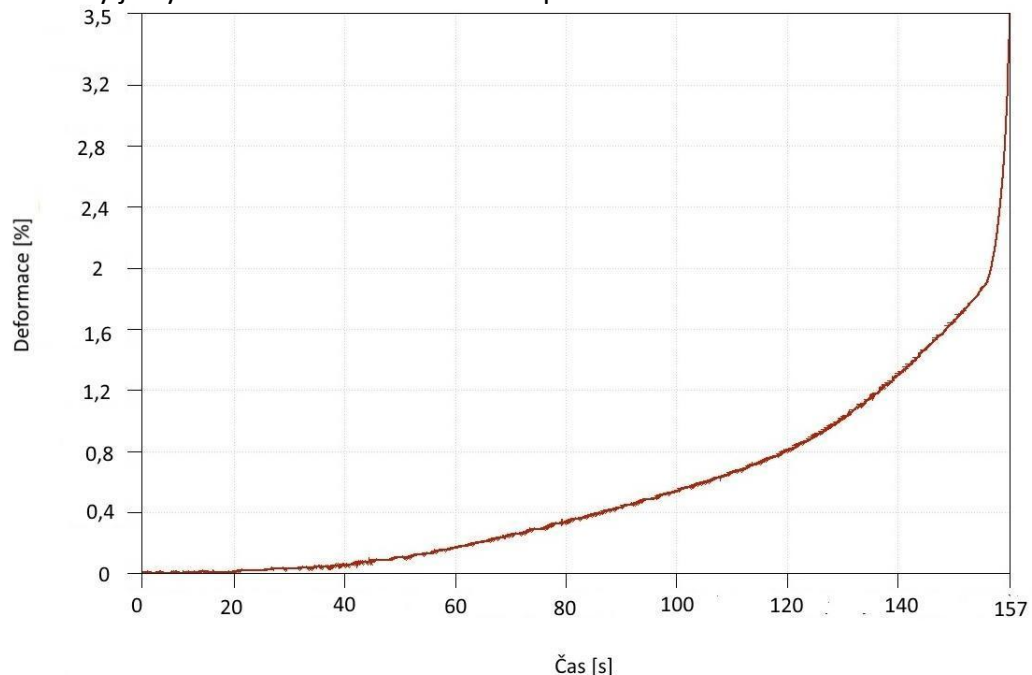
Obr. 32. – Sled snímků pořízených systémem Aramis 4M při průběhu zkoušky

Na obrázku 33 je zobrazen software systém Aramis 4M, v kterém byl proveden výpočet prodloužení vzorku při průběhu experimentu. Výpočet se provedl metodou sledování vzdálenosti dvou bodů během experimentu. Měřicí základna (Nominal), tedy počáteční vzdálenost bodů byla nastavena na 20 mm. Na posledním snímku zachyceném před porušením vzorku byla naměřená vzdálenost mezi těmito body 20,7 mm (Actual). Ze vzorce 5.1. byla vypočítána deformace vzorku 3,5 %.

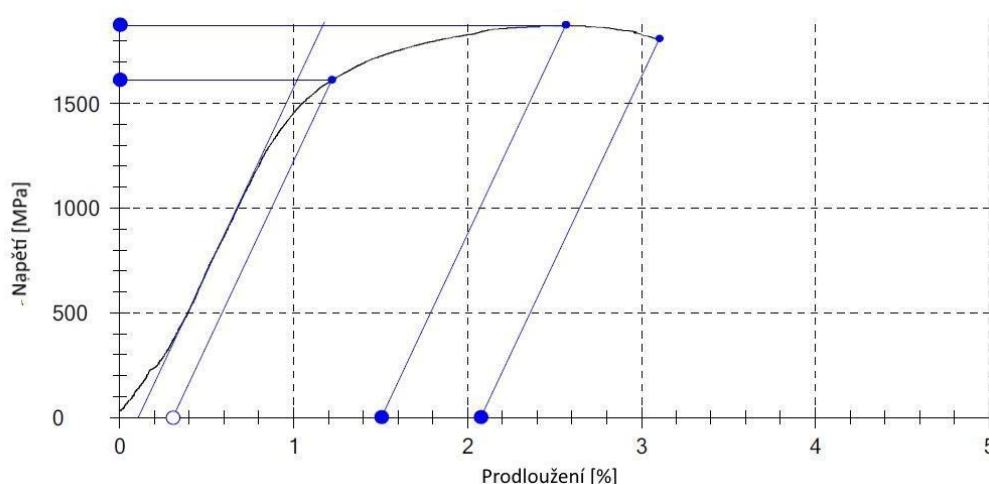


Obr. 33. – Určení prodloužení pomocí systému Aramis 4M metodou sledování vzdálenosti dvou bodů

Na obrázku 34 je zobrazen grafický průběh deformace vzorku v čase, vykreslený z dat získaných systémem Aramis 4M. Na ose x je vynesena délka experimentu v sekundách. Na ose y je vynesena deformace vzorku v procentech.



Obr. 34. – Zobrazení průběhu deformace vzorku v čase systémem Aramis 4M



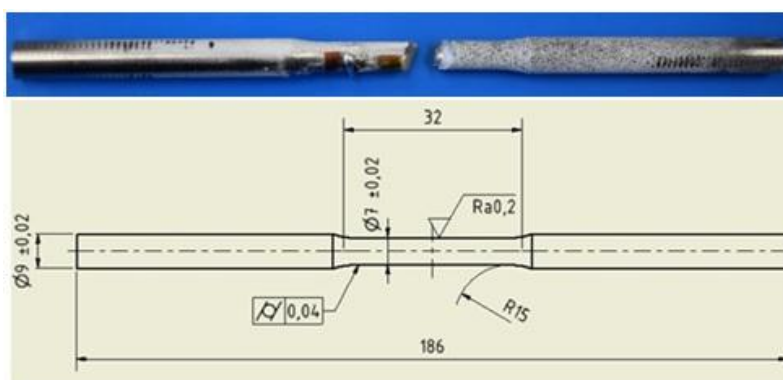
Obr. 35. – Graf tahové zkoušky oceli 15 142

Na obrázku 35 je zobrazen diagram tahové zkoušky experimentálního vzorku ze získaných hodnot laserovým extenzometrem laserXtens. Měřící základna laserového extenzometru byla nastavena stejně jako v případě systému Aramis 4M na 20 mm. Na tahovém diagramu je vyznačeno maximální prodloužení vzorku před přetržením 2,1 %.

5.3 Nízkocyklová únava oceli T671

Pro první experiment nízkocyklové únavy byl zvolen vzorek oceli T671. Podle [27] se jedná o martenzitickou precipitačně tvrzenou ušlechtilou ocel s velmi dobrou korozní odolností na vzduchu a ve slaných prostředích, odolností proti tečení, vysokou pevností a dobrou houževnatostí. Jak je popsáno ve [28] tato ocel má stejnou korozní odolnost jako ocel 304/304L, ale má větší hodnotu meze kluzu, proto se používá tam, kde by mechanické vlastnosti 304/304L nebyly dostatečné. Z opačného důvodu ocel T671 nahrazuje ocel 410 tam, kde nemá ocel 410 dostatečnou korozní odolnost. Obvyklá horní hranice teploty pro trvalý provoz je 370°C. Nejčastěji se tato ocel používá pro výrobu lopatek turbín, hřídele motoru, pístů a šroubů. Ocel T671 nemá označení českou nebo evropskou normou. Jak je popsáno ve [29] v mezinárodních normách ASTM je označována jako A564-XM25.

Nejčastěji je označována výrobcem jako Custom 450 nebo právě T671. Na obrázku 36 je zobrazen zkušební vzorek po přetržení a výkres zkušební vzorku. Základní rozměry vzorku jsou délka těla 32 mm, průměr těla vzorku 7 mm a celková délka vzorku je 186 mm.



Obr. 36. – Zkušební vzorek oceli T671 a výkres zkušební vzorku

V tabulce 4 je zobrazeno chemické složení vzorku oceli T671. Přesné chemické složení tohoto vzorku bylo zjištěno pomocí optického emisního spektrometru s doutnavým výbojem pro analýzu pevných vodivých a nevodivých vzorků s možností tvorby koncentračních profilů Horiba GD-Profiler 2. Tabulka 4 obsahuje hmotnostní podíly všech prvků v procentech. Největší zastoupení mají v této oceli hlavní legující prvky Cr-Ni-Cu-Mo.

Chemické složení [hm. %]		C	Cr	Ni	Cu	Mo	Mn	Nb	Si	S
Tabulkové složení	T671	min	-	14	5	1,25	0,5	-	8xC	-
		max	0,05	16	7	1,75	1	1	-	1
Vzorek	T671		0,04	14,2	6,33	1,29	0,64	0,47	0,41	0,4

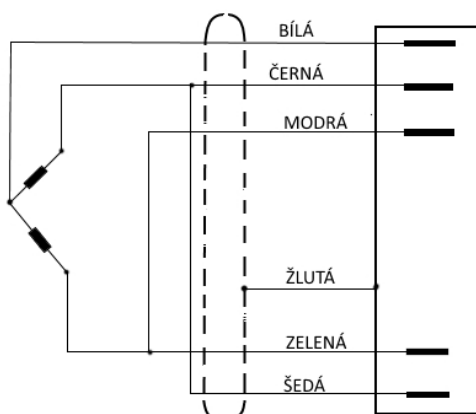
Tab. 4. – Chemické složení oceli T671

Nízkocyklové zatěžování vzorku bylo provedeno na servohydraulickém stroji od firmy Inova. Pro sledování průběhu deformace byl použit bezkontaktní systém Aramis 4M, tenzometrická ústředna Quantum X byla použita jako kontaktní metoda měření deformace a kontaktní extenzometr Epsilon 3542-012M-010-ST byl použit jak pro měření deformace, tak i pro řízení průběhu zkoušky. V prvním kroku se provedlo nalepení tenzometru na vzorek. Tenzometrem, který byl nalepen na vzorek, byl jednoosý tenzometr pro měření vysokých deformací 6/120LD20 od firmy HBM. Základní vlastnosti použitého tenzometru jsou uvedeny v tabulce 5 Podle [30] se tento typ tenzometrů aplikuje především při testech s deformací větší než 5 %, ale naproti tomu mají menší odolnost proti střídavému zatížení.

Povrch vzorku se před nalepením musel očistit, odmastit a zdrsnit smirkovým papírem. Na vzorek se tužkou nakreslila osová čára vzorku. Na tenzometr se poté nanoslo lepidlo a pomocí teflonové fólie se tenzometr přimáčknul na vzorek tak, aby pod tenzometrem nezůstala žádná vzduchová bublina. Při nalepení tenzometru bylo důležité dbát na to, aby osa tenzometru byla souběžná s osou vzorku. Pod tenzometr se stejným postupem nalepily pájecí vývody LS5, ke kterým byly připájeny vývody od spojovacího kabelu s měřicí ústřednou. Pro zapojení byla vybrána půlmostová konfigurace. Půlmostové zapojení je realizováno dvěma tenzometry v můstku a zbytek můstku je doplněn náhradními odpory v tenzometrické ústředně. Druhý tenzometr nebyl deformovaný, což znamená, že byl tento tenzometr použit pouze jako kompenzační. Tím byla zajištěna teplotní linearita během zkoušky. Na obrázku 37 je zobrazeno schéma zapojení do půlmostu.

6/120LD20		
Jmenovitý odpor	120 ± 0,6	[Ω ± %]
k - faktor	2,05 ± 1	[± %]
Délka mřížky	6	[mm]
Šířka mřížky	2,8	[mm]
Max. budící napětí	8	[V]

Tab. 5. – Základní vlastnosti použitého tenzometru

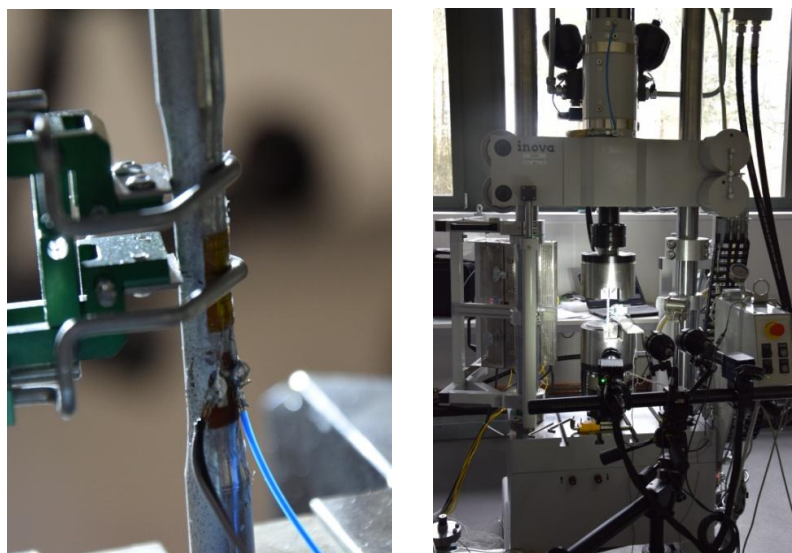


Obr. 37. – Schéma zapojení tenzometru do půlmostu [4]

Povrch vzorku na druhé straně byl připraven pro sledování deformace systémem Aramis 4M. Povrch vzorku se očistil a odmastil a poté se na něj nanasla bílá matná podkladová vrstva sprejem Dupli-color Aqua high quality lackspray a nechala se zaschnout. Poté se sprejem Dupli color Grafit 33 nanasla vrstva černé matné barvy. Protože snímaná oblast systémem Aramis byla při tomto testu větší, než při předchozí testu zvolila se hrubší zrnitost této vrstvy.

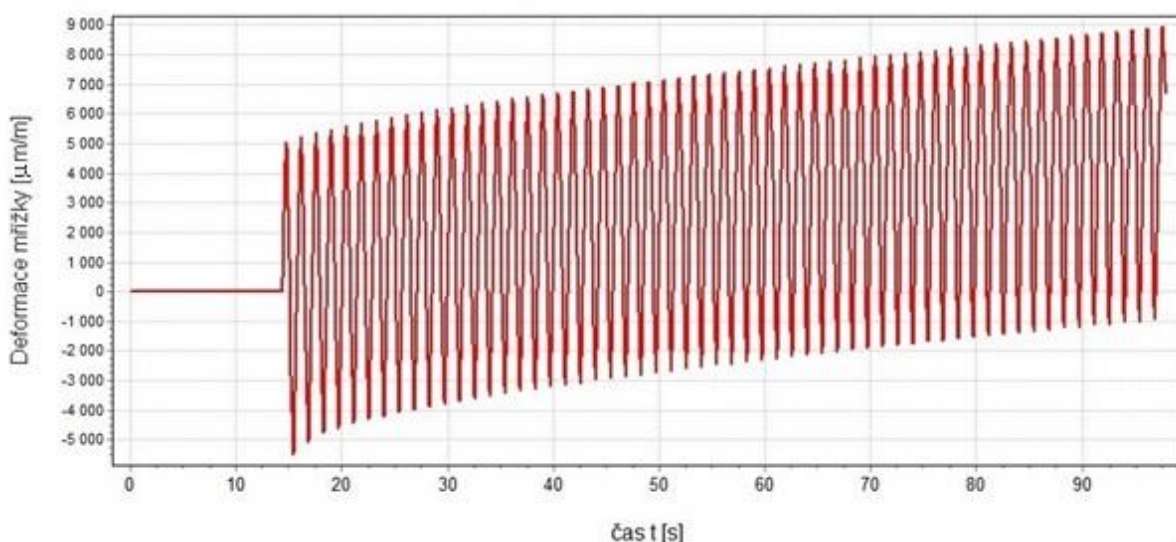
V dalším kroku bylo zapotřebí nastavit zařízení pro bezkontaktní měření Aramis 4M. V tomto kroku se postupovalo stejně jako v případě experimentu oceli P91. Zařízení se postavilo do správné polohy ke zkušebnímu stroji do správné vzdálenosti. Poté se provedlo nastavení polohy kamer na stativu, provedlo se jejich zaostření a zvolila se hodnota clon a rychlost závěrky kamer tak, aby obraz nebyl přeexponovaný nebo příliš tmavý. Poté se provedla kalibrace s použitím kalibrační destičky. Kamery se na otočném stativu namířily na kalibrační destičku. Destička se podle instrukcí měřicího softwaru natáčela v prostoru. Kalibrační odchylka udávala po kalibraci hodnotu 0,024 a nebyla tedy překročena doporučená maximální dovolená hodnota odchylky 0,07 pixelů.

Po kalibraci systému Aramis se jako poslední provedla příprava softwaru zkušebního stroje a extenzometru. Byl použit extenzometr s měřicí základnou 12 mm. Extenzometr se nasadil na zkušební vzorek do takové polohy, aby nepoškodil nalepený tenzometr na vzorku. Zároveň bylo potřeba natočit extenzometr tak, aby upevňovací ramena co nejméně zakrývala povrch vzorku, snímaného systémem Aramis. Na obrázku 38 je vlevo zobrazen zkušební vzorek, který je upevněn ve zkušebním stroji a napravo je zobrazena celá sestava připravená k měření. Na vzorku je nastříkaný pattern a je na něm upevněn tenzometr a extenzometr. Po upevnění extenzometru byly do řídicího softwaru zadány parametry pro provedení zkoušky. Tyto parametry byly: základní rozměry vzorku (průměr těla a délka), konstantní frekvence $f = 0,7$ Hz, což znamenalo nastavení doby jednoho cyklu na 1,43 s. Dále byl nastaven rozkmit $\Delta\varepsilon = 1,2$ %, amplituda $\varepsilon_a = 0,6$ %, tvar signálu trojúhelníkový a vzorkovací frekvence 200 Hz, rychlost deformace $\dot{\varepsilon} = 1,68$ %/s.



Obr. 38. – Zkušební vzorek upevněn v čelistech a připraven na zkoušku

Na obrázku 39 je zobrazen průběh deformace v čase naměřené tenzometrem. Tenzometr dokázal měřit deformaci po dobu 833 cyklů. Na ose y je vynesena deformace mřížky tenzometru v jednotkách $\mu\text{m/m}$. Posunem desetinné čárky získáme amplitudu deformace, kterou naměřil tenzometr. V prvních cyklech má graf charakter souměrně střídavého kmitání. Dle ČSN 420362 je toto kmitání charakterizováno součinitelem nesouměrnosti kmitu napětí $R=-1$. Součinitel souměrnosti kmitu napětí je dán podílem algebraických hodnot dolní a horní deformace kmitu. V dalších cyklech má kmitání nesouměrně střídavý průběh. Tento průběh je rovněž charakterizován součinitelem R , jehož hodnoty se pohybují od mínus jedné do nuly. Tenzometr naměřil amplitudu deformace $\epsilon_a = 0,5 \%$. V dalších cyklech je vidět posun střední hodnoty, což bylo zapříčiněno tím, že se materiál tenzometru dostal do oblasti plastické deformace. I v těchto cyklech zůstala naměřená amplituda deformace stejná.

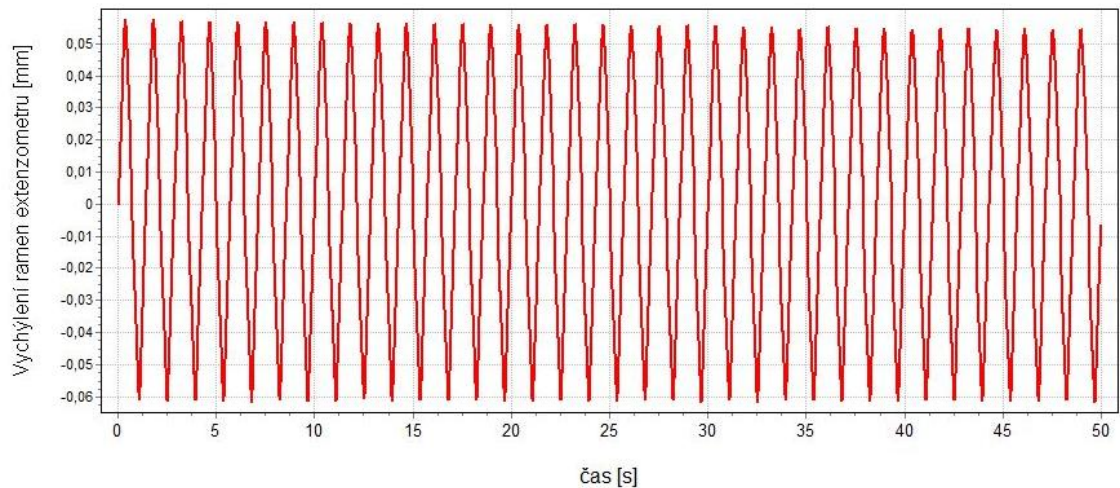


Obr. 39. – Průběh deformace v čase naměřené tenzometrem

Extenzometr funguje jako snímač polohy. Na obrázku 40 je znázorněn průběh vychýlení ramene extenzometru. Hodnoty vychýlení ramene budou využity společně s měřicí základnou extenzometru k zjištění naměřené deformace pomocí vzorce pro výpočet deformace

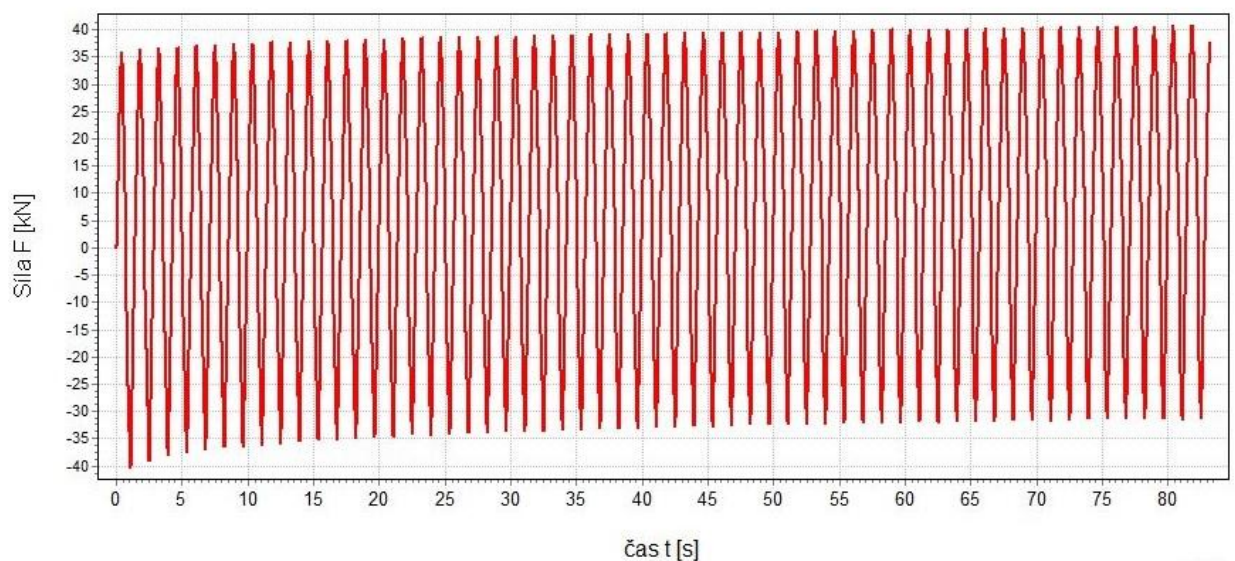
$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}, \quad (5.2)$$

kde l_0 je měřící základna extenzometru a l je součet měřící základny extenzometru a naměřené výchylky ramene extenzometru. Potom bude naměřená deformace, při maximální výchylení ramene extenzometru 0,06 mm; 0,5 %.

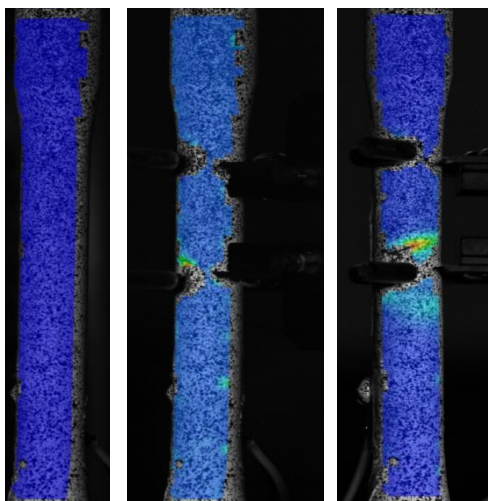


Obr. 40. – Průběh deformace naměřené extenzometrem

Na obrázku 41 je zobrazen průběh síly, který byl vykreslen z hodnot, které zaznamenal software extenzometru. Maximální síla byla při experimentu 40,81 kN, minimální síla byla -31 kN a střední hodnota síly byla 35,98 kN. Z hodnot těchto sil a z průměru zkušebního vzorku vypočítal software napětí ve vzorku během této části experimentu. Maximální tahové napětí, které vzorek přenášel, bylo 1060 MPa, maximální tlakové napětí bylo 805 MPa a střední hodnota napětí byla 935 MPa. K porušení vzorku došlo při působení síly 39,7 kN a napětí 1031 MPa. Extenzometr dokázal naměřit průběh deformace a síly při všech 2247 cyklech experimentu.

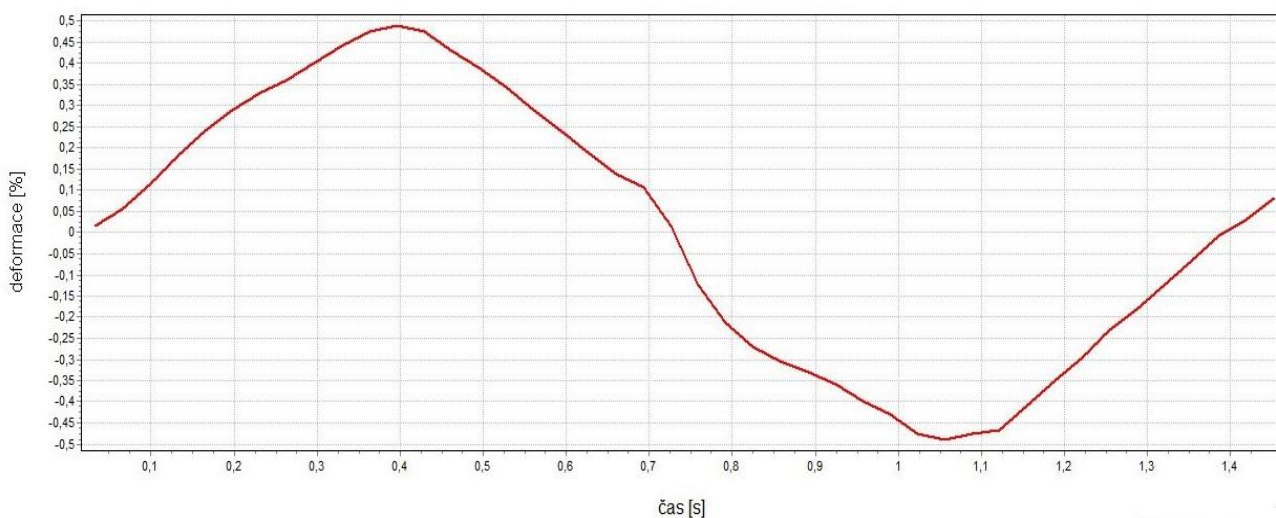


Obr. 41. – Průběh síly naměřené extenzometrem



Obr. 42. - Barevná mapa na snímaném vzorku systémem Aramis

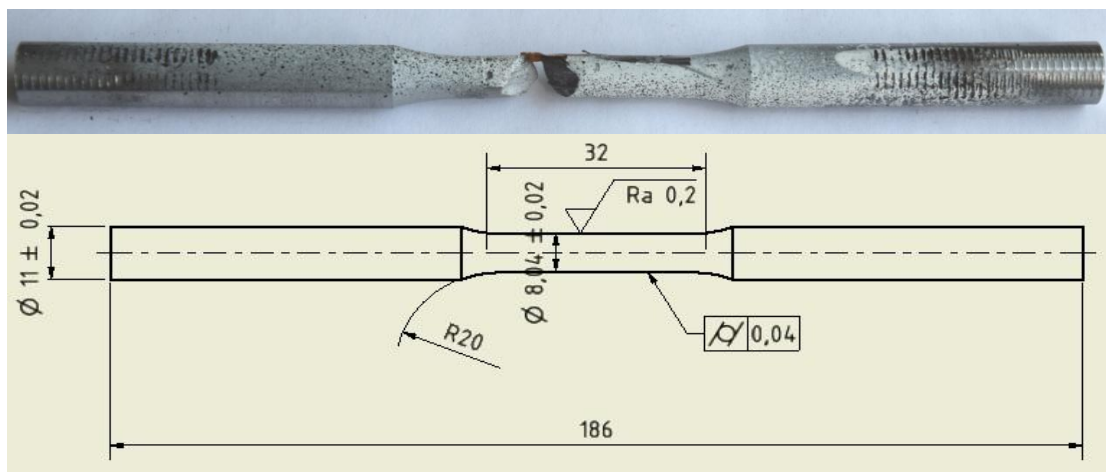
Na obrázku 42 je zkušební vzorek snímaný systémem Aramis. Nalevo je na vzorku barevná mapa před upevněním extenzometru. Na prostředním snímku je vzorek v průběhu zatěžování. Kolem upínacích ramen vznikly v barevné mapě hluchá místa, v kterých nelze měřit deformaci. I přes upínací ramena extenzometru bylo lokalizováno místo s vyšší koncentrací napětí. Na obrázku vpravo je zkušební vzorek po vzniku lomu. Lom lze vidět nad spodní upínacím ramenem extenzometru. Pro sledování deformace byla nastavena frekvence 30 snímků za sekundu. Maximální počet snímků, které dokáže systém nasnímat v kuse, závisí na velikosti RAM počítače. Tento počítač umožnil nasnímat v kuse přibližně 3100 snímků. To znamená, že po 72 cyklech se snímání zastavilo a nasnímané snímky musel software zpracovat a poté mohlo být snímání znovu spuštěno. Na obrázku 43 je zobrazen průběh deformace při jednom cyklu z naměřených dat systémem Aramis. Z grafu je patrné, že systém Aramis 4M naměřil při tomto experimentu amplitudu deformace $\epsilon_a = 0,49\%$.



Obr. 43. – Graf jednoho cyklu naměřeného systémem Aramis 4M (T671)

5.4 Nízkocyklová únava oceli T552

Pro druhý experiment nízkocyklové únavy byl zvolen vzorek oceli T552. Jak je popsáno v [31] Jedná se o temperovanou ocel, která má dobrou odolnost proti korozi a odolnost proti tečení. V porovnání s ocelí T671 má horší mechanické vlastnosti. Tato ocel se používá stejně jako ocel T671 k výrobě vysoce namáhaných lopatek turbín, šroubů, hřídelí a podobných komponent. Na obrázku 44 je výkres vzorku oceli T552, který měl průměr 8,04 mm a délku těla 32 mm.



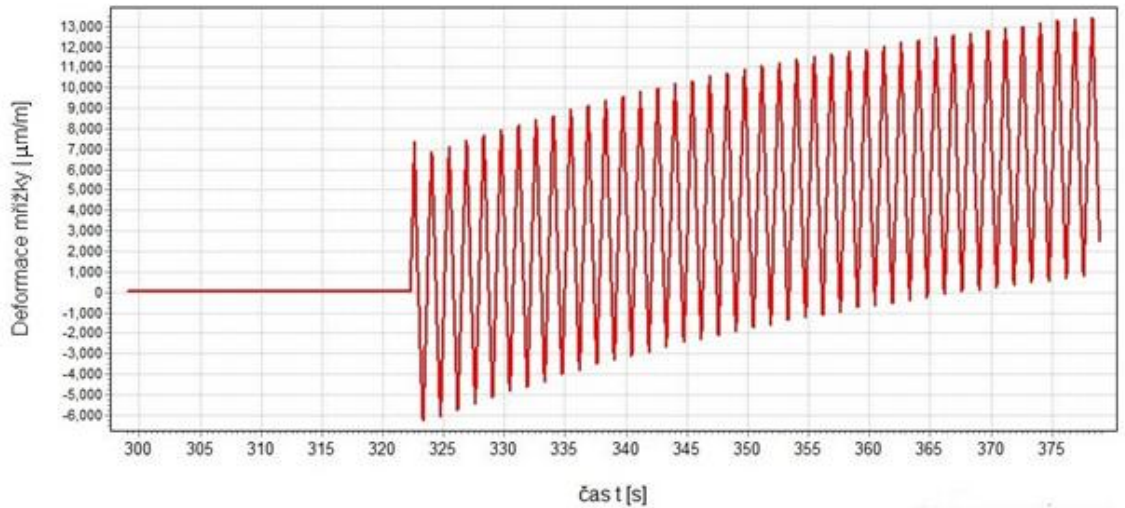
Obr. 44. – Výkres vzorku oceli T552

Deformace byla při této zkoušce měřena bezkontaktním systémem Aramis 4M, tenzometrickou ústřednou Quantum X a kontaktním extenzometrem Epsilon 3542-012M-010-ST, který byl použit také k řízení průběhu zkoušky. Při přípravě vzorku se postupovalo stejně jako při přípravě vzorku oceli T671. Na jednu stranu vzorku byl nastříkán kontrastní pattern dané zrnitosti pro snímání deformace bezkontaktním systémem Aramis 4M. Z druhé strany byl poté nalepen jednoosý tenzometr pro měření vysokých deformací 6/120LD20 a pájecí vývody LS5 od firmy HBM, ke kterým byly připájeny vývody od spojovacího kabelu s tenzometrickou ústřednou Quantum X. Po upnutí vzorku do zkušebního stroje Inova se na vzorek upevnil kontaktní extenzometr. Do softwaru zkušebního stroje byly zadány parametry pro provedení zkoušky.

Tyto parametry byly kromě rozměru vzorku totožné s experimentem T671: konstantní frekvence $f = 0,7$ Hz, což znamenalo nastavení doby jednoho cyklu na 1,43 s. Dále byl nastaven rozkmit $\Delta\varepsilon = 1,2$ %, amplituda $\varepsilon_a = 0,6$ %, tvar signálu trojúhelníkový a zorkovací frekvence 200 Hz, rychlost deformace $\dot{\varepsilon} = 1,68$ %/s.

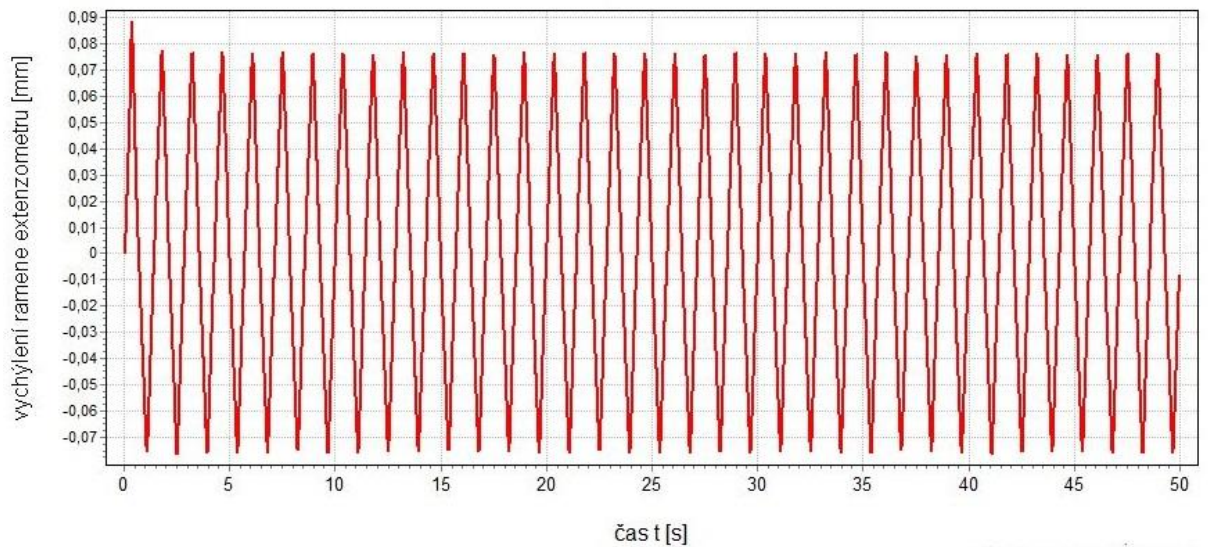
Na obrázku 45 je znázorněna deformace kovové mřížky tenzometru. Na ose y je vynesena deformace mřížky tenzometru v jednotkách $\mu\text{m}/\text{m}$. Posunem desetinné čárky získáme amplitudu deformace, kterou naměřil tenzometr. V prvních dvou cyklech naměřil tenzometr amplitudu deformace v tahu $\varepsilon_a = 0,64$ %

V dalších cyklech je vidět posun střední hodnoty, což bylo zapříčiněno tím, že se materiál tenzometru dostal do oblasti plastické deformace. I v těchto cyklech zůstala naměřená amplituda deformace stejná. Tenzometr dokázal měřit deformaci po dobu 301 cyklů.

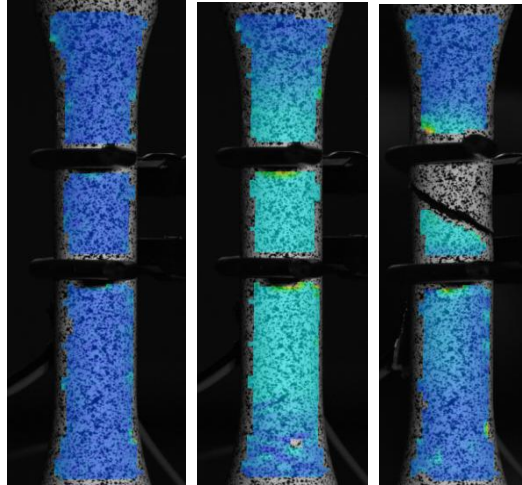


Obr. 45. – Průběh deformace naměřené tenzometrem

Na obrázku 46 je zobrazen průběh vychýlení ramen extenzometru. Z tohoto vychýlení se pomocí vzorce 5.2 vypočítá deformace vzorku. Během testu se výchylka ramen pohybovala lehce přes 0,07 mm. Při této výchylce a měřící základně 12 mm to znamená, že extenzometr naměřil amplitudu deformace $\epsilon_a = 0,63 \%$. K porušení vzorku došlo podle dat z extenzometru po 657 cyklech.

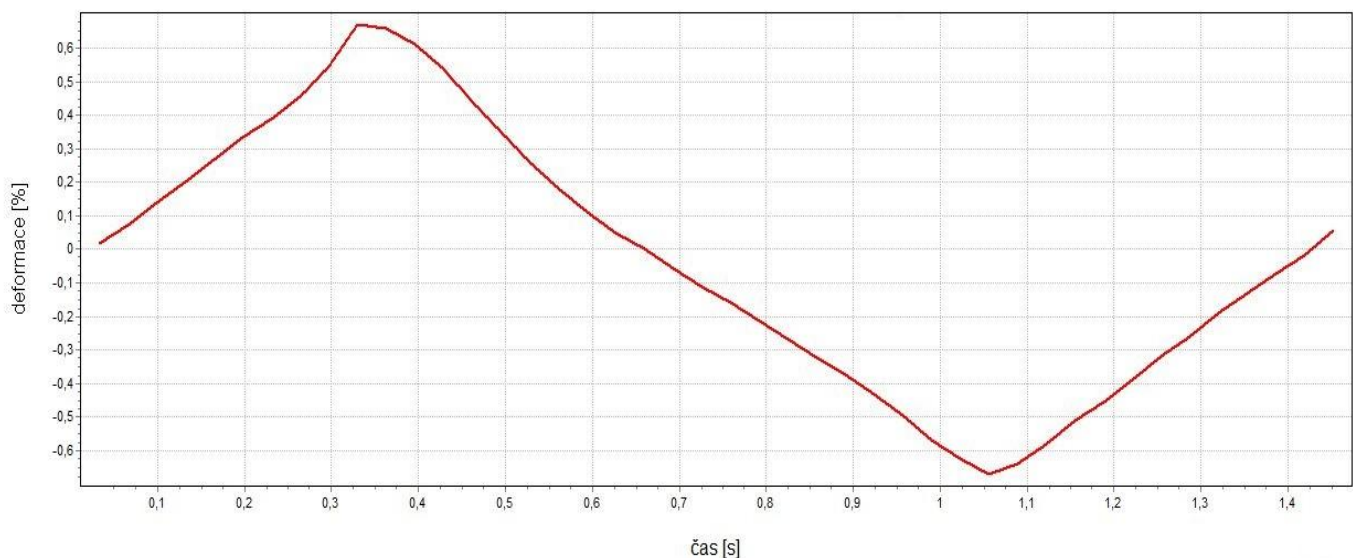


Obr. 46. – Průběh vychýlení ramen extenzometru



Obr. 47. – Vzorek při zkoušce snímáný systémem Aramis 4M

Na obrázku 47 je zkušební vzorek snímáný systémem Aramis. Nalevo je na vzorku barevná mapa před spuštěním zkoušky. Sytě modrá barva značí nulovou deformaci. Na prostředním snímku je vzorek během zkoušky při maximální deformaci. Na posledním snímku je vzorek po přetržení. Lom lze vidět mezi upínacími rameny extenzometru. Upínací ramena extenzometru zakrývají části vzorku. V těchto místech nelze měřit deformaci vzorku. Pro sledování deformace byla nastavena frekvence 30 snímků za sekundu. Na obrázku 48 je zobrazen průběh deformace jednoho cyklu naměřeného systémem Aramis 4M. Systém Aramis 4M naměřil amplitudu deformace při tomto experimentu $\epsilon_a = 0,67 \%$.



Obr. 48. - Graf jednoho cyklu naměřeného systémem Aramis 4M (T552)

5.5 Porovnání dosažených výsledků

Při experimentech byl zjišťován průběh deformace na třech různých vzorcích oceli. Experimenty byly provedeny na zkušebních strojích a u každého vzorku byly použity kombinace kontaktních a bezkontaktních metod měření deformace. V tabulce 6 jsou znázorněny jednotlivé experimenty, použité kombinace měřících metod pro každý experiment a dosažené výsledky.

Experiment	Zkušební zařízení	Měřící zařízení	Dosažené výsledky deformace
Statická zkouška tahem oceli P91	Zwick/Roell	laserXtens (vzorek 1)	20%
		Aramis 4M (vzorek 1)	24,20%
		laserXtens (vzorek 2)	24,80%
Statická zkouška tahem 15 142	Zwick/Roell	laserXtens	2,10%
		Aramis 4M	3,50%
Nízkocyklová únava oceli T671	Inova	Kontaktní extenzometr	0,50%
		Tenzometrická ústředna	0,50%
		Aramis 4M	0,49%
Nízkocyklová únava oceli T552	Inova	Kontaktní extenzometr	0,63%
		Tenzometrická ústředna	0,64%
		Aramis 4M	0,67%

Tab. 6. – Souhrn provedených experimentů, zkušebních a měřících zařízení a dosažených výsledků

5.5.1 Zkouška tahem oceli P91

V případě statické zkoušky tahem byly porovnávány hodnoty tažnosti získané systémem Aramis 4M a laserovým extenzometrem LaserXtens. Hodnota tažnosti 20 % je tažnost prvního vzorku oceli P91 naměřená laserovým extenzometrem LaserXtens. Při této zkoušce byla deformace zároveň měřena systémem Aramis, který naměřil deformaci 24,2 %. Hodnoty tažnosti jsou dále porovnávány s druhým vzorkem oceli P91, jehož zkouška nebyla součástí této bakalářské práce. U tohoto vzorku byla deformace měřena jen laserovým extenzometrem laserXtens a měla hodnotu 24,8 %.

V praxi se ukázalo, že hodnota tažnosti závisí na velikosti počáteční měřené délky a na místě vytvoření krčku na vzorku. Kromě této závislosti vznikla odlišná hodnota tažnosti naměřené laserovým extenzometrem při druhém testu také z důvodu nastříkaného patternu na vzorku pro systém Aramis. Oceli mají obecně dobrou odrazivost světla. Pattern odráží daleko méně světla, kvůli čemuž laser laserového extenzometru nedokázal přesně vybrat body na povrchu vzorku, které měly být během zkoušky sledovány a z nichž systém průběžně počítá deformaci.

Tažnost není přesně vzata nejvhodnější hodnotou pro posuzování deformačních schopností materiálu. Pro porovnání vzorků je vhodnější použití rovnoměrné tažnosti A_g , která charakterizuje velikost maximální rovnoměrné deformace materiálu a vypočte se jako

$$A_g = \frac{\Delta l_g}{l_0} 100 = [\%]. \quad (5.1)$$

Ve vztahu 5.1 je Δl_g přírůstek délky do velikosti maximální homogenní deformace a vypočte se jako

$$\Delta l_g = l_g - l_0, \quad (5.2)$$

kde l_g je délka měřeného úseku při dosažení maximální rovnoměrné (homogenní) deformace a l_0 je původní měřená délka.

Vypočítané rovnoměrné tažnosti vzorků oceli P91 jsou znázorněny v tabulce 7. Hodnoty rovnoměrné tažnosti se od sebe liší jen velmi málo, protože hodnoty nejsou ovlivněny místním zaškracením vzorku, tedy vytvořením krčku. Největší měřená tažnost byla naměřena laserovým extenzometrem laserXtens u vzorku jehož zkouška nebyla součástí této bakalářské práce. Rovnoměrné tažnosti naměřené laserovým extenzometrem a systémem Aramis 4M na stejném vzorku se oproti porovnání hodnot celkové tažnosti liší jen nepatrně.

Měřicí zařízení	Rovnoměrná tažnost A_g	Celková tažnost A
laserXtens (vzorek 1)	8,88%	20%
Aramis 4M (vzorek 1)	8,96%	25%
laserXtens (vzorek 2)	9,01%	24,80%

Tab. 7. – Hodnoty rovnoměrné a celkové tažnosti pro ocel P91

5.5.2 Zkouška tahem oceli 15 142

V případě statické zkoušky tahem oceli 15 142 byly porovnávány hodnoty tažnosti získané systémem Aramis 4M a laserovým extenzometrem LaserXtens. Laserovým extenzometrem laserXtens byla naměřena tažnost 2,1 %. Při této zkoušce byla deformace zároveň měřena systémem Aramis, který naměřil tažnost 3,5 %. Pro lepší porovnání naměřených hodnot bude využita stejně jako u tahové zkoušky oceli P91 rovnoměrná tažnost A_g .

V tabulce 8 jsou zobrazeny hodnoty rovnoměrné tažnosti, které nejsou ovlivněny místním zaškracením vzorku. Oproti hodnotám celkové tažnosti se hodnoty rovnoměrné tažnosti liší nepatrně.

Měřicí zařízení	Rovnoměrná tažnost A_g	Celková tažnost A
laserXtens	0,25%	2,10%
Aramis 4M	0,40%	3,50%

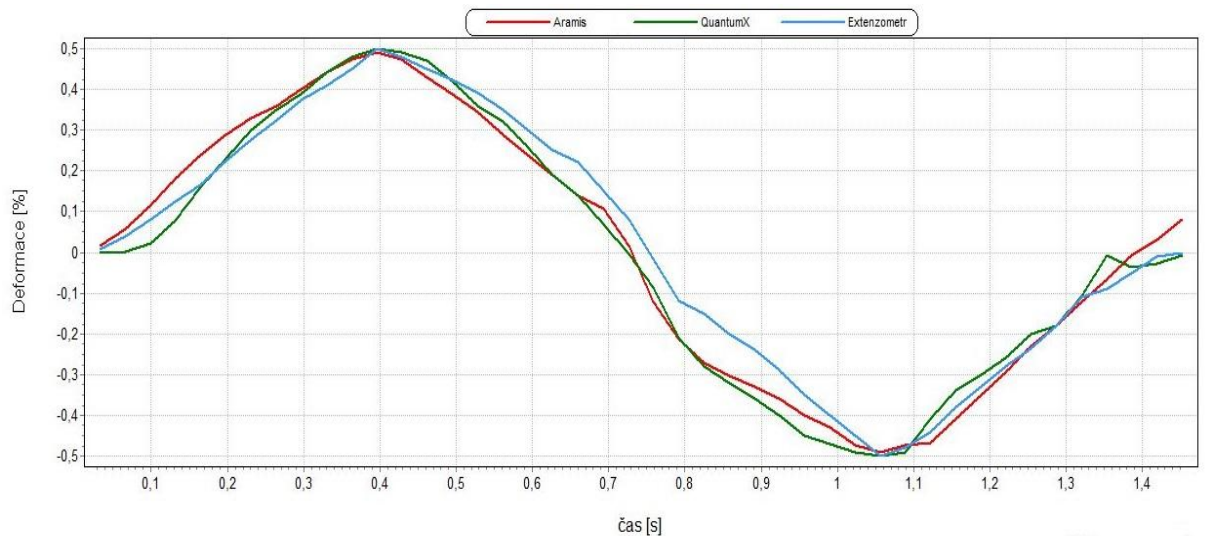
Tab. 8. Hodnoty rovnoměrné a celkové tažnosti pro ocel 15 142

5.5.3 Nízkocyklová únava oceli T671

Při nízkocyklovém zatěžování vzorku oceli T671 byla deformace měřena kontaktním extenzometrem, tenzometrickou ústřednu QuantumX a bezkontaktním systémem Aramis 4M. Pro tento experiment byla nastavena amplituda deformace $\epsilon_a = 0,6$ %. Při měření tenzometrickou ústřednu QuantumX a kontaktním extenzometrem byly naměřeny totožné hodnoty deformace $\epsilon_a = 0,5$ %. U tenzometrického měření došlo střídavou plastickou deformací mřížky tenzometru k porušení mřížky tenzometru. Z tohoto důvodu nenaměřil tenzometr deformaci vzorku až do jeho porušení, ale jen určitou část experimentu. Poměrem počtu naměřených cyklů tenzometrem k celkovému počtu cyklů do porušení vzorku je možné určit poměrnou životnost tenzometru. Při tomto experimentu měřil tenzometr deformaci po dobu 833 cyklů z celkových 2247. Tedy poměrná životnost tenzometru při tomto experimentu byla 0,37. Z tohoto hlediska je kontaktní metoda měření deformace s použitím kontaktního extenzometru výhodnější. Kontaktní extenzometr byl při tomto experimentu použit k měření deformace, ale i k jejímu řízení. Deformace tak byla měřena kontaktním extenzometrem po celý čas experimentu a mohl být upevněn na vzorku i v momentu porušení vzorku, aniž by došlo k zničení samotného extenzometru.

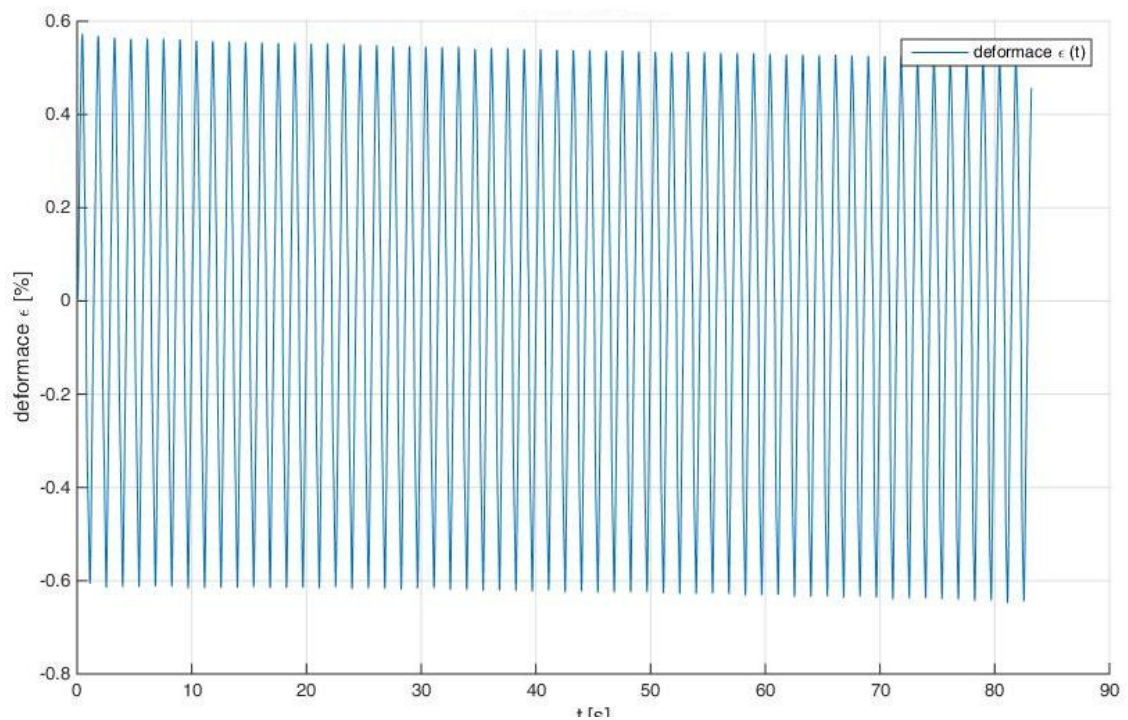
Bezkontaktní systém Aramis 4M naměřil deformaci 0,49 %. Pro systém Aramis se podobně jako v případě tenzometrické ústředny QuantumX ukázalo použití této metody pro dlouhodobější měření deformací nevhodné. Pro plynulé sledování průběhu rychlejšího průběhu deformace byla nastavena frekvence snímání 30 snímků za vteřinu.

Nastavení vyššího počtu snímků za sekundu při dlouhodobém měření znamená velké množství dat a snímků, které musí být zpracovány a operační paměť počítače tak neumožňuje zaznamenávat snímky po delší dobu. Na obrázku 49 je zobrazen průběh čtvrtého cyklu experimentu oceli T671.



Obr. 49. – Grafické porovnání dat získaných z měření deformace oceli T671

Deformace byla vypočítána ze vzorce 5.2, přičemž při zadání měřící báze extenzometru 12 mm, která byla použita, vyšla amplituda deformace 0,5 %, což byla skutečná deformace vzorku. Jelikož byla do softwaru zadána báze extenzometru 10 mm, naměřil software amplitudu deformace 0,6 % pro tuto hodnotu báze. Podle této báze řídil software deformaci. Na obrázku 50 je zobrazen průběh deformace při použití báze 10 mm pro výpočet deformace. Zde software vypočítal amplitudu deformace 0,6 %.



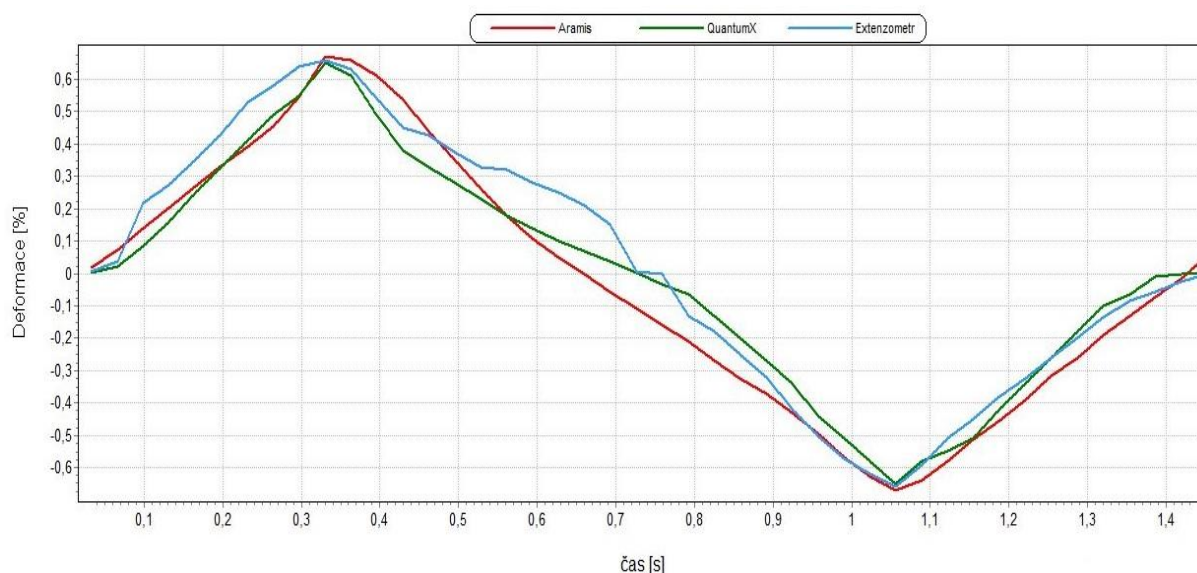
Obr. 50. – Průběh deformace při aplikaci báze 10 mm

5.5.4 Nízkocyklová únava oceli T552

Při nízkocyklovém zatěžování vzorku oceli T552 byla deformace měřena stejně jako v případě nízko cyklového zatěžování oceli T671 kontaktním extenzometrem, tenzometrickou ústřednou QuantumX a bezkontaktním systémem Aramis 4M. Amplituda deformace byla opět nastavena na 0,6 %. Kontaktní extenzometr naměřil během zatěžování vzorku $\epsilon_a = 0,63 \%$ a tenzometrická ústředna QuantumX naměřila amplitudu deformace $\epsilon_a = 0,64 \%$. Také při tomto experimentu byl tenzometr plasticky střídavě deformován, čímž došlo po určitém čase k porušení mřížky tenzometru. Tenzometr tak naměřil deformaci u 301 cyklů z celkových 657 cyklů, což znamená, že poměrná životnost tenzometru byla při tomto experimentu 0,46. Kontaktní extenzometr byl použit také u tohoto experimentu jak k měření deformace, tak k řízení jejího průběhu a naměřil průběh deformace u všech 657 cyklů experimentu.

Bezkontaktní systém Aramis 4M naměřil při tomto experimentu deformaci 0,67 %. Podobně jako v případě experimentu na oceli T671 i zde muselo být nastaveno snímání 30 snímků za sekundu, kvůli rychlému průběhu deformace. Celkový počet snímků, které byl schopen systém Aramis nasnímat najednou, nebyl dostatečný pro sledování celého průběhu experimentu. Pro sledování delších procesů je možné provést optimalizaci snímání. Jeden způsob optimalizace spočívá ve snížení frekvence snímání. Snížení frekvence však doprovází nepříznivé jevy, které jsou popsány ve [32]. Vzorkování s nižší frekvencí, než je potřebná frekvence může způsobit jev zvaný "folding – překládání". Tento jev způsobí, že se ve Fouierově obrazu signálu objeví jiné frekvence, než které signál ve skutečnosti obsahuje.

Další způsob optimalizace spočívá ve snížení kvality obrazu. Pro dosažení přesných hodnot je však takové snížení kvality nežádoucí. Na obrázku 51 je zobrazen průběh čtvrtého cyklu experimentu oceli T552.



Obr. 51. - Grafické porovnání dat získaných z měření deformace oceli T552

6 Diskuze výsledků

Pro první experiment byl vybrán vzorek oceli P91. Jednalo se o martenzitickou žárovečnou legovanou ocel. Na této oceli byla provedena statická zkouška tahem na experimentálním zařízení Zwick. Deformace byla při tomto experimentu měřena dvěma bezkontaktními metodami. Pro zkoušku tahem nebyly použity kontaktní metody měření deformace především kvůli velikosti deformace vzorku při tomto experimentu. Při statické zkoušce tahem byla maximální naměřená deformace vzorku až 24,8 %. Při měření takto velkých deformací by kontaktní metoda s použitím tenzometrické ústředny QuantumX neměla smysl z důvodu použitelnosti, neboť z důvodu malého průřezu vinutí měřící mřížky dojde k přenosu mnohonásobně vyššího napětí.

Při tomto experimentu se ukázalo, že použití měření deformace systémem Aramis a laserovým extenzometrem laserXtens najednou ovlivňuje dosažené výsledky. Především u výsledků dosažených laserovým extenzometrem, jehož výsledky byly ovlivněny patternem na povrchu vzorku. Dále bylo zjištěno, že hodnoty tažnosti se liší daleko více po vzniku krčku na vzorku. Poloha vzniku krčku a velikost počáteční měřené délky totiž ovlivňuje celkovou výslednou tažnost vzorku. Z toho důvodu byla pro porovnání deformace vzorku použita rovnoměrná tažnost, která ukázala shodu naměřených výsledků.

Pro druhý experiment statické zkoušky tahem byl použit vzorek oceli 15 142. Vzorek byl vyroben práškovou metodou. Deformace byla při tomto experimentu měřena jako u prvního laserovým extenzometrem laserXtens systémem Aramis 4M. Výsledky druhé tahové zkoušky potvrdily závěry z prvního experimentu statické zkoušky tahem. Jako směrodatnější se ukázaly výsledky rovnoměrné tažnosti, které byly 0,25 respektive 0,4 a lišily se jen nepatrně. Odchylna hodnot byla způsobena komplikovaným nastavením laserového extenzometru laserXtens kvůli patternu na povrchu vzorku.

Pro první experiment nízkocyklového únavového zatěžování byl použit vzorek oceli T671. Jednalo se o martenzitickou precipitačně tvrzenou ušlechtilou ocel. Při tomto experimentu byl průběh deformace řízen kontaktním extenzometrem, který byl připojen k servohydraulickému zkušebnímu zařízení Inova. V softwaru extenzometru byla nastavena amplituda deformace vzorku $\epsilon_a = 0,6 \%$, čímž byla dána skutečná deformace vzorku a naměřené hodnoty se měly blížit co nejvíce tomuto číslu. Při tomto experimentu byly použity kontaktní metody měření deformace s použitím tenzometrické ústředny QuantumX a kontaktního extenzometru. Obě tyto metody naměřily amplitudu deformace $\epsilon_a = 0,5 \%$. Na obrázku 32, na kterém je graf z hodnot získaných tenzometrickou ústřednou QuantumX lze pozorovat posouvání střední hodnoty naměřených dat. Tento posun znamená, že graf přechází ze souměrně střídavého kmitání na kmitání nesouměrně střídavé. Posouvání střední hodnoty je charakteristický děj při tenzometrickém měření cyklického namáhání a nemá žádný vliv na přesnost naměřených hodnot. Jako bezkontaktní metoda měření deformace byl použit systém Aramis 4M. Při této metodě byla naměřena amplituda deformace $\epsilon_a = 0,49 \%$. Odchylna výsledků naměřené deformace od nastavené amplitudy nebyla dána nepřesností měření, ale chybně zadanou bází extenzometru do softwaru. Namísto použité báze 12 mm byla do softwaru zadaná báze extenzometru 10 mm.

Nastavení chybné báze extenzometru ovlivnilo skutečnou deformaci vzorku. Zjištění těchto nedostatků vedlo k nápravě u testu oceli T552, u kterého byl vzorek deformován se správnou amplitudou.

Pro druhý experiment nízkocyklového únavového zatěžování byl použit vzorek oceli T552. Jednalo se o temperovanou ocel. Také při tomto experimentu byl průběh deformace řízen kontaktním extenzometrem, který byl připojen k servohydraulickému stroji Inova. Amplituda deformace byla nastavena na $\epsilon_a = 0,6$ %. Použité metody měření deformace byly při tomto experimentu stejné jako u experimentu oceli T671. Kontaktní extenzometr naměřil amplitudu deformace $\epsilon_a = 0,63$ %. Tenzometrická ústředna QuantumX naměřila amplitudu deformace $\epsilon_a = 0,64$ % a bezkontaktní metoda měření deformace s použitím systému Aramis 4M naměřila amplitudu deformace $\epsilon_a = 0,67$ %. U tenzometrického měření lze opět na obrázku 36 pozorovat posun střední hodnoty.

7 Závěr

V rámci této bakalářské práce byly provedeny experimenty, při kterých byla měřena deformace kontaktním a bezkontaktním způsobem. V teoretické části této bakalářské práce byly důkladně popsány použité metody měření deformace těles a rovněž byl sepsán přehled využívaných technologií měření deformace. Průběh deformace byl měřen kombinací bezkontaktního laserového extenzometru laserXtens, bezkontaktního systému Aramis 4M, kontaktního extenzometru Epsilon řady 3542 a axiálním tenzometrem 6/120LD20. V první řadě došlo k přípravě vzorků. V případě kontaktního měření s použitím tenzometru se jednalo o očištění povrchu vzorku daným přípravkem a zdrsnění smirkovým papírem. Poté se na takto očištěný vzorek aplikoval tenzometr a svorkovnice. Přiletovaly se vývody a tenzometr se zapojil do můstku k měřicí ústředně QuantumX. Pro bezkontaktní měření systémem Aramis se očistil povrch vzorku a sprejem se vytvoří kontrastní pattern. Pattern se aplikoval speciální technikou sprejování, kdy se sprej škrtí prstem a mění se vzdálenost a úhel dopadu spreje. První experiment byl proveden na stroji pro zkoušku tahem Zwick a další dva experimenty byly provedeny na servohydraulickém zkušebním stroji Inova. Testy byly provedeny pro různé typy oceli.

Pro první experiment byl použit vzorek oceli P91. Na této oceli byla provedena statická zkouška tahem a deformace byla při této metodě měřena laserovým extenzometrem laserXtens a bezkontaktním systémem Aramis 4M. Naměřená celková tažnost byla u tohoto experimentu nevhodná k porovnání naměřených hodnot, proto se pro porovnání použily hodnoty rovnoměrné tažnosti. Hodnoty rovnoměrné tažnosti vykazaly dobrou shodu výsledků.

Druhý experiment statické zkoušky tahem byl proveden na vzorku oceli 15 142. Deformace byla měřena laserovým extenzometrem laserXtens a bezkontaktním systémem Aramis 4M. Pro porovnání byly rovněž použité hodnoty rovnoměrné tažnosti, které vykazovaly lepší shodu, než hodnoty celkové tažnosti.

Jako první experiment nízkocyklové únavy byl proveden test oceli T671. Deformace byla při tomto experimentu měřena systémem Aramis 4M, kontaktním extenzometrem a tenzometrickou ústřednou QuantumX. Kontaktní extenzometr a tenzometrická ústředna naměřily shodné hodnoty. Bezkontaktní systém Aramis se lišil od hodnot naměřených kontaktními metodami jen nepatrně.

Posledním experimentem bylo rovněž porovnání měření deformace během nízkocyklového zatěžování oceli T552. Deformace byla při tomto experimentu měřena stejnou kombinací měřících metod jako u experimentu oceli T671. U tohoto experimentu byly hodnoty ze všech metod téměř shodné a lišily se jen nepatrně. Jako relativně přesná data se v tomto případě jeví měření tenzometrické ústředny, nicméně použitelnost pro tuto aplikaci je značně omezená. Porovnáním poměrné životnosti tenzometrů při obou testech se došlo k závěru, že poměrná životnost tenzometru klesá s rostoucím počtem cyklů experimentu. Bylo prokázáno, že tenzometrická měření lze dlouhodobě používat pouze na experimenty pohybující se do meze kluzu a lehce nad tuto hodnotu. Rovněž v případě DIC je test omezen operační pamětí počítače, a tedy tato metoda není vhodná pro dlouhodobá měření. Obrovská výhoda této metody spočívá v 3D analýze v případě verifikace a sestavování výpočtových modelů.

Hodnoty, o které se všechny metody lišily, byly nepatrné a vliv na použití určité metody má především cena a druh experimentu, na který danou metodu měření použít.

8 Seznam použité literatury

- [1] Růžička, M., Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí, skripta ČVUT, 1998
- [2] Soukup, K., Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace, Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2013
- [3] Zwick/Roell, Extensometers for materials testing machines, 2011
- [4] Janoušek, J., Návod na aplikaci tenzometrické ústředny QuantumX, Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2014
- [4] Pfrogner, F., Mojžíš, A., Základy teorie a technologie tváření kovů, Západočeská univerzita v Plzni, 1980
- [5] Hoffman, K., An introduction to Measurements using strain gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989
- [6] Dewesoft X, Strain measurement tutorial, Slovenia, 2013
- [7] Kadlec, K., Kmínek, M., Měřicí a řídicí technika, Vysoká škola chemicko technologická v Praze, 2000
- [8] Vlk, M., Houfek, L., Hlavoň, P., Krejčí, P., Kotek, V., Klement, J., Experimentální mechanika, Vysoké učení technické Brno, 2003
- [9] Klement, J., Plánička, F., Vlk, M., Modelová podobnost, elektrická odporová tenzometrie, experimentální určování zbytkových napětí, vyhodnocení experimentálně získaných dat, Západočeská univerzita v Plzni, 2004
- [10] Janoušek, J., Balda, M., Strain gage measurements for accurate yield point determination, Applied Mechanics and Materials Vol. 486, 2014
- [11] Konopík, P., Džugan, J., Rund, M., Dynamic tensile and micro-tensile testing using DIC Method, conference proceedings METAL 2014, 21.-23. května, Brno
- [12] Konsens public relations, Instron at control, Pfungstadt, 2011
- [13] KSM vision, digital image correlation, Polsko, 2013
- [14] GOM mbH, Aramis optical, Německo, 2005
- [15] GOM mbH, Aramis software, Německo, 2015
- [16] Zwick/Roell, Product informatik Z100/Z250 SH

- [17] Návod a instrukce k servohydraulickým zkušebním zařízením, interní manuál, Řež s.r.o.
- [18] Axial extensometers, Epsilon technology corp, USA, 2016
- [19] Zebicon, Digital Image Correlation, Dánsko, 2013
- [20] Graziani, L., Kneć, M., Sadowski, T., D'orazio, M., Lenci, S., Measurement of R-curve in clay brick blocks using optical measuring technique, Engineering Fracture Mechanics, Elsevier, May 2014
- [21] Czaderski C., Rabinovitch O., Structural behavior and inter-layer displacements in CFRP plated steel beams – optical measurements, analysis, and comparative Verification, Compos Part B-Engng 2010
- [22] Becker TH., Mostafavi M., Tait RB., Marrow TJ., An approach to calculate the integral by digital image correlation displacement field measurement, Fatigue Fract Engng Mater Struct, 2012
- [23] Brynk T., Laptiev A., Tolochyn O., Pakiela Z., The method of fracture toughness measurement of brittle materials by means of high speed camera and DIC, Comput Mater Sci 2012;
- [24] Konopík, P., Džugan, J., Rund, M., Determination of fracture toughness in the upper shelf region using small sample test techniques, conference proceedings METAL 2015, 3-5. června, Brno
- [25] Purmenský J., Foldyna V., Matocha K., Perspektivní žáropevné oceli a jejich vlastnosti a praktické využití, Metal, Hradec nad Moravicí, 2006
- [26] Hakl, J., Vlasák, T., Kudrman, J., Creepové vlastnosti a struktura oceli P91, Metal, Hradec nad Moravicí, 2008
- [27] Böhler Uddeholm corp, Böhler T671 (Custom 450), Austria, 2016
- [28] Carpenter technology, stainless steels and speciality products, USA, 2016
- [29] Böhler Uddeholm corp, Creep resisting steel, Kapfenberg, 2016
- [30] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Strain gauges, 2016
- [31] Böhler Uddeholm corp, T552 Extra Creep resisting steel, Kapfenberg, 2016
- [32] Dupal, J., Mechanika stochastických systémů, Západočeská univerzita v Plzni, 2008