

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2016

Bc. Štěpán Dressler

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Rozložení napětí v přeplátovaných spojích

Bc. Štěpán Dressler

Diplomová práce

2016

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpán Dressler**
Osobní číslo: **D14505**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Rozložení napětí v přeplátovaných spojích**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

1. Spojování plošných materiálů
2. Určování napětí v materiálech
3. Návrh experimentu pro měření rozložení napětí v plošných materiálech
4. Experiment a vyhodnocení

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. a II. Brno: CERM, 1999

Campbell, F.C.: Joining - Understanding the Basics. ASM International, 2011

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Pavel Švanda, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce: **22. února 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2016**



doc. Ing. Ivo Drahotský, Ph.D.
děkan

L.S.



doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 22. února 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 27. 5. 2016

Štěpán Dressler

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D. za věnovaný čas při měření, cenné rady a připomínky k této práci. Dále bych chtěl také poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

ANOTACE

Diplomová práce je věnována problematice vzniku plastického lomu a rozložení deformace v lokálních kritických místech u překládaných ocelových plechů, které jsou namáhány jednoosým tahovým zatěžováním. V experimentu byly na zkušebních vzorcích zkoumány velikosti a průběhy deformací pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS 4M.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rozložení deformace, deformace, zkušební vzorky, překládané spoje, optický měřicí systém ARAMIS 4M

TITLE

Stress distribution in overlap joints

ANNOTATION

The thesis is deals with the problems formation of plastic fracture and stress distribution of local critical areas at the overlap steel plates, which are subjected to uniaxial tensile loading. In the experiment to test samples analyzed sizes and development of the deformations using of the contactless optical measurement system ARAMIS 4M.

KEYWORDS

Stress distribution, deformation, overlap joints, an optical measuring system ARAMIS 4M

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 SPOJOVÁNÍ PLOŠNÝCH MATERIÁLŮ	10
1.1 Svařování	10
1.2 Pájení.....	12
1.3 Lepení.....	13
1.4 Šroubové spoje	15
2 URČOVÁNÍ NAPĚTÍ V MATERIÁLECH.....	16
2.1 Konvenční metody	16
2.1.1 Tenzometrie.....	16
2.2 Bezkontaktní optické metody.....	19
2.2.1 Fotoelasticimetrie	19
2.2.1 Laserová interferometrie – ESPI.....	23
2.2.2 Optický měřicí systém ARAMIS	24
3 NÁVRH EXPERIMENTU PRO MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ V PLOŠNÝCH MATERIÁLECH.....	33
3.1 Experimentální část.....	33
3.2 Návrh upínacího přípravku do univerzálního zkušebního stroje	33
3.3 Zkušební vzorky.....	35
3.4 Kalibrování systému ARAMIS 4M	36
3.5 Postup kalibrace	37
4 EXPERIMENT A VYHODNOCOVÁNÍ	39
4.1 Postup měření.....	39
4.2 Vyhodnocení	40
4.2.1 Použité zkušební vzorky.....	41
4.3 Porovnání dosažených výsledků pevnosti spoje	53
5 POUŽITÁ LITERATURA	56
6 SEZNAM OBRÁZKŮ.....	58
7 SEZNAM GRAFŮ	59
8 SEZNAM PŘÍLOH.....	60

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá analýzou kritických oblastí plastické deformace, které vznikají při překročení mezního stavu materiálu (vznik trhliny) vlivem statického jednoosého zatěžování. Předmětem testování byly zkušební vzorky s různými typy spojů s přeplátováním, které byly statickými zkouškami v tahu v univerzálním zkušebním stroji ZD 10/90 deformovány. Mechanické vlastnosti každého zkušebního spoje byly během zatěžování nasnímány a vyhodnoceny pomocí bezkontaktního optického systému ARAMIS 4M.

Mechanické vlastnosti vyjadřují chování materiálů za působení určitého namáhání, které je důsledkem vnějších sil anebo okolního prostředí (teplota, koroze apod.). Mezním stavem je zase stav, kdy daná součást ztrácí schopnost plnit svou funkci, pro který byl určen.

Pro zjišťování mechanických vlastností materiálů slouží mechanické zkoušky prováděné na zkušebních strojích. Standardní mechanickou zkouškou je statická zkouška tahem, která je definována normou ČSN EN ISO 6892-1. Tyto zkoušky materiálů spadají do destruktivního zkoušení a patří mezi nepoužívanější metodu. Stanovené mechanické vlastnosti materiálů jsou potom dále podkladem pro dimenzování strojních součástí.

Trendem pro zjišťování materiálových charakteristik jsou v současné době stále více používané optické měřicí systémy. Tyto bezkontaktní systémy jsou určeny pro měření reálných 3D deformací, kde výsledkem je barevná mapa rozložení deformací na součásti zatěženém staticky anebo dynamicky. Výhody těchto systémů je velká přesnost měření, bezkontaktnost a oproti konvenčním metodám rychlost vyhodnocování.

Cílem této práce bylo porovnat mechanické vlastnosti jednotlivých typů spoje ocelových dílů s přeplátováním po provedení destruktivní zkoušky. U každého typu zkušebního spoje byla provedena statická zkouška tahem pro stanovení pevnosti spoje. Dále byla provedena analýza kritických oblastí spoje těsně před jeho porušením a vyhodnocení bylo provedeno pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS 4M. Součástí zadání práce bylo navrhnout vhodné řešení uchycení zkušebního vzorku v univerzálním zkušebním stroji ZD 10/90 pro měření pomocí systému ARAMIS 4M.

1 SPOJOVÁNÍ PLOŠNÝCH MATERIÁLŮ

K trvalému spojení plošných materiálů lze použít různých druhů nerozebíratelných spojů. K nerozebíratelným spojům patří spoje svarové, pájené, lepené nebo nýtované. Ke spojům rozebíratelným patří například spoje šroubové. U základních typů metod spojování je provedena následná stručná charakteristika.

1.1 Svařování

V současné době je svařování stále jedna z nejrozšířenějších výrobních technologií, která umožňuje spojování konstrukčních prvků. Principem svařování je spojování kovových dílů na nerozebíratelný celek za působení tepla či tlaku a za případného použití přídavného materiálu podobného složení, jako má základní materiál. Svařováním se spojují tvářené polotovary anebo dílce (pásky, plechy, tyče a jiné profily).

Základní rozdělení svařování

Všechny běžné metody svařování lze rozdělit do dvou velkých skupin. Jsou to metody tavného svařování a tlakového svařování.

a) Tavné svařování

U tavného svařování dochází ke spojení materiálů působením intenzivního zdroje tepla, kdy se roztaví (na teplotu tavení) základní a přídavný materiál. Roztavený tekutý kov se na daném místě promísí a po ztuhnutí se vytvoří svarový kov spoje. Do této skupiny patří svařování plamenem, ruční svařování elektrickým obloukem (elektrodami), automatické pod tavidlem, elektrickým obloukem v ochranných atmosférách, plazmatem, elektronovým paprskem nebo laserem.

b) Tlakové svařování

U tlakového svařování je podmínkou pro vznik svaru dostatečně velká tlaková síla, jejímž účinkem se materiál v místě spoje plasticky deformuje. Ohřátím kontaktních ploch dojde ke snížení mezní hodnoty síly, které je žádoucí pro vznik svaru. Do této skupiny patří například svařování elektrickým odporem (bodové, švové) nebo svařování třením či difúzí. Příkladem spojování materiálů výhradně za působení tlaku bez jakéhokoliv ohřevu je svařování tlakem za studena nebo svařování ultrazvukem.

Vlastnosti svarového spoje

V důsledku působení tepla ze svaru do základního materiálu při svařování se vytvoří tepelně ovlivněná oblast (TOO). V této oblasti svarového spoje dochází k výrazným změnám jeho mikrostruktury, které mají zásadní vliv na vlastnosti svarových spojů.

Změny struktury a vlastností v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) bezprostředně souvisejí s chemickým složením oceli, výchozím strukturním stavem a průběhem teplotního cyklu. Kritickou částí této oblasti je okolí hranice ztavení, kde je dosažena nejvyšší teplota, dochází k nejvýraznějšímu zhrubnutí zrna a následující ochlazování zde probíhá nejvyšší rychlostí. [1]

Svařovací proces je u většiny metod svařování superpozicí teplotního a deformačního účinku na základní materiál. Napětí a deformace jsou proto při svařování doprovodným jevem, vznikají u každého procesu svařování a jejich vzniku nelze zabránit. Vhodnými technologickými zásahy a konstrukčním řešením svařence však můžeme napětí a deformace účinně ovlivňovat. [2]

Vhodným tepelným zpracováním proti vzniku trhlin za studena je předehřev, který snižuje zakalení tepelně ovlivněné oblasti (TOO) svarového spoje a snižuje teplotní gradienty ve svaru, čímž přispívá ke snížení zbytkového pnutí vyvolané svařováním.

Výhody svařování

- Velká pevnost, trvanlivost, těsnost svarového spoje
- Svařováním lze zjednodušit tvar svařence (vede ke snížení hmotnosti)
- Vysoká produktivita práce (podstatně snižuje výrobní časy)
- Svařováním lze efektivně opravit poškozené kovové díly a konstrukce

Nevýhody svařování

- Svařováním vznikají nerozebíratelné spoje
- Změna struktury – důsledkem teplotního cyklu svařování je napěťové a následně deformační pole, která jsou zodpovědná za vznik vad svarových spojů (charakter změny struktury závisí na ohřevu při natavování, dobou výdrže nad teplotu přehřátí, ochlazování teplotního cyklu) [1]
- Vznik vnitřního pnutí
- Výskyt vnitřních vad – vznik různých typů trhlin

1.2 Pájení

Pájení patří k nejstarším způsobům spojování materiálů a od roku 1930 je tato metoda využívána v průmyslové výrobě. Použitím pájení je výhodné v sériové a hromadné výrobě malých a středně velkých součástí, kde se vyžaduje vysoká produktivita práce. Pájení je definováno jako způsob metalurgického spojování kovových součástí roztavenou pájkou, přičemž pájené plochy nejsou nataveny, ale jen smáčeny použitou pájkou. První podmínkou je dobrá smáčivost spojovaného materiálu tekutou pájkou. Povrchové atomy základního materiálu a tekuté pájky se přitom dostanou do tak malé vzdálenosti, že se vytvoří podmínky pro účinek adhezních a kohezních sil. Nejčastěji přitom dojde i k vzájemnému rozpouštění a difúzi některých prvků spojovaných materiálů. Vlivem kapilárního tlaku, který se výrazně projevuje při mezerách menších 0,5 mm, nastává tečení pájky (popř. tavidla) v mezeře spoje všemi směry. [3]

Druhy pájek podle teploty tavení

Měkké pájky

Měkké pájky mají teplotu tavení nižší než 450 °C a zároveň se vyznačují i malou pevností. Používají se pro spoje, které nejsou pevnostně a tepelně namáhány. Jsou to většinou slitiny Pb-Sn, méně často i Zn, Cd, Bi, Ag a další. Měkké pájky se využívají nejčastěji v elektrotechnice a elektronice.

Tvrdé pájky

Tvrdé pájky mají teplotu tavení nad 450 °C a jsou pevnější než pájky měkké. Používají se v provozu tam, kde jsou vystaveny vyššímu mechanickému namáhání nebo pracuje-li pájená součást při vyšších teplotách. Nejpoužívanější tvrdé pájky ve strojírenské výrobě jsou měděné, které mají velmi dobrou roztékavost (nízkou viskozitu), takže dobře vyplňuje úzké mezery. Je dobře tvárný a vzdoruje teplotám do 350°C. Teplota tavení měděné pájky je přibližně 1100 °C. Mosazné pájky se skládají ze slitiny Cu-Zn a vyznačují se teplotou tavení 900 °C a vyšší viskozitou. Používají se pro pájení mědi a ocelí. Stříbrné pájky se vyznačují nižší teplotou tavení přibližně 700 °C s 15 až 45 % Ag a zbytek bývá Cu, Zn nebo Cd. Pájky s vyšší obsahem Ag se používají pro měděné díly v elektrotechnice a pro pájení korozivzdorných ocelí.

Vliv konstrukce spoje na pevnost v tahu a ve smyku při statickém namáhání

Pevnost pájeného spoje v tahu a ve smyku ovlivňují tvar a rozměr spoje, zejména tloušťka základního materiálu a velikost mezery spoje. Je prokázáno, že s velikostí pájené plochy lineárně klesá pevnost pájeného spoje, přičemž tento pokles je výraznější u základních materiálů s vyšší pevností. Pokles pevnosti se vysvětluje nerovnoměrným rozdělením tepla a větší pravděpodobností vzniku chyb ve spoji. U přepřátovaných spojů stoupá jejich pevnost se zvětšující se délkou přepřátování. Optimální délka přepřátování je asi 2,5 až 7 násobná tloušťka základního materiálu. [2]

Výhody pájení

- Pro vytvoření pájeného spoje není zapotřebí vysokých teplot (oproti svařování). Vnesené teplo u pájených součástí není tak velké, čímž vznikají menší tepelná pnutí a deformace. Změna struktury základního materiálu je minimální
- Lze pájet materiály všech kovů a slitin i kombinace kovových a nekovových součástí
- Vysoká produktivita práce (možné zhotovit více spojů stejné jakosti zároveň)
- Velká rozměrová přesnost součástí po pájení

Nevýhody pájení

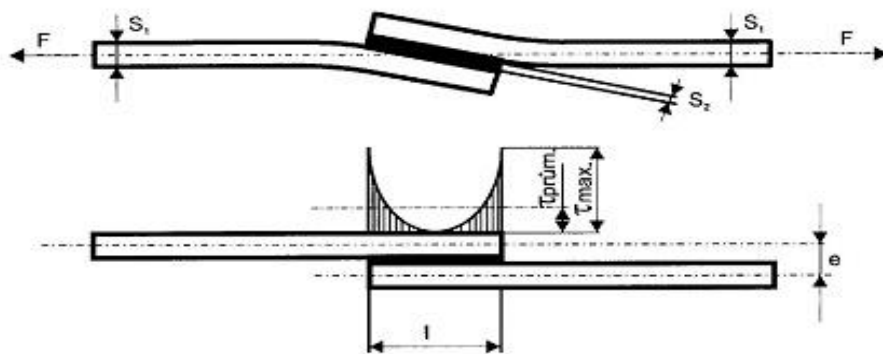
- Pájené spoje se vyznačují ve srovnání se svarovými spoji menší pevností (lze zvýšit vhodnější volbou konstrukce a dodržení technologie pájení)
- Cena pájky

1.3 Lepení

Lepení je jedno z nejuniverzálnějších metod spojování, které se používá pro spojení stejných nebo rozdílných materiálů (kovy, plasty, keramiky či dřevo). V dnešní době se vyrábí mnoho druhů lepidel podle chemického složení a bývají na bázi různých organických polymerních látek. Základními vlastnostmi, kterým by se lepidla měla vyznačovat je: dobrá přilnavost k lepenému povrchu (adheze), dobrá soudržnost hmoty lepidla (koheze) a dobrá smáčivost na lepený povrch. V současnosti se konstrukční lepidla hojně využívají pro lepení kovových součástí v automobilovém a leteckém průmyslu. Nahrazují tím svařované a pájené spoje, kde v jistých případech mají mnohem lepší mechanické vlastnosti. Z hlediska pevnosti spoje vykazují velmi uspokojivé mechanické vlastnosti epoxidová a polyuretanová lepidla.

Technologický postup lepení

Předúprava povrchu materiálů je důležitým technologickým krokem, který rozhoduje o adhezni pevnosti lepeného spoje. Pro kvalitní lepený spoj je zapotřebí mít dobře slícované díly. Povrchy adherendů se mechanicky očistí - otryskáním, broušením nebo smirkováním a poté očistí chemicky - odmaštěním. Před nanášením lepidla je nutné se řídit předpisem výrobce lepidla. Lepený spoj by měl být soudržný a rovnoměrný při optimální tloušťce filmu lepidla ve spáře (přibližně 0,05 až 0,25 mm). Větší tloušťka snižuje pevnost lepeného spoje. Dále se díly k sobě přiloží a zafixují do správné polohy (například pomocí svěrky), aby nedošlo k posunu dílců. Lepidlo se nechá vytvrdit a poté se očistí od zbytků lepidla.



Obr. 1 Rozložení napětí při deformaci jednostranně lepeného překlátovaného spoje [13]

Výhody lepení

- Vysoká pevnost spoje při namáhání ve smyku a v tlaku
- Základní materiál není při lepení tepelně namáhán (oproti svařování)
- Lepením nedochází k zeslabení nosného průřezu (oproti nýtovaným a šroubovým spojům)
- Lepení umožňuje spojovat stejné nebo různorodé materiály
- Lepený spoj tlumí vibrace v konstrukci
- Lepené spoje snižují hmotnost konstrukce
- Lepené spoje zaručují těsnost

Nevýhody lepení

- Nižší tepelná odolnost (oproti svařování nebo šroubovým spojům)
- Většina lepených spojů má malou pevnost v odlupování
- Nutná předúprava povrchu adherendů (rozhoduje o pevnosti lepeného spoje)

- U tenkých materiálů jednostranně přepřátovaných spojů dochází k ohybovému momentu. V excentricky zatíženém spoji dochází k působícím silám, které podporují odlupování, a tím pádem se snižuje pevnost lepeného spoje. Napětí má po celé délce přepřátování hyperbolický průběh, kde na okrajích spoje jsou maximální kritické hodnoty. (Viz obr. 1.)

1.4 Šroubové spoje

Šroubové spoje patří mezi nejpoužívanější rozebíratelné spoje. Jedná se o způsob spojování dvou a více součástí dohromady, přičemž tyto spoje mohou být rozebírány, aniž by se přitom poškodily spojované součásti. Pro šroubové spoje se může použít šroub s hlavou a maticí, šroub s hlavou bez matice (spojovaný materiál nahrazuje matici) a závrtný šroub bez hlavy. Pod hlavu šroubu a matici je vhodné používat podložky, které přispívají k rovnoměrnějšímu rozložení sil ve spoji, jež vznikají dotahováním šroubu.

Při utahování šroubu, případně matice se prodlužuje šroub, stlačují se spojované součásti a ve šroubu je vyvozena síla, která se nazývá síla předpětí. Po montáži jsou součásti spojeny dohromady a stejně velká síla předpětí vyvolávající tah ve šroubu vyvolává tlak ve spojovaných částech. Při nerovnoměrném dosednutí hlavy šroubu a matice na dosedací plochy vzniká ve šroubu přídavné ohybové napětí, které se přičte k tahovému napětí. Přídavný ohyb je velmi nebezpečný, protože může být i několikanásobně větší než je tahové namáhání ve šroubu a bývá častou příčinou lomu šroubu ve výběhu závitu. [4]

Výhody šroubového spoje

- Poměrně jednoduchá montáž i demontáž
- Snadná výměna poškozených součástí ve spoji
- Podložky Nord-Lock zvyšují odolnost šroubového spoje proti namáhání vibrací

Nevýhody šroubového spoje

- Vyvrtáním otvorů pro šrouby se zeslabuje nosný průřez
- Otřepy po vyvrtaných dírách zvyšují koncentraci napětí (nutno srazit hrany otvorů)
- Vyšší hmotnost spoje
- Horší povolování zkorodovaného šroubového spoje

2 URČOVÁNÍ NAPĚTÍ V MATERIÁLECH

Zájmem experimentální mechaniky je především vyšetřování velikostí přetvoření, napětí, posunutí, výchylky a zrychlení kmitavého pohybu vznikajících v různých materiálech a konstrukcích, na které působí silové účinky - síly, tlaky a kroutící momenty. Pro určování napětí v materiálech se uplatňují konvenční elektrické metody a rozmáhající se bezkontaktní optické metody, kterým bude věnována větší pozornost.

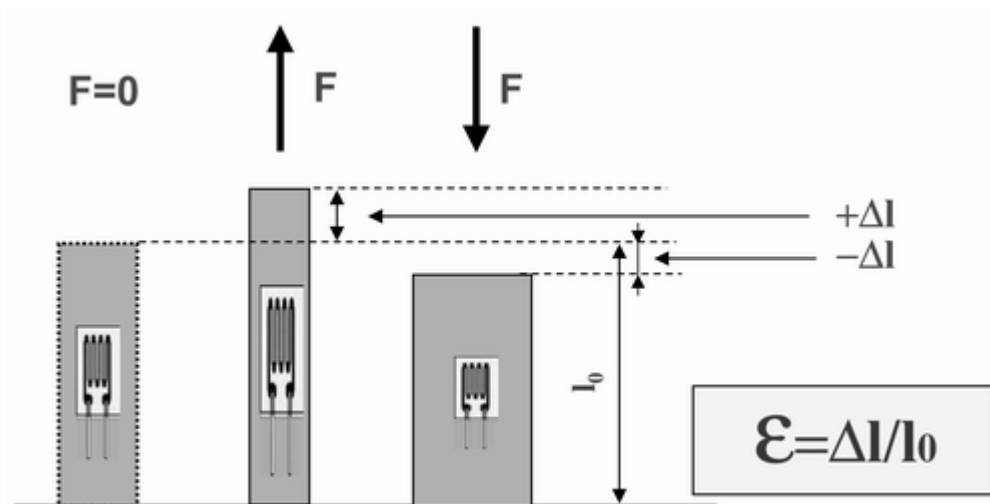
2.1 Konvenční metody

2.1.1 Tenzometrie

Tenzometrické metody se řadí do skupiny metod, které jsou založené na kontaktním měření povrchových deformací. Z konstrukční a provozní praxe je zjištěno, že namáhání u většiny případů strojních součástí a konstrukcí jsou maximální napětí na povrchu materiálu. Povrchové deformace vyvolané mechanickým napětím (v důsledku zatížení) se měří pomocí elektrických snímačů tzv. tenzometrů. V současnosti jsou nejpoužívanější elektrické odporové tenzometry, se kterými lze realizovat měření i na těžko přístupných místech nebo se s nimi dají měřit i dynamické děje. Mezi hlavními přednostmi elektrických odporových tenzometrů je vysoká přesnost, citlivost a rychlost měření při vysokém počtu vyšetřovaných míst. Jejich výstupním signálem může být analogová či digitální podoba. U této elektrické metody je ovšem zapotřebí vyšší znalost fungování tenzometrie a vyšší investice do nákladů na měřicí aparaturu.

Elektrické odporové tenzometry

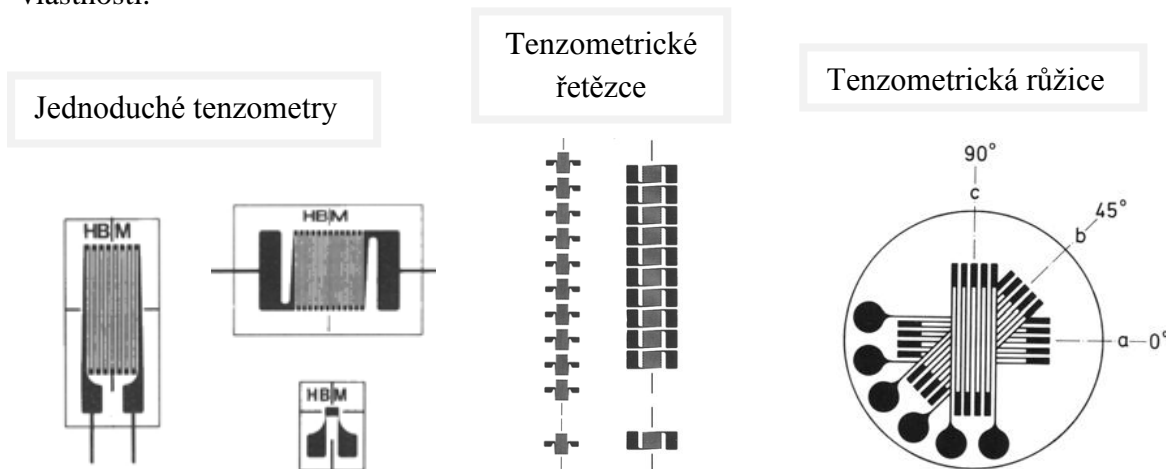
Princip měření pomocí elektrických odporových tenzometrů je založen na změně elektrického odporu tenzometru v důsledku mechanické deformace konstrukce v místě umístěného tenzometru. Každý tenzometr má tuto charakteristiku a jeho deformace je shodná s deformací konstrukce na daném místě měření. Při správném zapojení elektrických odporových tenzometrů do elektrického obvodu lze získat poměrnou deformaci konstrukce na určitém místě. Ze znalosti materiálových vlastností (Yongův modul pružnosti E a Poissonova konstanta μ) dostaneme mechanické napětí odpovídající změřené poměrné deformaci.



Obr. 2 Princip fungování tenzometru při deformaci [14]

Fóliové tenzometry

Fóliové tenzometry jsou z hlediska druhu odporových materiálů nejpoužívanější. Jsou vyrobeny fotochemickým způsobem z konstantanové anebo chromniklové fólie a jejich minimální tloušťka může být až $5\mu\text{m}$. Oproti drátkovým tenzometrům je výroba tvarově složitějších snímačů jednodušší a zaručují lepší odvod tepla, což umožňuje daleko lepší měřicí vlastnosti.



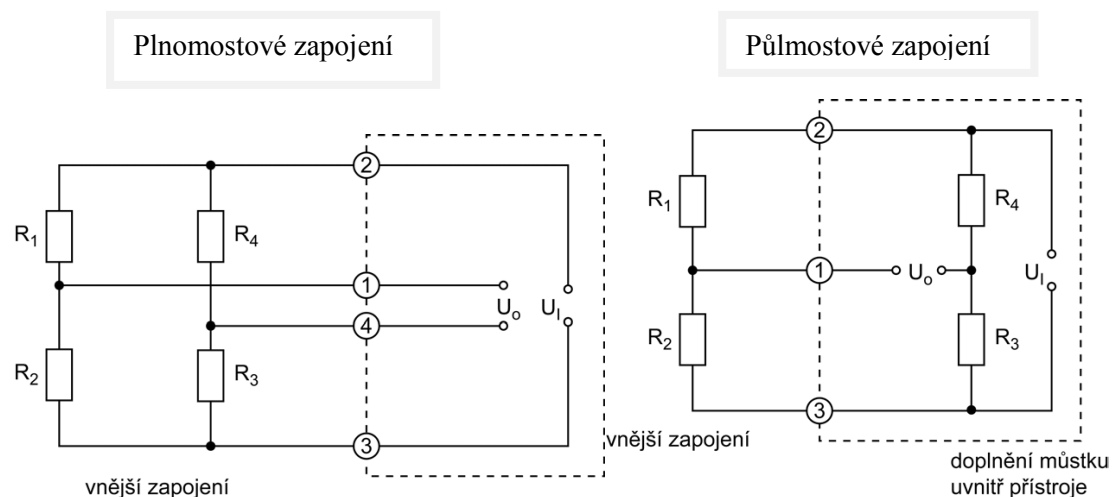
Obr. 3 Typy foliových tenzometrů [15]

Zapojení tenzometrů

Zapojení tenzometru do elektrického obvodu odpovídá charakteru měření. Nejčastěji jsou do obvodu zapojeny dva tenzometry (aktivní a kompenzační). V tomto případě se jedná o zapojení tzv. polovičního Wheastonova můstku (obr. 4). Aktivní tenzometr T_A je přilepen na požadované místo na konstrukci, kompenzační tenzometr T_K je umístěn do blízkosti aktivního na plochou destičku ze stejného materiálu jako je měřená konstrukce. Destička je připevněna

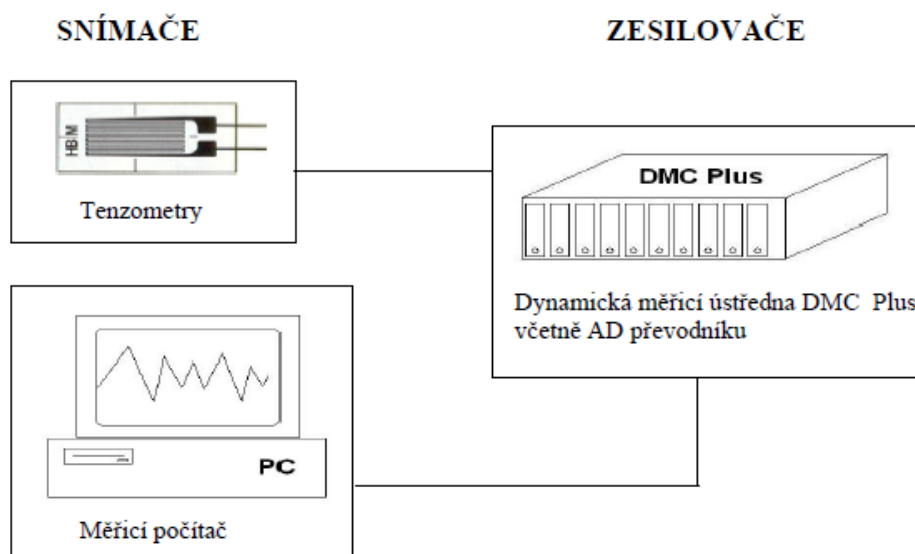
ke konstrukci pružným lepidlem (např. chemopren), aby do ní nebyly přenášeny deformace konstrukce (nebyla mechanicky namáhána). V průběhu měření pak kompenzační tenzometr kompenzuje vliv teploty. [6]

Výhoda půlmostového zapojení je dvojnásobná citlivost oproti čtvrtmostového. Plný most se vyznačuje připojením dalších dvou tenzometrů, čímž se citlivost zvýší čtyřnásobně oproti čtvrtmostovému. Používá se pro nejpřesnější experimentální měření s dlouhodobou stabilitou.



Obr. 4 Typy zapojení tenzometrů ve wheastonově můstku [15]

Na obr. 5 je vyobrazen měřicí řetězec, který je tvořen tenzometry, jejichž počet je závislý na druhu měření a zapojení ve wheastonově můstku. Zesilovač dynamické měřící ústředny je spolu s tenzometry a měřícím počítačem propojen pomocí přívodních kabelů. Měřicí počítač společně se softwarem umožňuje zpracování a ukládání dat.



Obr. 5 Měřicí řetězec [6]

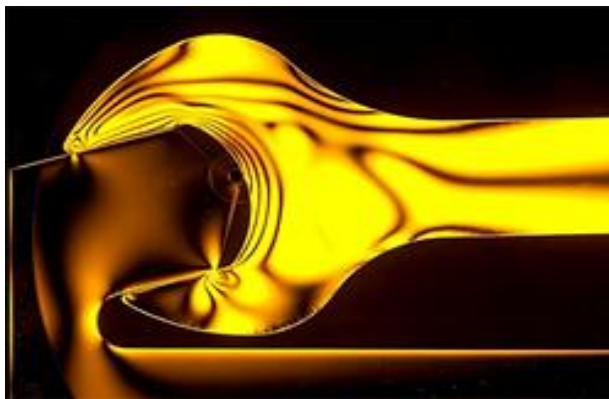
2.2 Bezkontaktní optické metody

V praxi existuje velké množství bezkontaktních optických metod, které umožňují deformace a posuny měřit nebo vizualizovat. Přetvoření a napětí jsou poté obvykle vypočítávány z hodnot posunutí. [7]

Podmínkou pro analýzu deformace či napětí je viditelnost plochy povrchu vyšetřované součásti. Za největší výhodu optických metod lze považovat jejich bezkontaktnost, kde vyhodnocování optickými systémy není náročné oproti konvenčním elektrickým metodám v tenzometrii. Jsou použitelné během provozu a umožňují rychlé vyhodnocení průběhu deformace z povrchu zkoumaných součástí. Na rozdíl od tenzometrů tedy měří v celé sledované ploše, ne jen v místech kde je tenzometr připevněn.

2.2.1 Fotoelasticimetrie

Fotoelasticimetrie je poměrně stará optická metoda, která umožňuje měřit napětí na povrchu součástí opticky citlivých materiálů. Fotoelasticimetrický jev byl objeven D. Brewsterem v roce 1816, kdy publikoval zprávu o tom, že na skle vlivem napětí v polarizovaném světle spatřil rozložené barevné spektrum. Tato metoda byla zdokonalena a našla uplatnění při zjišťování okrajového napětí na součástech při řešení napjatostí u rovinných i prostorových úloh.



Obr. 6 Ukázka fotoelasticimetrického experimentu maticového klíče [16]

Podstata fotoelasticimetrie

Fotoelasticimetrie je optická experimentální metoda, umožňující zjišťování napěťových polí v zatížených tělesech. Metoda je založena na dvou optických jevech – polarizace světla a

dočasném dvojlomu. Podle povahy řešeného problému a způsobu provedení experimentu můžeme tuto metodu rozdělit do tří skupin:

- Rovinná fotoelasticimetrie
- Reflexní fotoelasticimetrie (fotostres)
- Prostorová fotoelasticimetrie [8]

Podle Maxwellovy teorie světlo vzniká elektromagnetickým vlněním a obsahuje elektrickou a magnetickou vlnu, které kmitají v navzájem kolmých rovinách. Šíří se ve tvaru příčných vln přímkově po paprscích neuspořádaně a směry kmitů jsou nahodilé. Světelné vjemy vyvolává elektrická vlna a barvu světla určuje frekvence vlnění. Viditelná oblast spektra vlnových délek se pohybuje v rozmezí 390 až 770nm (od tmavě fialové po červenou barvu). Vyzařuje-li světelný zdroj světlo s celým rozsahem viditelných vlnových délek, mluvíme o světle bílém, světlo s jedinou vlnovou délkou je světlo monochromatické. [8]

Polarizace světla

Kmitání obyčejného světla se děje v rovinách kolmých na světelný paprsek, přičemž se směr kmitů neustále a velmi rychle mění. V případě, že jsou kmity usměrněny do jedné roviny, vzniká světlo přímkově polarizované. Polarizace světla může nastat odrazem, lomem anebo dvojlomem. Polarizace dvojlomem nastává po průchodu světelného paprsku tzv. polarizátorem. [8]

Fotoelasticimetrie je založená na základním jevu, kterým je přímkové a kruhové polarizované světlo. Tyto druhy světla se zpracovávají pomocí přístrojů tzv. polariskopy.

Rovinná fotoelasticimetrie

Rovinná fotoelasticimetrická metoda slouží pro vyšetřování napětíových polí, které se provádí pomocí přístrojů tzv. polariskopy. Podle polarizovaného světla se polariskopy dělí na přístroje s přímkově nebo kruhově polarizovaným světlem.

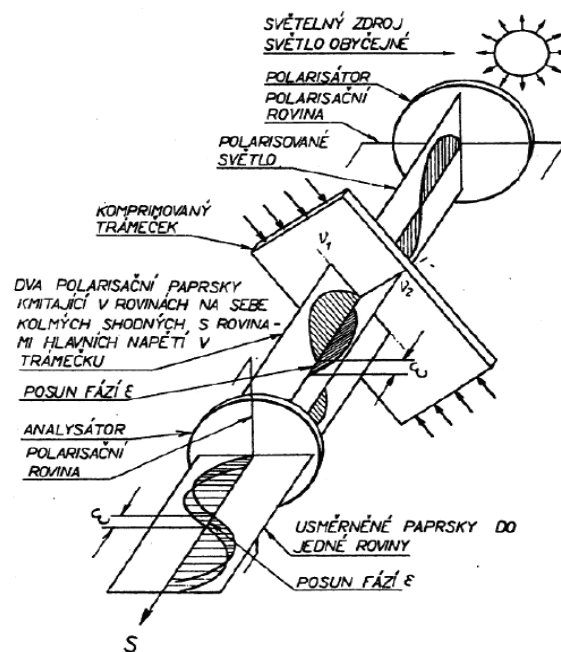
Polariskop s přímkově polarizovaným světlem

Polariskop s přímkově polarizovaným světlem se skládá ze světelného zdroje (bílého nebo monochromatického světla), polarizátoru a analyzátoru. Mezi polarizátor a analyzátor se umísťuje model součásti ze speciálního materiálu. Musí být průhledný, opticky citlivý a musí mít vhodné mechanické vlastnosti. Ze světelného zdroje prochází světlo skrz polarizátor, kde

vzniká přímkově polarizované světlo, které kmitá pouze v jedné rovině kolmo na polarizační rovinu. Polarizovaný paprsek dopadne na zatíženou součást z dočasně dvojlomného materiálu a tento paprsek se rozloží na dva k sobě kolmé paprsky kmitající v rovinách totožných se směry hlavních napětí v zatížené součásti. V zorném poli analyzátoru se objevují tmavé čáry tzv. izokliny. Izokliny nám dávají informaci o směrech hlavních napětí při zatěžování součásti. Kdežto izochromy jsou křivky, jejíž body mají stejný rozdíl hlavních napětí.



Obr. 7 Model polariskopu [8]



Obr. 8 Schéma polariskopu [8]

Polariskop s kruhově polarizovaným světlem

Pro fotoelasticimetrické měření se také používají polariskopy s kruhově polarizovaným světlem. Protože se izoklinné a izochromatické čáry vzájemně překrývají, používají se tyto polariskopy, které umožňují v zorném poli odstranit izoklinné čáry a tím není sestava izochromatických čar narušena. Rozdíl mezi polariskopem s přímkově a kruhovým polarizovaným světlem je vtom, že u polariskopu kruhového polarizovaného světla se mezi polarizátorem a danou součástí a obdobně mezi součástí a analyzátozem nacházejí čtvrtvlnové desky.

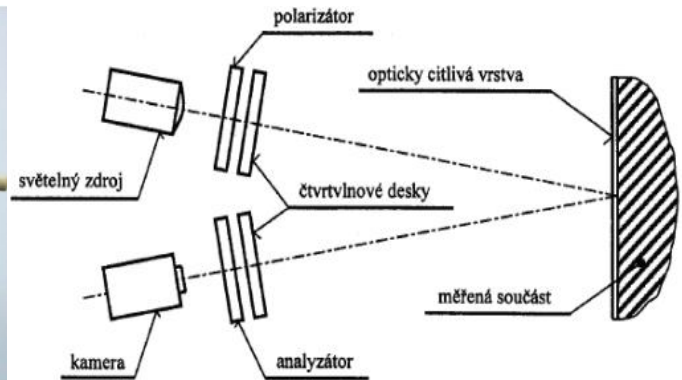
Reflexní fotoelasticimetrie

Principem reflexní fotoelasticimetrie je založen na tom, že se zkoumaný povrch součásti polepí tenkou vrstvou z opticky citlivého materiálu. Při zatěžování součásti vznikají v tenké

vrstvě interferenční jevy, které lze pozorovat v polarizovaném světle. Tyto jevy vidíme v odraženém světle od lesklého povrchu součásti anebo od lepidla opatřený lesklými částicemi. Pro měření slouží reflexní polariskop obr. 9, jehož princip je zobrazen na obr. 10. Reflexní polariskop umí pracovat s přímkově nebo kruhově polarizovaným světlem.



Obr. 9 Reflexní polariskop [8]



Obr. 10 princip reflexní fotoelasticimetrie [8]

Prostorová fotoelasticimetrie

Prostorovou fotoelasticimetrii lze vyšetřovat napětí u prostorových úloh. Používají se tři metody měření a vždy se jedná o převedení prostorové úlohy na rovinnou.

Metoda slepovaných modelů

Metoda slepovaných modelů se používá u součástí, které jsou tvarem osově symetrické. Do součásti, která je vyrobená z průhledné hmoty, se do meridiánového řezu vloží tenká destička z opticky citlivého materiálu. Během zatěžování součásti vzniká prostorová napjatost, kterou zjistíme právě na tenké destičce, kde vlivem deformování vznikají obrazce izoklin a izochromat. Použití materiály, by měly mít podobné hodnoty modulu pružnosti E a poissonova čísla μ .

Zmrazovací metoda

Princip této metody je založen na trvalém zmrazení dvojlomu, který vzniká při zahřáté součásti během deformování a následném pozvolném ochlazení. Tato metoda zmrazení napjatosti využívá dvoufázovou strukturu materiálů. Při zvýšené teplotě se tak jednotlivé fáze chovají nestejně. Během zatěžování a zahřívání se při nižších teplotách jedna fáze mění plastickou dříve než fáze druhá. Při následném odlehčení a ochlazení materiálu dochází ke ztuhnutí plastické fáze a tím dojde k zabránění této fáze se navrátit do původního stavu.

V modelu tak zůstanou vytvořená napětí od zatěžování. Z tohoto modelu se vyříznou tenké destičky, kde je daná napjatost podrobena analýze obdobně jako u rovinné fotoelasticimetrie.

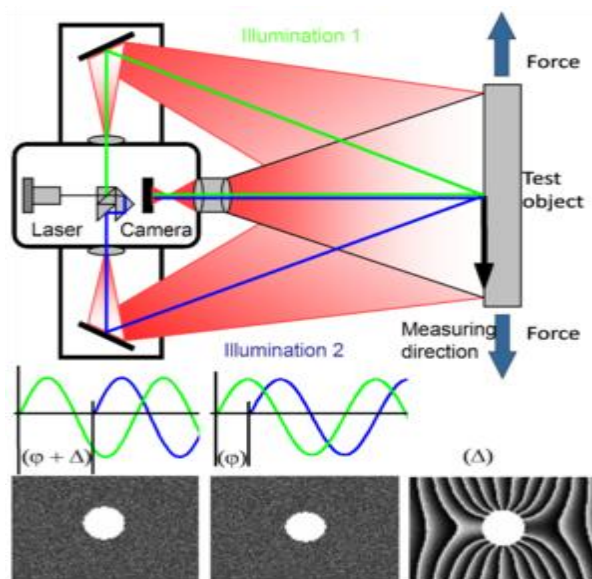
Metoda rozptýleného světla

Principiálně je tato metoda podobná zmrazovací metodě. Součást je vyrobena z průsvitného materiálu, která je zatěžována v kapalině a má stejný index lomu jako materiál součásti. Laserový paprsek prosvítající skrz součást vytvoří rovinu světelného řezu, která připomíná tenkou destičku podobně jako u zmrazovací metody. Napjatost vzniklá optickými jevy následně vyhodnocujeme.

2.2.1 Laserová interferometrie – ESPI

Laserová interferometrie – ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) je optická metoda, která umožňuje interferometrické měření povrchových posunutí na téměř jakémkoli povrchu a materiálu. Tento bezkontaktní a celoplošně měřící systém umožňuje vyhodnotit rozložení posunutí a deformací ve 3D na součástech, které mohou být namáhána mechanicky i tepelně. V současnosti se tato metoda velmi používá a je aplikována v celé řadě odvětví, včetně automobilového a leteckého průmyslu. [9]

Tato metoda využívá koherenční zrnitosti. Je to zvláštní jev, který vzniká při odrazu koherentního světla (např. z laseru) od drsného předmětu. Tento jev je výsledkem mnohosvazkové interference velkého počtu elementárních koherentních světelných svazků záření generovaných bodovými zdroji, které tvoří drsný povrch předmětu při odrazu. Vzniklé intenzitní pole si lze představit jako náhodné seskupení světlých a tmavých skvrnek. Struktura koherenční zrnitosti má náhodný charakter a lze ji tedy popsat metodami matematické statistiky. Jestliže je předmět s difúzně odrazným povrchem generující pole koherenční zrnitosti posunut, či deformován, pole koherenční zrnitosti se v rovině pozorování pohybuje a částečně mění svoji strukturu. Z posuvu pole (a tedy i struktury) lze potom zpětně vyhodnotit informaci o stavu povrchu předmětu. Stav deformace elementární plošky povrchu předmětu může být popsán pomocí tenzoru deformace. Posuv pole (a tedy i struktury) koherenční zrnitosti je možné reprezentovat polohou maxima funkce vzájemné korelace dvou intenzitních množin zaznamenaných v rovině pozorování před a po změně stavu předmětu. Z těchto relací mohou být určeny jednotlivé složky tenzoru deformace. [10]



Obr. 11 Princip laserové interferometrie - ESPI [17]

2.2.2 Optický měřicí systém ARAMIS

ARAMIS je bezkontaktní měřicí systém firmy GOM pro měření reálných 3D deformací. Výsledkem je barevná mapa rozložení deformací na objektu zatěžovaném buď staticky, nebo dynamicky. Proces měření může být spouštěn v pravidelných časových intervalech (např. s prodlevou 1s) nebo může být řízen externím signálem (např. ze zatěžovacího stroje). [11]

Princip měření je založen na fotogrammetrické korelaci zobrazení. Přístroj umožňuje stanovit deformaci materiálu na základě posunutí bodů povrchu materiálu mezi referenčním – nezatíženým stavu a stavu při zatěžování při téměř libovolném počtu kroků. K tomuto účelu je vybaven dvěma kamerami, které snímají povrch tělesa ze dvou směrů, prováděné měření tak probíhá ve 3D souřadnicích. V prvním kroku se definují fazety na zobrazení původního stavu. Potom se, pro každý krok zatížení přesně vypočítají 3D souřadnice těchto fazet na povrchu měřeného objektu s použitím fotogrammetrických principů. Na základě těchto souřadnic je přesně vypočteno posunutí, prodloužení a tvar s vysokým rozlišením. Výsledky mohou být uvedeny v grafických formátech TIFF nebo JPEG a dále mohou být exportovány v uživatelsky definovaném ASCII formátu pro další zpracování. [10]



Obr. 12 Optický měřicí systém ARAMIS 4M [18]

Přednosti systému [11]

- velký rozsah měření (objekty od velikosti 1mm do 1000 mm)
- rozsah měření deformace (od 0,05% až do stovek %)
- jednoduchá příprava povrchu objektu (nástriek může být pravidelný i náhodný)
- vysoká hustota naměřených dat (bodů na povrchu objektu)
- mobilita (systém lze převážet v osobním automobilu)
- flexibilita (snadná změna velikosti záběru a rozlišitelnosti systému)
- přehledná analýza výsledků měření (grafické vizualizace)

Proces měření [11]

- na objekt je pomocí spreje nanesen kontrastní vzor (tzv. pattern)
- pattern se deformuje zároveň se zatěžovaným objektem
- objekt je pro každou úroveň zatížení (tzv. stage) sejmuto 2 CCD kamerami
- ze snímků jsou pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů ležících na povrchu objektu
- porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení systém vypočítá 3D posuvy a následně tvar deformovaného objektu a 3D deformace



Obr. 13 Obr. Ukázka vhodného a nevhodného kontrastního vzoru [19]

Výstupy z měření [11]

- hodnoty 3D posunutí bodů na povrchu objektu
- hodnoty 3D posunutí bodů v radiálním směru
- hodnoty 3D deformace měřené na povrchu objektu (Mises, Tresca strain)
- hodnoty hlavních a vedlejších deformací (Major, Minor strain)
- tvar objektu v jednotlivých fázích deformace (mrak bodů)
- hodnoty změny tloušťky materiálu (např. u plechů)
- velikost deformace vůči limitní tvářecí křivce (FLC)
- grafické nebo tabulkové výstupy naměřených hodnot

Oblasti využití systému ARAMIS [11]

- dimenzování součástek
- zkoušky materiálu
- ověřování FE analýz
- testování nových materiálů
- výpočty stability
- zkoumání materiálu v nelineárních oblastech deformace
- optimalizace procesu tváření (limitní křivka tváření FLC)
- zjišťování materiálových vlastností
- charakteristika procesu tečení
- charakteristika procesu stárnutí

Základní rozdělení systémů

ARAMIS 4M

ARAMIS 4M je určen pro měření deformací, kde je důležitým aspektem jak vysoké rozlišení, tak rychlost kamer. Díky novému typu kamer je možno snímat vzorkovací frekvencí 55 Hz za plného rozlišení, případně frekvencí až 440 Hz při zmenšení rozlišení čipu v jednom směru, což umožňuje snímání středně rychlých dějů při vysokém rozlišení.[11]

ARAMIS 5 M

ARAMIS 5M je vzhledem k vyššímu rozlišení CCD čipu vhodný pro měření velkých objektů nebo pro měření s vyšším rozlišením detailů. Na rozdíl od systému ARAMIS 4M je zde rozlišení CCD čipu 5 000 000 bodů a snímkovácí frekvence 15 Hz (resp. 30Hz při snížení rozlišení CCD čipu).[11]

ARAMIS 12M

Aramis 12M je novinkou společnosti GOM, nejvyšší rozlišení senzoru nabízí měření lokálních deformací s velmi vysokou přesností. Kamery jsou schopné snímat frekvencí 24Hz při plném rozlišení nebo až 384Hz při rozlišení částečném, u kterého je nově možnost redukovat rozlišení čipu jak v horizontálním tak vertikálním směru.[11]

ARAMIS HS

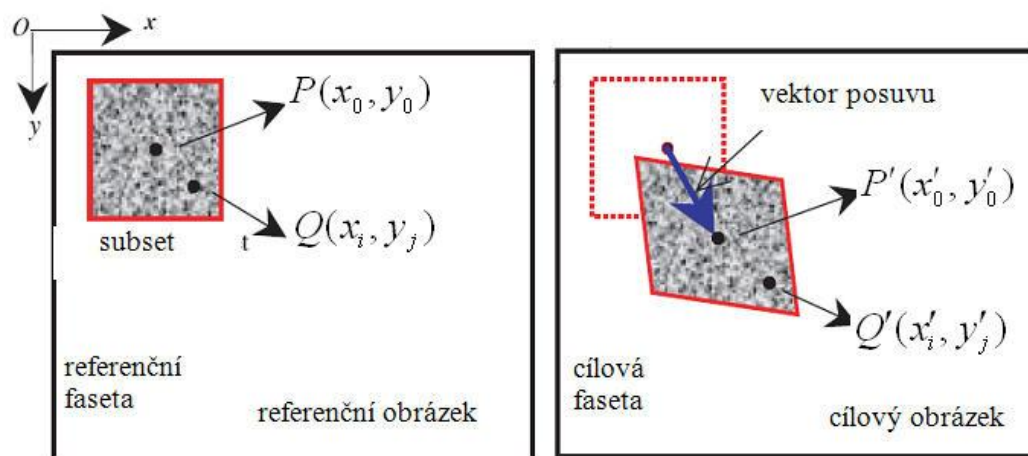
ARAMIS HS je systém speciálně přizpůsobený pro měření velmi rychlých dynamických dějů. Rozlišení CCD čipu je 1 300 000 pixelů a snímkovácí frekvence může být v plném rozlišení až 500Hz. Při snížení rozlišení CCD čipu může být dosaženo frekvence snímků až 4000Hz. Snímkování lze řídit externím signálem nebo dle předem připravených instrukcí.
[11]

Digitální obrazová korelace

Digitální obrazová korelace (DIC) je metoda, která v posledních letech nabývá na významu, zejména pro mechanické testování z hlediska snadného použití. Tato optická metoda snímá změny obrazů pro přesné 3D a 2D měření. Používá se hlavně ve strojírenství pro měření deformací, posunutí, napětí a sledování průběhu deformování během zatěžování v jednotlivých fázích. Systém vyhodnocuje snímky s vysokým rozlišením, které byly během

testování nasnímány a uloženy. Principem Digitální obrazové korelace (DIC) je ve vyhodnocování změn polohy kontrastního vzoru (rastru) na povrchu zkušební vzorku. Tato změna polohy je vypočtena pomocí matematických operací korelace. Hledaný posuv v bodě je převeden na hledanou maximální korelační funkci. Korelační funkce je zjištěna podle obrazu před deformací a po deformaci, které jsou tvořeny pixely ve stupních šedi.

Podstata 2D digitální obrazové korelace je dále popsána. Máme-li dva nasnímané obrazy kontrastního vzoru ze zkušební vzorku před a po deformaci, tak u každého snímku jsou vytvořeny fazety resp. pixely, pro které hledáme posuv ve dvou na sebe kolmých osách x a y . (obr. 17)



Obr. 14 Schematické znázornění čtvercové fazety před deformací a po deformaci [12]

Podle obr. 14 vidíme, že tvar čtvercové referenční fazety se mění na deformovanou fazetu. Deformovaný pevný objekt lze považovat za kontinuum. To znamená, že pro popis deformování lze použít tento předpoklad z oboru mechaniky. Na výše zmíněném obrázku je schematicky znázorněná souřadnice obecného bodu $Q(x_i, y_j)$ a střed fazety $P(x_0, y_0)$, které se po zatížení změní jejich poloha a mají souřadnice $Q'(x_i', y_j')$ a $P'(x_0', y_0')$. Funkce, která popisuje změnu polohy bodu Q , se nazývají tvarové funkce ξ a η . Lze je vyjádřit takto:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i + \xi(x_i, y_j) \\ y'_i &= y_i + \eta(x_i, y_j) \quad (i, j = -M : M). \end{aligned} \quad (1)$$

U tvarové funkce nultého řádu se předpokládá, že posunutí každého bodu uvnitř fazety je stejné. Jedná se o posuvný pohyb fazety s posuvem u a posuvem v v kolmých osách ve směru x a y .

$$\begin{aligned}\xi_0(x_i, y_j) &= u \\ \eta_0(x_i, y_j) &= v\end{aligned}\tag{2}$$

Je zřejmé, že tvarová funkce nultého řádu, nemůže být dostatečná, aby zobrazovala změnu tvaru deformované fasety. Použití tvarové funkce prvního řádu se používá nejčastěji, protože umožňuje posunutí, otočení, usmýknutí i normálové deformace. Popsané jsou takto:

$$\begin{aligned}\xi_1(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y\end{aligned}\tag{3}$$

kde: $\Delta x = x_i - x_0, \Delta y = y_i - y_0$

u_x, u_y, v_x, v_y jsou gradienty posuvů prvního řádu.

u, v jsou posuvy středu referenční fasety ve směru x, y .

Tvarová funkce druhého řádu může být použita pro složitější deformace. Tato tvarová funkce je popsána takto:

$$\begin{aligned}\xi_2(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \\ \eta_2(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y\end{aligned}\tag{4}$$

kde: $u_{xx}, u_{yy}, u_{xy}, v_{xx}, v_{yy}, v_{xy}$ jsou gradienty posuvů druhého řádu.

Korelační kritéria

Korelační kritérium pro hodnocení je míra podobnosti mezi referenčním a deformovaným obrazem, které je definováno před korelační analýzou. Korelační kritéria můžeme rozdělit do dvou skupin, a to na CC (cross – correlation) a SSD (sum of square differences). Tyto korelační kritéria jsou uvedeny na Obr. 15. [12]

Table 1. Commonly used cross-correlation criterion.

CC correlation criterion	Definition
Cross-correlation (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)]$
Normalized cross-correlation (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)}{\bar{f}\bar{g}} \right]$
Zero-normalized cross-correlation (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}$

Table 2. Commonly used SSD correlation criterion.

SSD correlation criterion	Definition
Sum of squared differences (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$
Normalized sum of squared differences (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
Zero-normalized sum of squared differences (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$

Obr. 15 Korelační kritéria CC a SSD [12]

Doplňující vztahy pro korelační kritéria

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2},$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}.$$

(5)

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j),$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j),$$

(6)

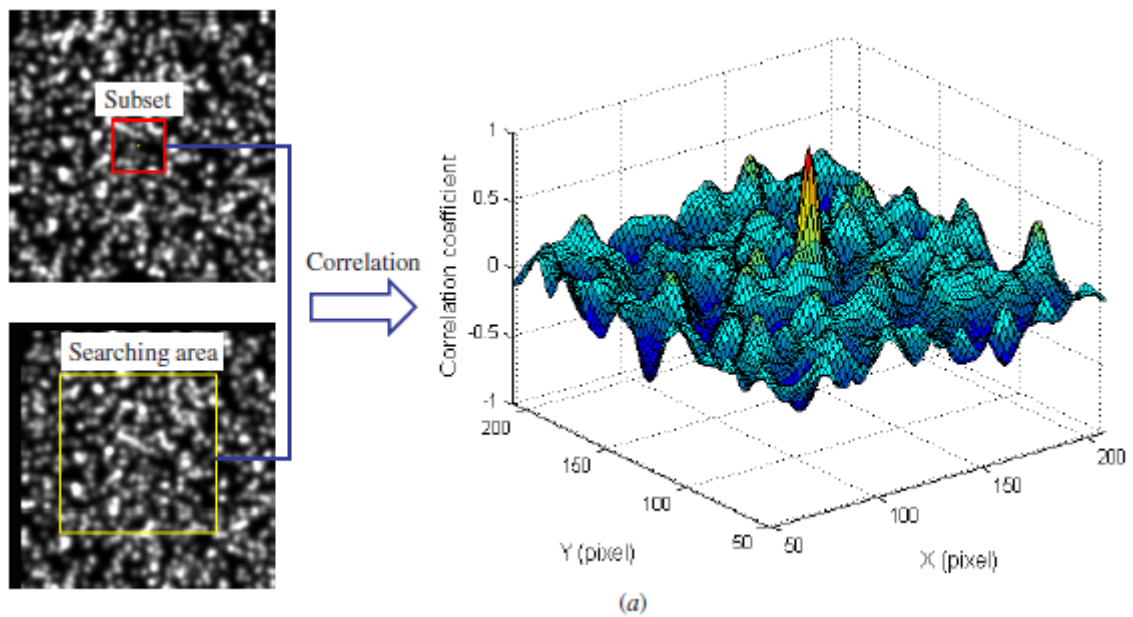
$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2},$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j)]^2},$$

(7)

Z pohledu přesnosti měření se obrazová korelace provádí ve dvou rozlišovacích úrovních. Jak je možné vidět z obr. 14, souřadnice bodu (x'_i, y'_j) v deformované fazetě můžeme nalézt mezi pixely tzv. sub-pixelly. Pomocí korelačních kritérií se rozlišovací pixelová úroveň určí poloha středu fazety před deformováním a po deformování zkušební vzorku. Hledaný bod je ten, který se posunul z referenční fazety a který je získán korelací míry šedi dané fazety. Tento postup je dán pro každou fazetu vytvořený na povrchu zkušební vzorku a tímto se

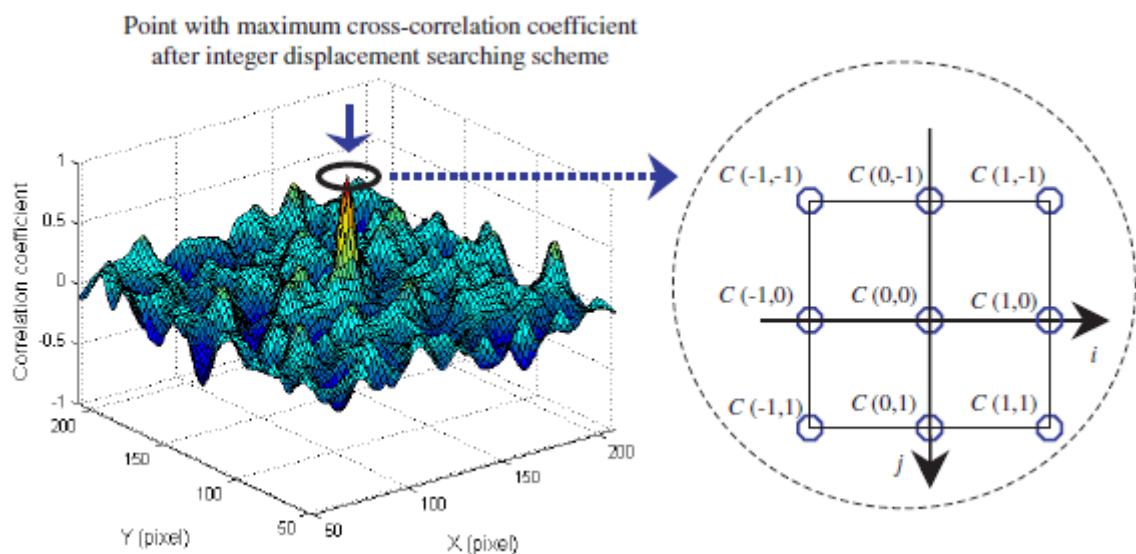
stanoví všechny posunutí bodů s přesností na pixely. V některých případech, ale přesnost na pixely není dostačující, a proto je nutné použít vyšší sub-pixelovou rozlišovací úroveň. [12]



Obr. 16 Výpočet korelačního koeficientu na základě deformovaného obrazce posuvného pohybu [12]

Určení posuvů na pixelové úrovni

Výpočet korelačního koeficientu je získán přes pole posuvů. Průběh korelační funkce v závislosti na posuvech v osách x a y dostaneme tzv. mapováním. Dalším krokem je vyhledána poloha píku korelačního koeficientu. Získáním extrému korelačního koeficientu je určena poloha deformovaného obrazce (Obr. 17).



Obr. 17 Maximální korelační koeficient [12]

Nastavení parametrů v systému ARAMIS

System ARAMIS propočítává deformace na jednotlivých snímcích pomocí velkého počtu kvadratických fazet. Každá fazeta představuje po přepočtu jeden měřící bod. Pro výpočet a znázornění deformací je důležité optimálně nastavit parametry fazet. Kontrastnímu vzoru by měla odpovídat velikost fazety, aby jeho struktura kontrastního vzoru byla zřetelná. Nastavení parametrů fazet ovlivňuje přesnost a dobu výpočtu. Fasetové pole lze na daném objektu manuálně vytvořit a přizpůsobit geometrií objektu. Dále je možné nadefinovat výpočetní masku, která umožňuje propočítávat pouze oblasti na měřeném objektu. Poté je nutné zadat tzv. počáteční body, od kterých začíná výpočet fazety. Tyto počáteční body se zadávají dva na každou stranu modelu zkušební vzorku, aby po fázi přetržení vzorku systém ARAMIS mohl propočítat fazety druhé části zkušební vzorku. Na výsledná data lze použít tzv. filtr, který umožňuje odstranit šum měření na barevné mapě. Tento filtr však neovlivňuje souřadnice 3D bodů. Pokud se na modelu zkušební vzorku objeví mezery ve výsledné barevné mapě, například z důvodu špatně naneseného rastru, lze tyto chybějící mezery dopočítat automatickou interpolací. Tím může být provedena analýza rozložení napětí i v okolí trhliny.

3 NÁVRH EXPERIMENTU PRO MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ V PLOŠNÝCH MATERIÁLECH

3.1 Experimentální část

Cílem práce bylo analyzovat kritické oblasti plastické deformace, které vznikají po překročení mezního stavu materiálu (vznik trhliny) vlivem jednoosého zatěžování. Předmětem testování byly zkušební vzorky s přeplátovanými spoji, které byly statickými zkouškami v tahu ve zkušebním stroji deformovány. Průběhy deformování zkušebních vzorků byly nasnímany pomocí bezkontaktního optického systému ARAMIS 4M. Tímto systémem společně se softwarem ARAMIS od firmy GOM můžeme sledovat mechanické vlastnosti zkušebních vzorků v jednotlivých postupných fázích zatěžování. Nasnímaná data lze po ukončení měřicího procesu okamžitě vyhodnocovat. Měření bylo provedeno v laboratoři VVCD dopravní fakulty Jana Pernera v Doubravících.

3.2 Návrh upínacího přípravku do univerzálního zkušebního stroje

Pro univerzální zkušební stroj, který byl k dispozici v laboratoři dopravní fakulty, bylo zapotřebí nechat vyrobit nové upínací přípravky tak, aby zkušební vzorek umístěný v čelistech těchto přípravků byl pootočený kolmo proti CCD kamerám. Upínací přípravky na provedení zkoušky tahem byly uzpůsobeny zkušebnímu stroji, což umožnilo mnohem snadnější měření a přístup k povrchu vzorků snímaných systémem ARAMIS 4M. Předchozí upínací prvky, jež byly součástí zkušebního stroje, toho nebyly schopny, a proto byly z držáků odejmuty a nahrazeny.

Byly vytvořeny dva identické upínací přípravky, které byly instalované do držáků ve spodní a horní části zkušebního stroje (Obr. 19). Do nich byly postupně upínány zkušební vzorky a byly podrobeny testování. V 3D CAD systému SolidWorks byl vytvořen model sestavy upínacího přípravku a byla zhotovena kompletní výkresová dokumentace potřebná pro výrobu součástí přípravků. Technická dokumentace je vložena do příloh této práce.



Obr. 18 Upínací přípravek



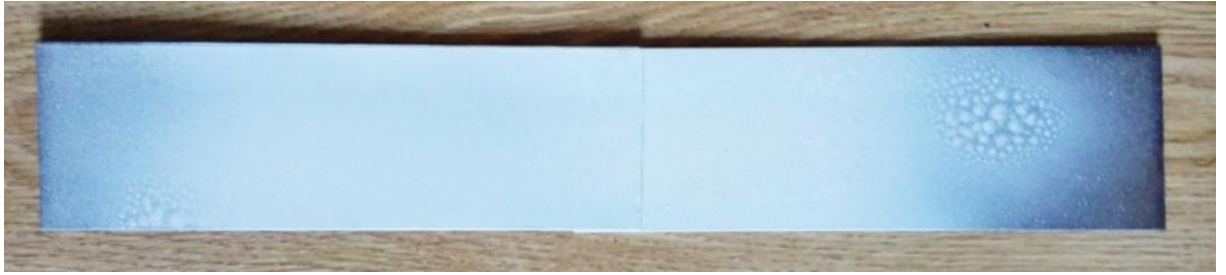
Obr. 19 Umístění upínacích přípravků do držáků zkušebního stroje

Při modelování v SolidWorksu byl brán zřetel na rozměry zkušební vzorku a také na rozměry držáků, do kterých byly upínací přípravky usazeny. Upínací přípravek se skládá ze dvou desek vytvořené z pásové oceli o rozměrech 68 x 158 mm a tloušťce 20 mm (Obr. 18). Na každé desce jsou dva otvory o průměru 14 mm provrtané skrz a jsou od sebe symetricky vzdálené 80 mm. Konce zkušební vzorku byly uchyceny mezi desky, které byly k sobě stáhnuty šroubovými spoji. Odzkoušením prvního zkušební vzorku bylo zjištěno, že hladké strany desek zkušební vzorek neudržely a došlo k prokluzu. Proto bylo provedeno opatření takové, že se konce zkušebních vzorků pomocí ohýbačky ohnuly a do upínacích přípravků byly vloženy přes hranu desky. Tyto konce zkušebních vzorků byly ještě z vrchu přitlačeny destičkou pomocí šroubových spojů. U tohoto způsobu uchycení nastal ovšem další problém, kdy během zatěžování se ohnuté konce zkušební vzorku ustříhli v místě ohnutí. Tento problém byl vyřešen zbrúšením hran desek tak, aby kopírovala poloměr ohnutého konce zkušební vzorku. Dále bylo po celé vnitřní ploše desek vytvořeno drážkování, čímž byl zajištěn větší kontakt povrchu zkušební vzorku s deskami. Tímto způsobem byl zabráněn pohyb zkušební vzorku v upínacím přípravku.

3.3 Zkušební vzorky

Pro experiment bylo vytvořeno několik zkušebních vzorků, jejichž spoje jsou přeplátované. Používaným materiálem pro statickou zkoušku v tahu byly u všech zkušebních vzorků ocelové plechy z oceli S235 (ekv. ČSN 11 373) o tloušťce 1mm, které byly pákovými nůžkami nastříhány na rozměr 50 x 170 mm. Dvojice ocelových plochých materiálů byly přeplátovány a k sobě spojeny tvrdým pájením, svařováním, bodovým svařováním, lepením a šroubovými spoji. Jako základní srovnávací materiál byl použit pás o rozměrech 50 x 300 mm bez vytvořeného spoje.

K tomu, aby bylo možné změřit deformace pomocí optického systému ARAMIS 4M, bylo zapotřebí opatřit zkušební vzorky kontrastním vzorem - rastrem. Rastr by měl odpovídat vzoru, který je uveden v příručce daného výrobce. Při zatěžování se rastr musí deformovat stejně jako zkoumaný zkušební vzorek a po nanesení barev musí mít dostatečnou adhezi. Nejdříve byla pomocí spreje po celé ploše vzorku nanесena základní bílá barva a poté opatrně nanесena barva černá o přiměřené velikosti a hustotě černých skvrn, které na zkušebním vzorku vytvářejí nepravidelný reliéf. Pokud je rastr nevhodný, nemusejí být deformace na zkušebním vzorku systémem ARAMIS 4M vyhodnoceny.



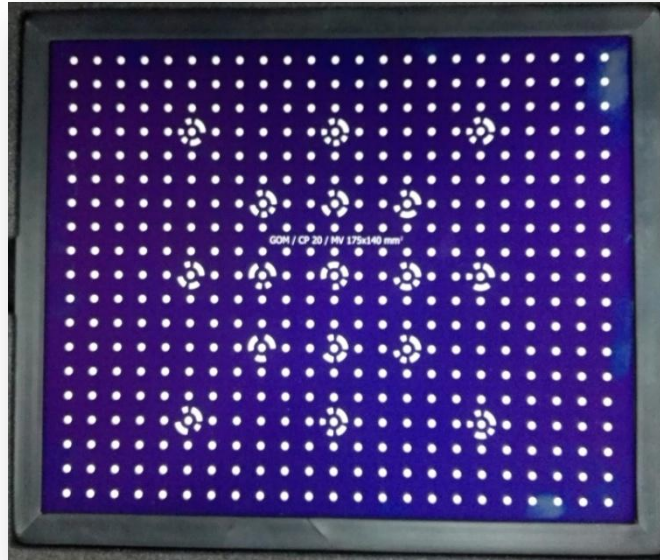
Obr. 20 Zkušební vzorek před nanesením rastru



Obr. 21 Zkušební vzorek po nanesení rastru

3.4 Kalibrování systému ARAMIS 4M

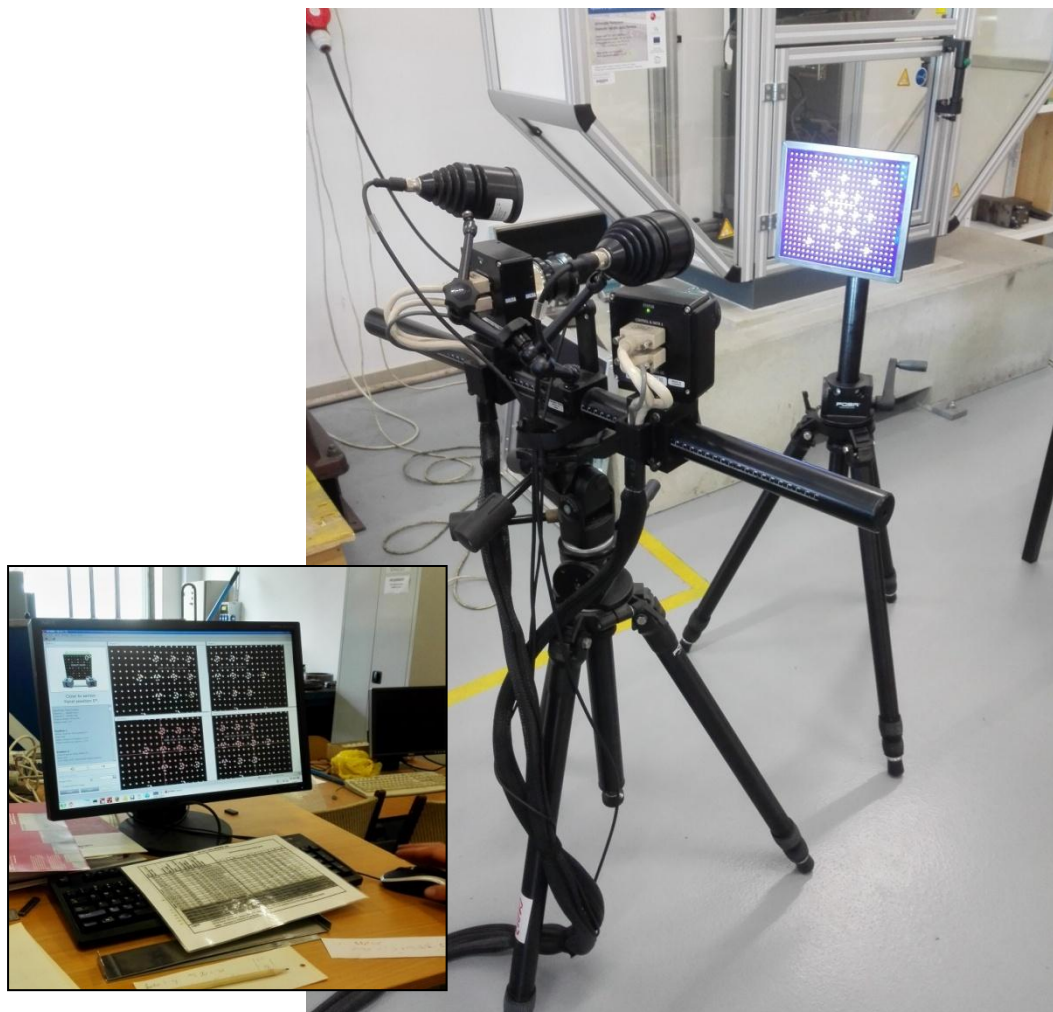
Před provedením samotných testů, je velmi důležité systém ARAMIS 4M kalibrovat. Správné kalibrování nám umožňuje dosáhnout velké přesnosti měření. Kalibrace je provedena pomocí speciálních kalibračních desek, které zajišťují nastavení poloh CCD kamer systému ARAMIS 4M. Existuje několik typů a velikostí kalibračních desek, které může uživatel zvolit. Kalibrační deska je vybrána na základě velikosti zkušebních vzorků, které mají být testovány. Rozměry desky by měly odpovídat přibližně rozměrům zkušebního vzorku. Zvolený typ desky byl zadán do softwaru ARAMIS, aby systém mohl pracovat se všemi hodnotami vzdáleností mezi referenčními body. Tyto referenční body umístěné na kalibrační desce jsou v softwaru uloženy a poté jsou využívány během jednotlivých procesů kalibrace optického měřicího systému ARAMIS 4M.



Obr. 22 Kalibrační deska

3.5 Postup kalibrace

V prvé řadě bylo zapotřebí bezkontaktní optický měřicí systém ARAMIS 4M umístit na určité místo, kde bylo možné provést kalibraci. Kalibrace je důležitá převážně z toho důvodu, aby jednotlivé nasnímané body (tzv. pixely) odpovídaly svojí polohou ve 3D souřadnicovém systému. Podle zvoleného měřicího objemu je v tabulkách systému vyhledána vzdálenost kamer od sebe. Poté nutno provést zaměření kamer na střed obrazu, tak aby se zorná pole překrývala. Kalibrace probíhala pro měřicí objem 125 x 90 mm, což koresponduje s rozměrem měřených vzorků. Obě CCD kamery, umístěné na stativu, byly od sebe vzdáleny 184 mm a natočeny pod úhlem 25° směřující do středu kalibrační desky. Samotná kalibrace byla provedena kalibrační deskou s rozměry 90 x 72 mm² a byla umístěna ve vzdálenosti 475 mm od středu ramene stativu. Následně byla kalibrační deska ve třinácti krocích postupně naklápěná o různé úhly, otáčena a posouvána na levou a pravou kameru podle kalibračního postupu softwaru ARAMIS. Jednotlivé referenční body desky byly snímány CCD kamerami a zároveň identifikovány softwarem. Ke kalibraci nám byl nápomocen svítící laser, který byl umístěn mezi CCD kamerami a mířil přesně na střed kalibrační desky.



Obr. 23 Proces kalibrování

Pokud kalibrace proběhla správně, přistoupili jsme k měření tím, že stativ se CCD kamery jsme přemístili před zkušební stroj, ve kterém byl umístěn zkušební vzorek. Vzdálenost CCD kamer od zkoušeného vzorku musí být stejná, jako byla během kalibračního procesu od kalibrační desky. Následně byly objektivy CCD kamer zaostřeny do určité vzdálenosti a podle osvětlení byly také nastaveny clony.

Přesnost kalibrace je zjišťována na základě kalibrační odchylky, která je dána odchylkami v pixelech. Kalibrační odchylkou je určeno, jestli kalibrace systému proběhla správně anebo nikoliv. Výrobce systému ARAMIS 4M uvádí, že maximální odchylka kalibrace, která může být použita, je 0,04 pixelů. Tato chyba je velmi malá, a proto systém ARAMIS 4M je schopný poměrně přesně měřit deformace. Pokud podmínka není splněna a kalibrační odchylka je větší než 0,04 pixelů, znamená to, že hodnota odchylky v měření by také byla mnohem vyšší. Software zobrazí uživateli zprávu, že kalibrace není provedena správně. V tomto případě je nutné kalibraci provést znova.

4 EXPERIMENT A VYHODNOCOVÁNÍ

4.1 Postup měření

Jestliže samotná kalibrace měřicího systému ARAMIS 4M proběhla správně a nebyla nahlášena žádná chyba, mohli jsme přistoupit k vlastnímu měření. Zkušební vzorek s rastrem byl vložen do čelistí upínacích přípravků a byl dostatečně stáhnutý šroubovými spoji. Upínací přípravek společně se zkušebním vzorkem byl následně umístěn do držáků zkušebního stroje, kde bylo provedeno samotné testování. Podélná osa zkušebního vzorku by měla být vždy rovnoběžná se směrem zatížení. Stativ se CCD kamerami byl postaven před zkušební stroj tak, aby CCD kamery směřovaly přímo na plochu zkušebního vzorku s rastrem a mohly snímat průběh deformování.



Obr. 24 Proces měření optickým měřícím systémem ARAMIS 4M

V softwaru ARAMIS byla nadefinována frekvence snímkování. Frekvencí snímkování se rozumí počet snímků zaznamenaných za určitý časový interval. Ta byla definována v závislosti na mechanických vlastnostech různých typů zkušebních vzorků. Pro většinu vzorků byla frekvence snímkování nastavena shodně na 1 snímek za 5s. Před začátkem samotného snímání byla zkontrolována kvalita rastru. Ta byla provedena fiktivní simulací deformování lehkým pohybem vzorku, čímž se v daném softwaru ověřila kvalita zobrazené

sítě – nepravidelného rastru. Pokud měřicí systém ARAMIS 4M nezaznamená sledovaný kontrastní vzor na zkušební vzorku (například vlivem odlesků od nanesené barvy nebo vlivem nepřiměřené velikosti a hustotě barvy), není možné měření uskutečnit. Je-li rastr měřicím systémem uznán za vhodný, přistoupí se k měření. To bylo provedeno spuštěním zkušebního stroje a zároveň i optického systému ARAMIS, kde CCD kamery podle námi zvolené frekvence nasnímalý veškeré změny jednotlivých bodů na zkušební vzorku během zatěžování. Měřením zjišťujeme povrchové deformace v kritických oblastech zkušební vzorku, kde dochází k překročení mezního stavu materiálu (trhlina) vlivem jednoosého zatěžování. V tomto případě na zkušebních vzorcích sledujeme kritické oblasti ve spojích a jejich okolí. Dále jsme také získali u všech zkušebních vzorků tahové charakteristiky, kde rychlost zatěžování zkušebního stroje byla nastavena na 20 mm/min. Z této tahové zkoušky jsme dostali grafy závislosti $F = f(l)$, které jsou uvedeny v příloze.

4.2 Vyhodnocení

Pro vyhodnocení každého typu zkušební spoje s přeplátováním, které jsou v univerzálním zkušebním stroji ZD 10/90 namáhány jednoosým tahem, sledujeme vznik plastického lomu – trhliny. Nejvíce nás však zajímá okamžik těsně před překročení mezního stavu materiálu, kde dochází k největším deformacím. V místě největší deformace dochází k zúžení šířky a tloušťky materiálu (tvoří se tzv. krček). Jednotlivé fáze deformování jsou zaznamenány optickým systémem ARAMIS 4M, které nám umožňují sledovat mechanické vlastnosti materiálu. Rozložení deformace zjistíme vytvořením rovinného řezu po celé délce modelu zkušební vzorku a to v místě začínající trhliny. Tím získáme průběhy závislosti hlavní deformace na délce řezu (v grafech uvedeno anglicky jako Major strain [%] v závislosti na Section length [mm]). V oblasti plastické deformace nás zajímá velikost a šíře deformace daného přeplátovaného spoje. Tvary křivek tak vyjadřují mechanické vlastnosti přeplátovaného spoje při jednoosém zatěžování.

Vztah pro získání normálového napětí v tahu:

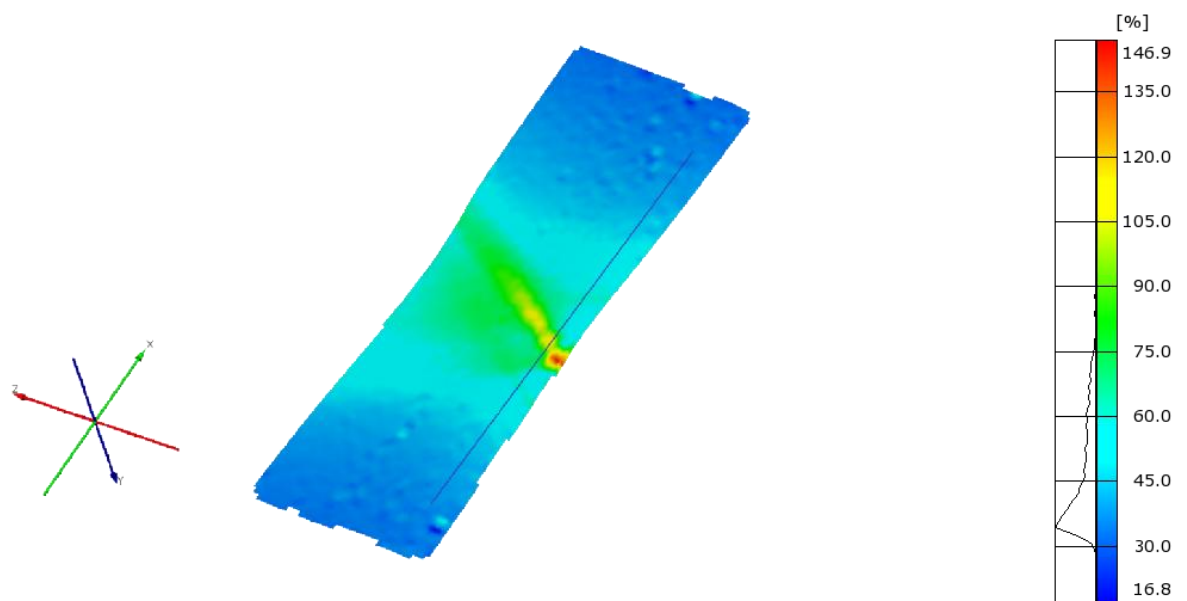
$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (8)$$

σ normálové napětí v tahu [MPa]
 F normálová síla[N]
 Splocha průřezu zkušební vzorku [mm^2]

4.2.1 Použité zkušební vzorky

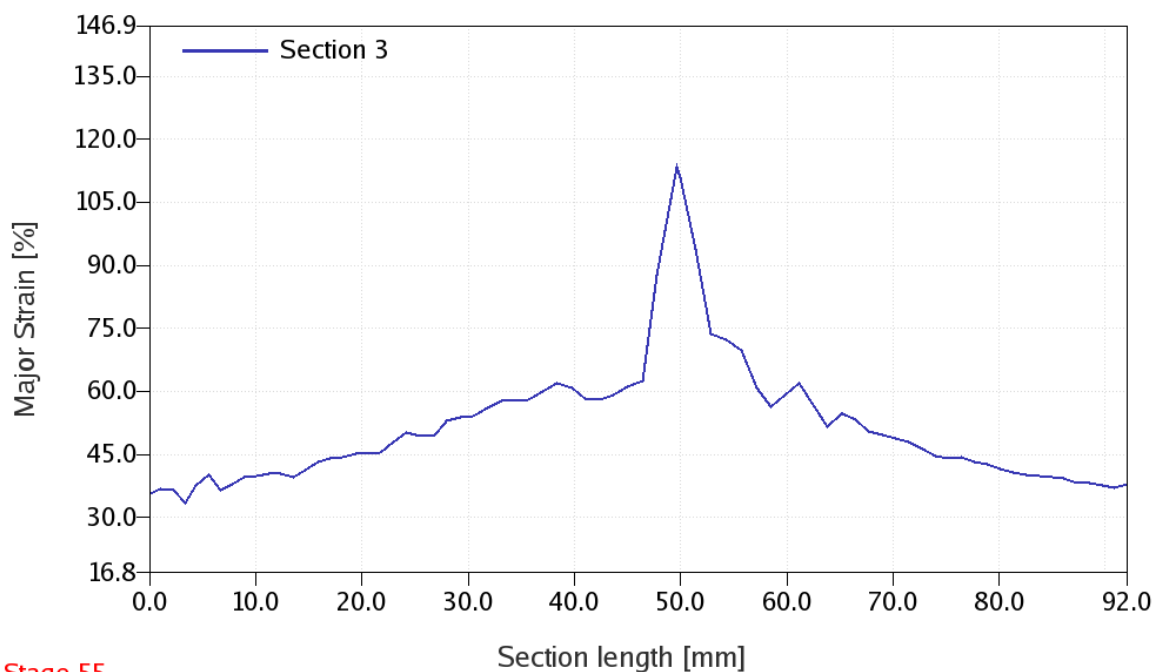
Referenční vzorek bez vytvořeného spoje

Referenční vzorek byl testován bez vytvořeného spoje. Jeho mechanické vlastnosti zjišťujeme standardní zkouškou tahem podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Tato norma stanovuje metodu provedení tahové zkoušky. Podstatou tahové zkoušky je deformace zkušební vzorku tahovým zatížením ve zkušební stroji až do jeho lomu za účelem získání mechanických vlastností. Během zkoušky byla zaznamenávána závislost působící síly na dráze. Tuto závislost lze přepočítat na závislost normálového napětí na poměrné deformaci. Normálové napětí v tahu získáme ze vzorce (8). Tvary a rozměry zkušebních tyčí jsou normou definovány. V našem případě se jedná o plochý zkušební vzorek o rozměrech 50 x 300 mm a tloušťky 1 mm. Tento referenční vzorek slouží převážně pro porovnání s ostatními zkušebními spoji.



Obr. 25 Referenční vzorek před porušení

Na obr. 25 je zobrazen model referenčního vzorku bezprostředně před jeho porušením. Na modelu referenčního vzorku byla použita automatická interpolace 3D bodů, která nezobrazené mezery (vlivem nedokonalého rastru na vzorku) vyplnila. V místě vzniku trhliny byl podél okraje referenčního vzorku proložen rovinný řez (section 3), který vyhodnotil rozložení deformace v celé délce řezu (Viz Graf 1).



Stage 55

ARAMIS

UPCE
KMMCS

4/11/16

gom
www.gom.com

Graf 1 Rozložení deformace v podélném řezu referenčního vzorku bez spoje

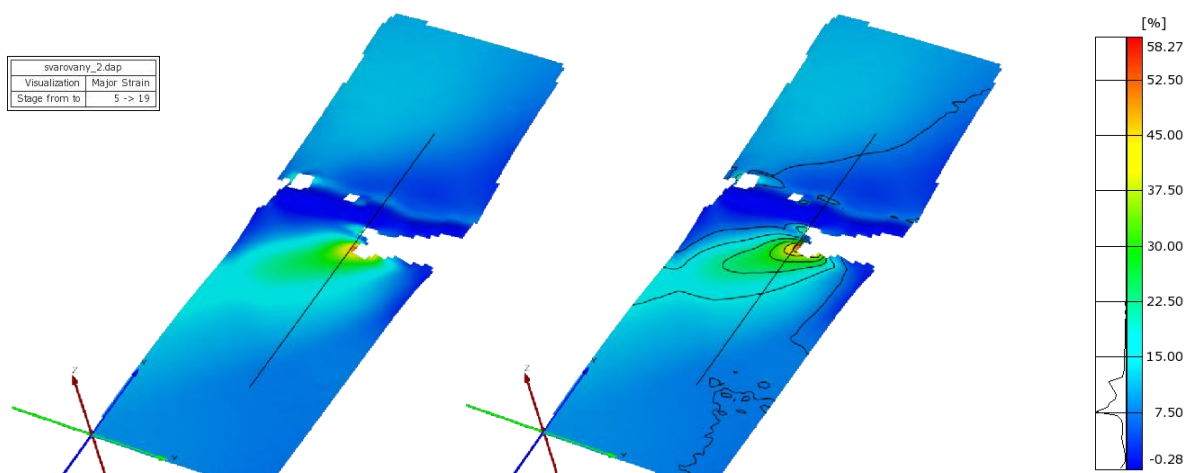
Z grafu 1 je patrné, že referenční vzorek je deformován po celé jeho délce. K výrazným deformacím dojde až po překročení meze pevnosti. Trhlina se šířila od okraje zkušební vzorku do středu. Průběh síly v závislosti na dráze byl získán z tahové zkoušky a je uveden v příloze A (graf 9). Maximálního normálového napětí je 261 MPa při maximální síle 13,7 kN.



Obr. 26 Referenční vzorek po porušení

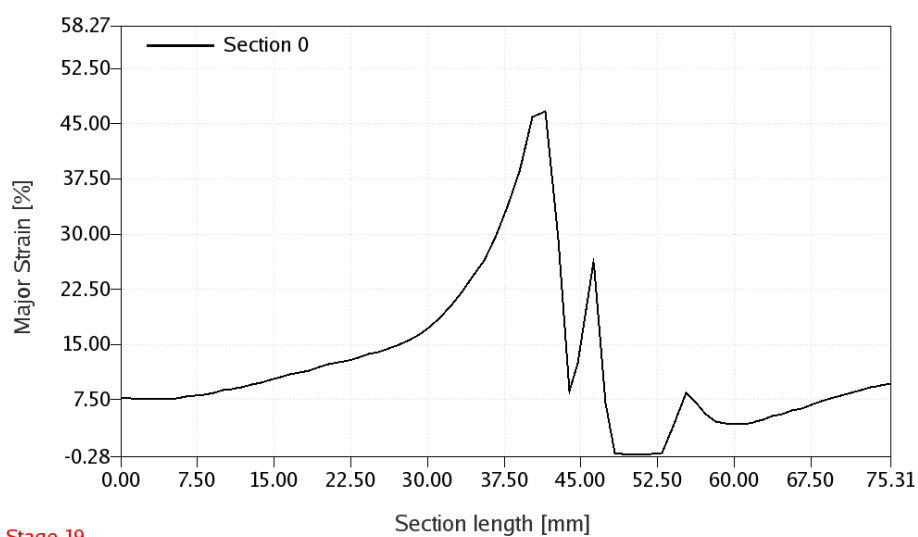
Zkušební vzorek – svařovaný přeplátovaný spoj

Zkušební vzorek má jednostranně svařovaný přeplátovaný spoj. Mechanické vlastnosti svařovaného spoje byly stanoveny provedením statické zkoušky tahem. Svařovaný zkušební vzorek byl ve zkušební stroji namáhán jednoosým tahem v podélném směru až do jeho porušení. Normálové napětí v tahu získáme vzorcem (8). Zkušební vzorek má šířku 50 mm, tloušťku materiálu 1 mm a šířka svaru 4 mm. Svary byly vytvořeny svařováním MAG.



Obr. 27 Model svařovaného zkušebního spoje před úplným porušením (bez a s izočáry)

Na obr. 27 vidíme model zkušebního vzorku během fáze porušení. Trhlina se vlivem zvyšujícího se zatěžování objevila na okraji svařovaného spoje. Tedy v místech strukturálních poruch, kde dochází ke koncentraci napětí. V průřezu nastává nerovnoměrné rozložení napětí a toto napětí dosahuje maxima v kořeni trhliny (viz Obr. 27). Trhlina se šíří těsně pod svarovým kovem v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Tato tepelně ovlivněná oblast vzniká při procesu svařování, kde se v důsledku vneseného tepla ohřívá i okolní oblast materiálu. Vysoké teploty a jejich rychlé změny způsobují změnu struktury svarového spoje nebo změnu objemu, které způsobí značné vnitřní napětí a deformace. Z hlediska mechanických vlastností se tato oblast stává nejslabším místem.



Stage 19

ARAMIS

UPCE
KMMCS

VVCD
4/18/16

gom
www.gom.com

Graf 2 Rozložení deformace v podélném řezu svařovaného zkušební spoje

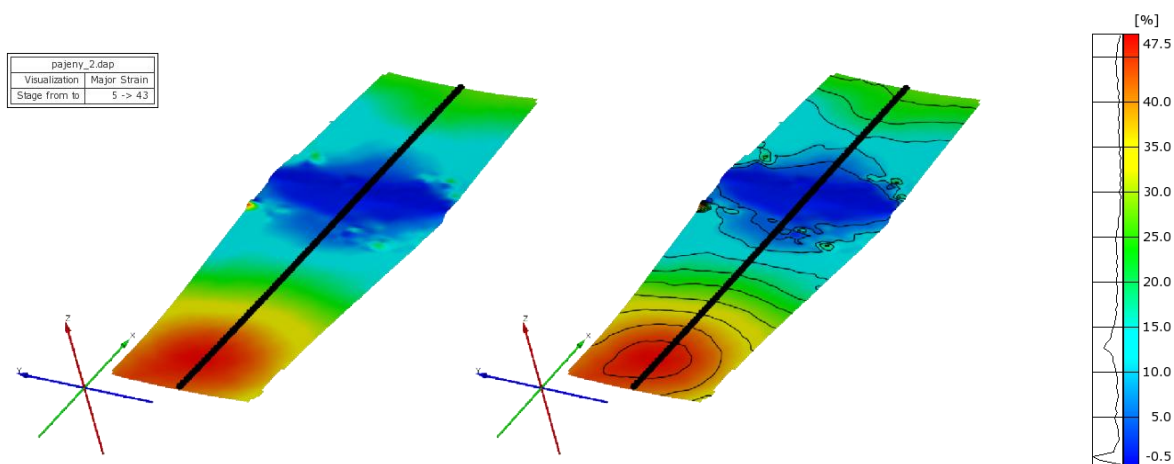
V kořeni trhliny byl v modelu svařovaného zkušební vzorku v podélném směru zaveden rovinný řez (section 0). Rozložení deformace na délce řezu je zobrazeno na grafu 2. Maximální normálové napětí je 330 MPa při maximální síle 16,5 kN. Průběh síly v závislosti na dráze je uveden v příloze B (graf 10).



Obr. 28 Svařovaný zkušební spoj po porušení

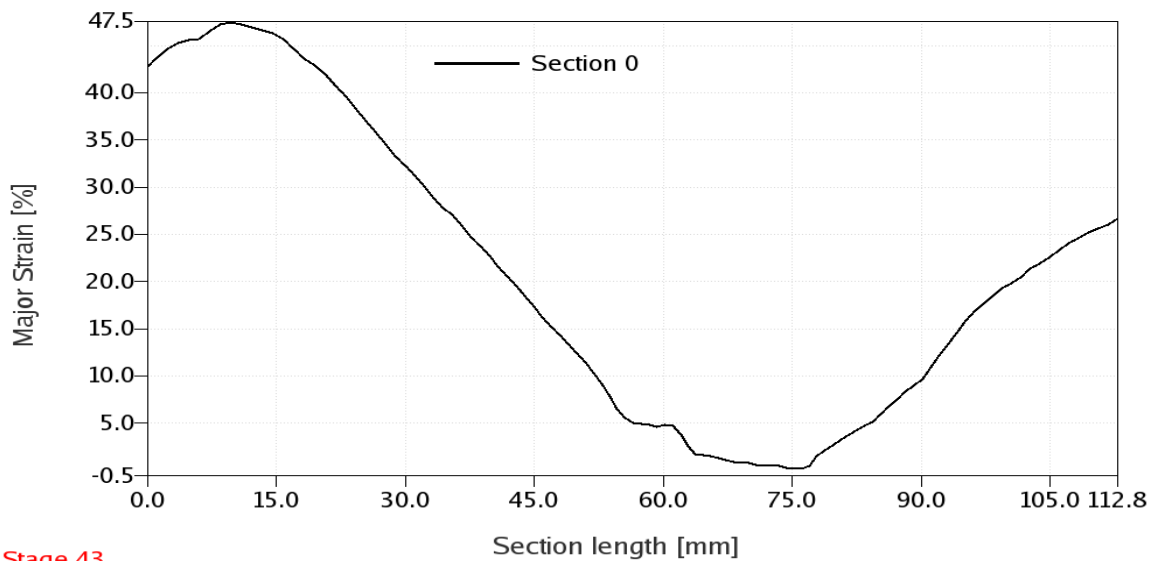
Zkušební vzorek – pájený přeplátovaný spoj

Zkušební vzorek má pájený přeplátovaný spoj. Mechanické vlastnosti pájeného spoje byly stanoveny provedením statické zkoušky tahem. Pájený zkušební vzorek byl umístěn do zkušebního stroje, který byl namáhán jednoosým tahem v podélném směru až do jeho porušení. Normálové napětí v tahu získáme ze vzorce (8). Délka pájeného přeplátování je 5 mm, šířka materiálu je 50 mm, tloušťka materiálu je 1mm a tloušťka mosazné pájky je 0,5 mm.



Obr. 29 Model pájeného zkušebního spoje před vznikem trhliny (bez a s izočáry)

Na obr. 29 vidíme model zkušebního vzorku těsně před jeho porušením. K lomu zkušebního spoje došlo v základním materiálu mimo dosah snímání kamer, kde pájený spoj zůstává bez porušení. Při tomto namáhání jednostranně přeplátovaného spoje nastal působením mírný ohybový moment deformace spoje, v němž vznikla kombinace tahového a smykového namáhání. Na čelní hraně přeplátovaného spoje byl vytvořen koutový přechod pájky, který zvýšil únosnost spoje vlivem zvětšené pájené plochy.



Stage 43

ARAMIS

UPCE
KMMCS

VCD
4/18/16

gom
www.gom.com

Graf 3 Rozložení deformace v podélném řezu pájeného zkušební spoje

Podélný rovinný řez (section 0) je veden středem modelu pájeného zkušební vzorku. Rozložení deformace v závislosti na délce řezu je zobrazeno na grafu 3. Maximální normálové napětí je 362 MPa při maximální síle 18,1 kN. Průběh síly v závislosti na dráze je zobrazeno v příloze C (Graf 12).



Obr. 30 Pájený Zkušební vzorek po porušení

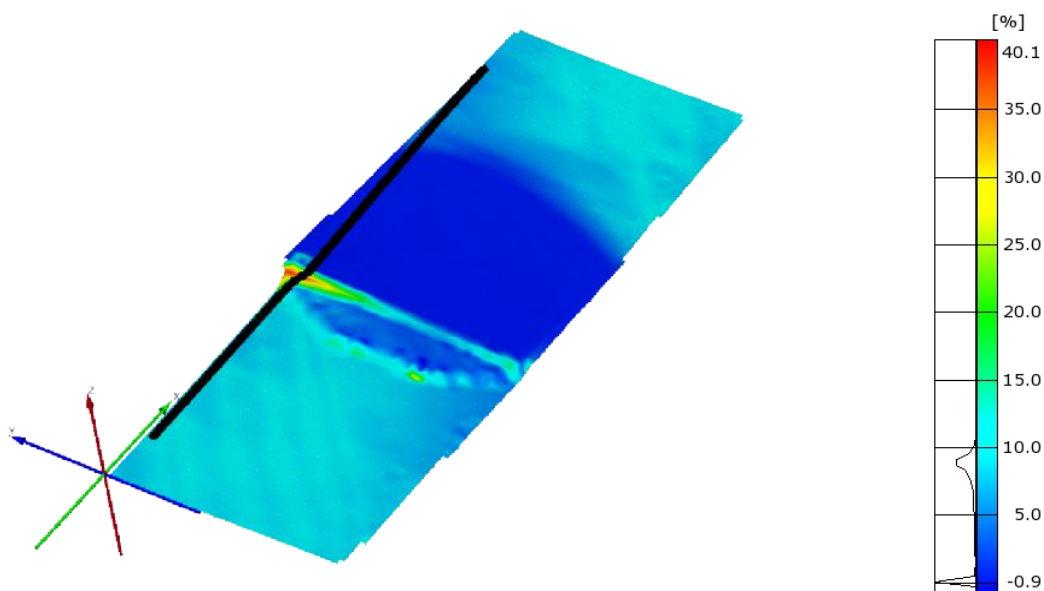
Zkušební vzorek - lepený přeplátovaný spoj

Zkušební vzorek má lepený jednostranně přeplátovaný spoj. Mechanické vlastnosti lepeného spoje zjišťujeme podle normy ČSN EN 1465. Tato evropská norma stanovuje metodu zkoušky, jejímž cílem je stanovit pevnost ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. Zkouška se provádí se na standardních zkušebních tělesech za předepsaných podmínek přípravy a zkoušení. Zkušební vzorek byl v univerzálním zkušebním stroji ZD 10/90 namáhán ve smyku statickým tahem v podélném směru až do jeho porušení. Předúprava povrchu před lepením spočívala v odmaštění povrchu a otryskání povrchu keramickým abrazivem o zrnitosti 0,5 až 2 mm. K lepení bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo DP 490 3M. Délka lepeného přeplátování je 40 mm, šířka materiálu je 50 mm, tloušťka materiálu je 1mm a tloušťka lepidla je 0,3 mm.

Vztah pro získání smykového napětí v tahu:

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (9)$$

τ smykové napětí v tahu [MPa]
F.....síla [N]
S.....lepená plocha [mm²]



Obr. 31 Model zkušebního spoje těsně před porušením

Na obr. 31 vidíme model lepeného zkušebního vzorku, který byl zaznamenán těsně před jeho porušením. U tenkých materiálů (jako je v tomto případě), dochází ke vzniku ohybového momentu, který vzniká následkem excentricky zatíženého spoje (Viz obr. 32). Tento ohybový

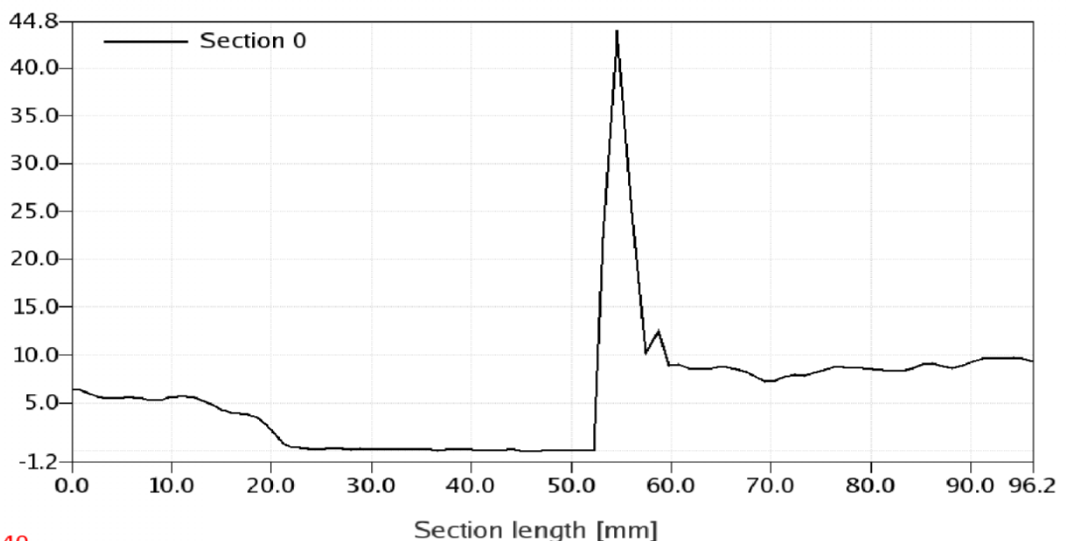
moment zaznamenal v jednotlivých fázích zatěžování systém ARAMIS, který umožňuje vyhodnocovat reálné deformace i ve 3D.



Obr. 32 Boční pohled lepeného zkušební spoje

Tahové napětí se koncentruje především na obou koncích přelátování a působí zde síly, které podporují odlupování. Při zvyšujícím se zatěžování dochází na obou koncích přelátování k napětím, které způsobí od okrajů směrem ke středu lepené plochy narušení a roztržení spoje. Smykové síly jsou nejvyšší v blízkosti okrajů na obou koncích přelátování a nejnižší uprostřed lepené plochy. Vyšší pevnosti spoje dosáhneme použitím tlustších materiálů, čímž se sníží vliv ohybového momentu a dojde k rovnoměrnějšímu rozložení smykového napětí.

Stage 40



Stage 40

ARAMIS

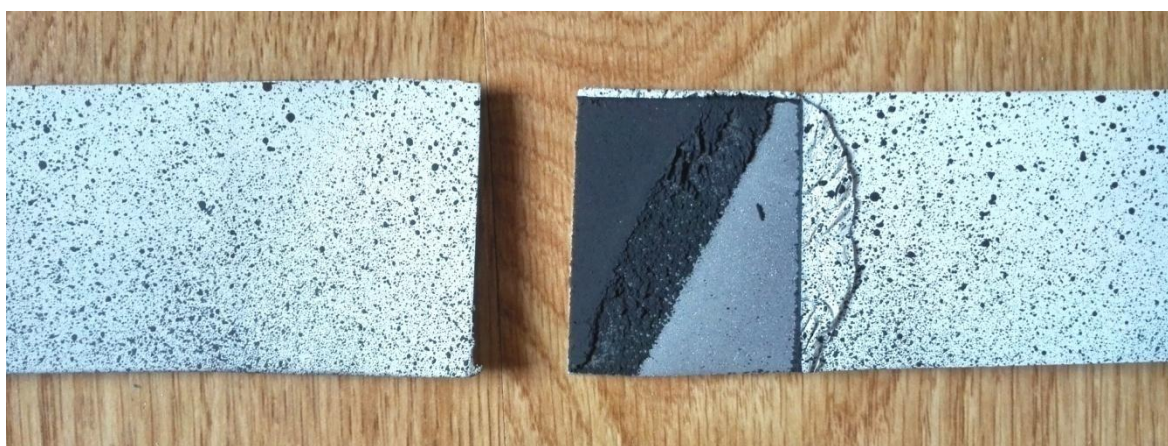
UPCE
KMMCS

VVCD
4/18/16

gom
www.gom.com

Graf 4 Rozložení deformace v podélném řezu lepeného zkušební spoje

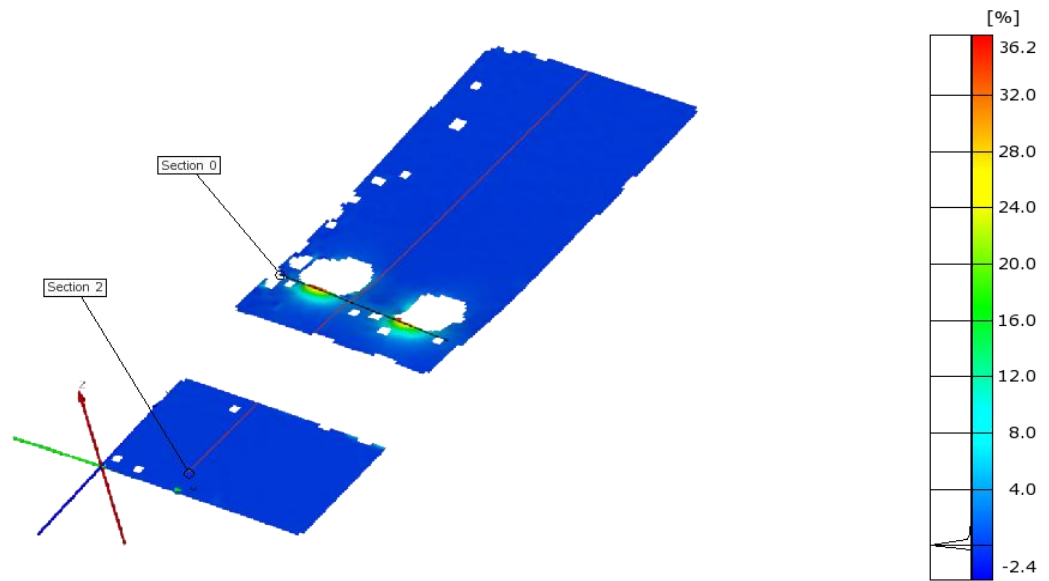
Podél okraje lepeného zkušební vzorku byl zaveden podélný rovinný řez (section 0). Rozložení deformace vytvořený řezem v podélném směru je zobrazen na graf 4. Dosažené maximální smykové napětí je 8,8 MPa při maximální síle přetržení 17,5 kN. Průběh síly v závislosti na dráze je uveden v příloze D (Graf 14). Trhlina lepeného spoje vznikla na okrajích přeplátovaného spoje, kde napětí dosahují maximálních hodnot. Při statickém zatěžování došlo v lepeném spoji k adheznímu porušení lepidla a to na obou částech ocelových plechů. Kohezní porušení nastalo v úzkém pásu úhlopříčně (pod úhlem 45°). Toto lepidlo vykazuje za daných podmínek velmi uspokojivé mechanické vlastnosti a dosahuje velké pevnosti ve smyku při jednoosém tahovém namáhání.



Obr. 33 Lepený zkušební spoj po porušení

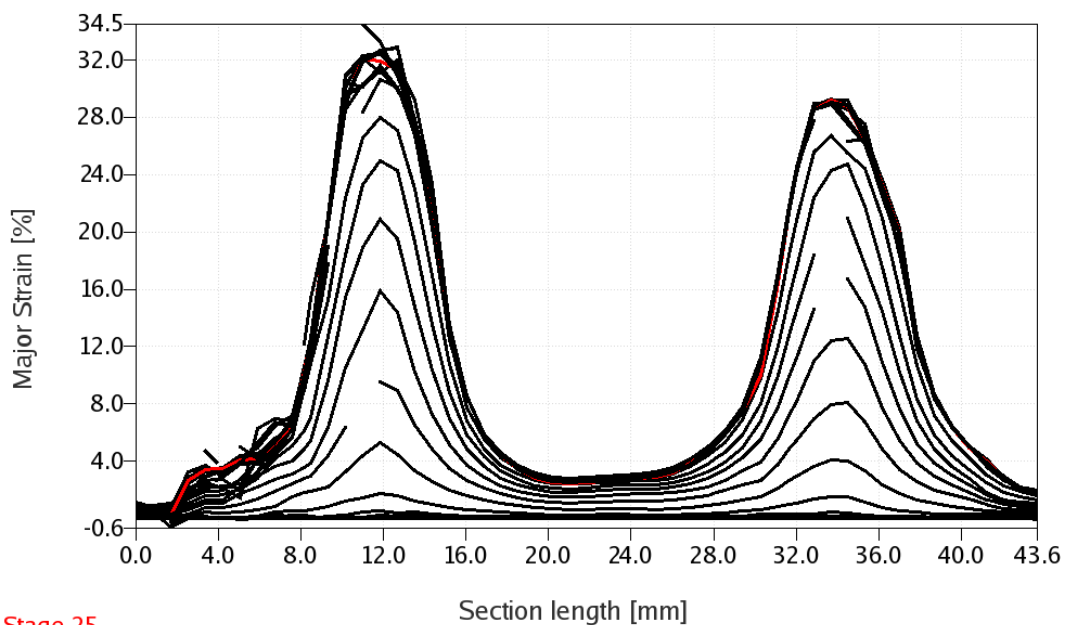
Zkušební vzorek – šroubové spoje v přeplátování

Zkušební vzorek má šroubové spoje v přeplátování. Mechanické vlastnosti šroubovaného spoje byly stanoveny provedením tahové zkoušky. Zkušební vzorek byl ve zkušebním stroji opět namáhán jednoosým statickým tahem a to v podélném směru až do jeho poškození. Zkušební vzorek má dva šroubové spoje od sebe vzdálené 20 mm a jsou umístěné v přeplátování vedle sebe. Šrouby mají průměr 4 mm (M 4 x 10 ISO 4017 – 8.8), šířka materiálu je 50 mm a tloušťka plechu je 1 mm.



Obr. 34 Model šroubovaného zkušební spoje před úplným porušením

Na obr. 34 vidíme model šroubovaného zkušebního vzorku při jeho porušení. Z obrázku je patrné, že maximální deformace vznikají na okraji otvorů pro šroubové spoje. V tomto případě zároveň došlo i k poškození závitů šroubů maticemi a tím nastala úplná destrukce šroubových spojů.



Stage 25

ARAMIS

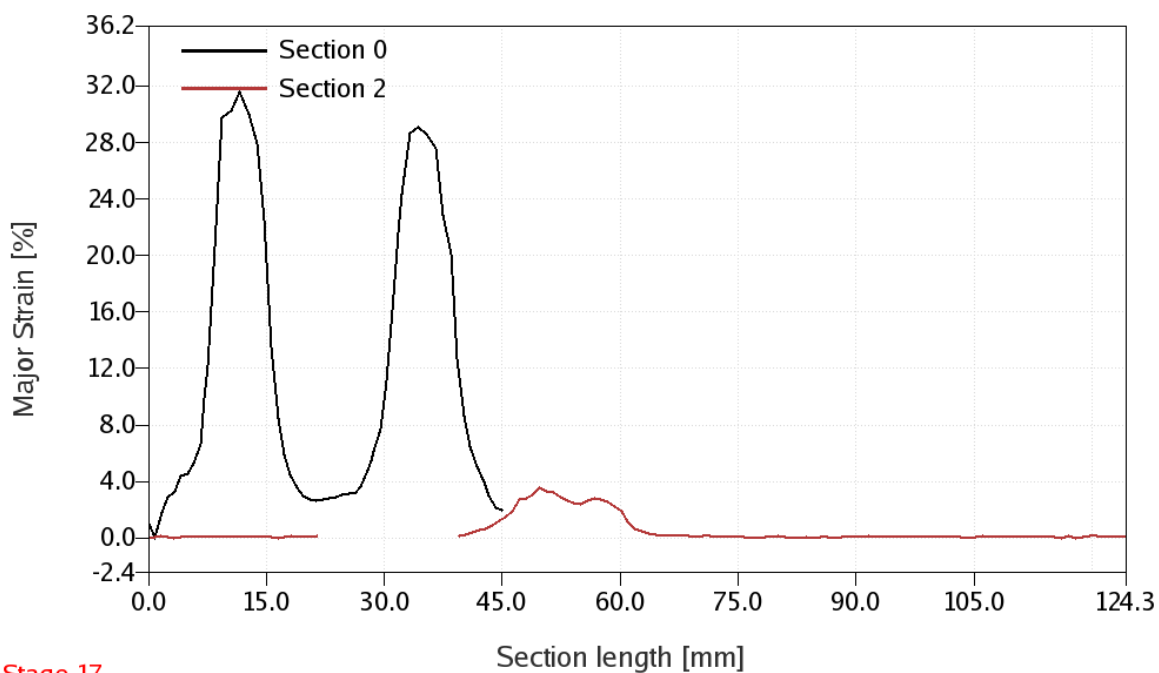
UPCE
KMMCS

VVCD
4/19/16

gom
www.gom.com

Graf 5 Rozložení deformace v příčném řezu pro každou úroveň zatížení šroubovaného zkušebního spoje („section 0“ na obr. 34)

Rovinný řez (section 0) je umístěn příčně těsně u okrajů děr pro šroubové spoje. Na grafu 5 vidíme průběh hlavní deformace v závislosti na příčné délce řezu pro každou úroveň zatížení (tzv. stage). Dosažená maximální síla, která byla naměřena při porušení spoje je 11,4 kN. Průběh síly v závislosti na dráze je uveden v příloze E (Graf 16). Rozložení deformace v příčném řezu (section 0) i podélném řezu (section 2) je uvedeno na grafu 6.



Stage 17

ARAMIS

UPCE
KMMCS

VVCD
4/19/16

gom
www.gom.com

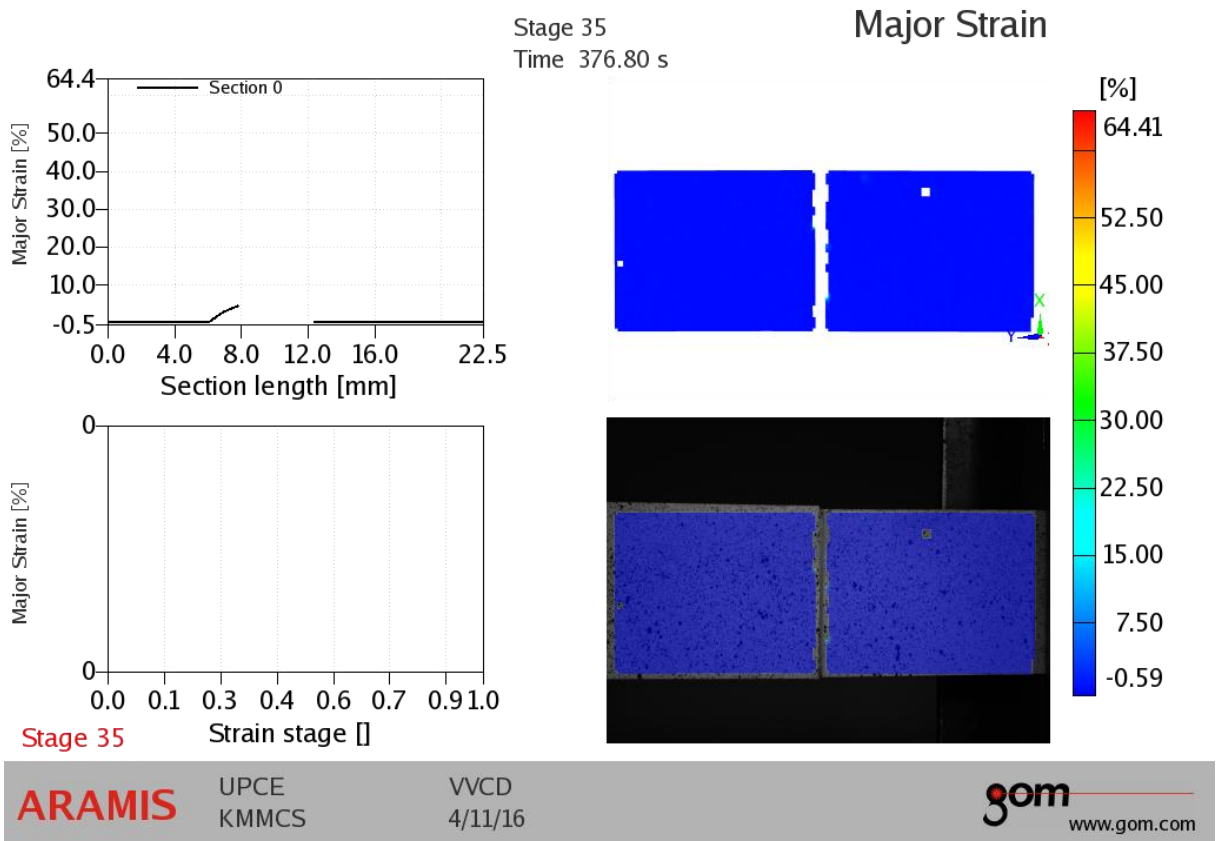
Graf 6 Rozložení deformace v příčném a podélném řezu šroubovaného zkušební spoje



Obr. 35 Šroubovaný zkušební spoj po porušení

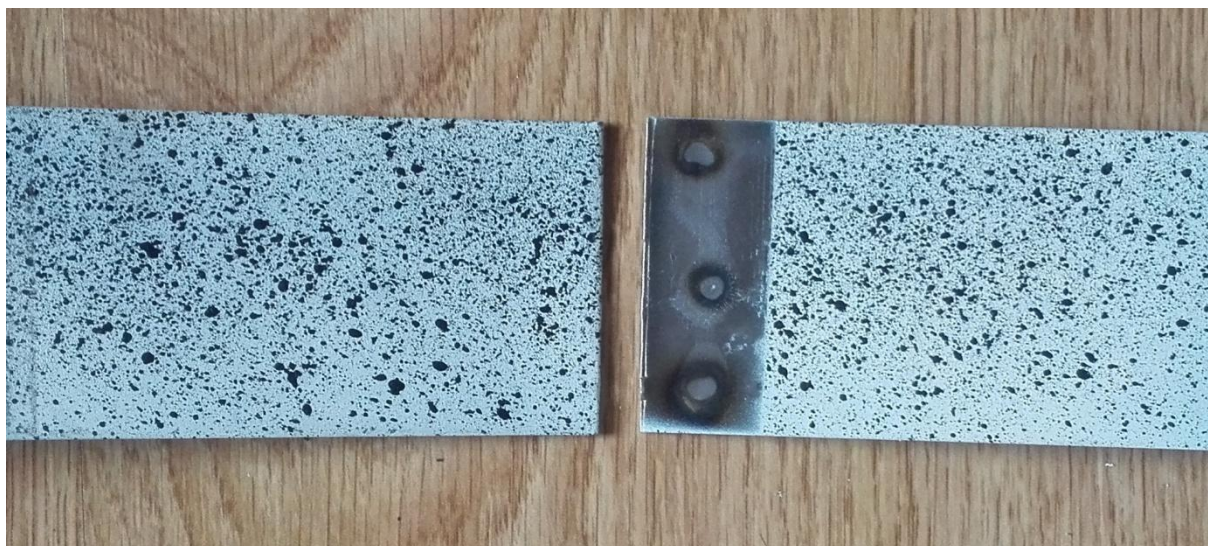
Zkušební vzorek – bodově svařovaný přeplátovaný spoj

Zkušební vzorek má bodově svařovaný přeplátovaný spoj. Mechanické vlastnosti bodově svařovaného spoje byly stanoveny provedením tahové zkoušky. Zkušební vzorek byl opět ve zkušební stroji namáhán jednoosým statickým tahem v podélném směru až do jeho porušení. Byly provedeny tři bodové svary od sebe vzdálené přibližně 20 mm a jsou umístěné v přeplátování vedle sebe. Průměr bodového svaru byl přibližně 4 mm. Zkušební vzorek má šířku 50 mm a tloušťka materiálu je 1 mm.



Obr. 36 Rozložení deformace v podélném směru a model bodově svařovaného zkušebního spoje po porušení

Na obr. 36 vidíme rozložení deformace v podélném směru a model zkušební vzorku po poruše. K poruše spoje došlo v bodových svarech a to při tahové síle 4,7 kN. Důvodem nízké pevnosti jsou malé velikosti bodových svarů, které vznikly nedokonalým tavným spojením mezi materiály. Příčinou může být nízký svařovací proud.



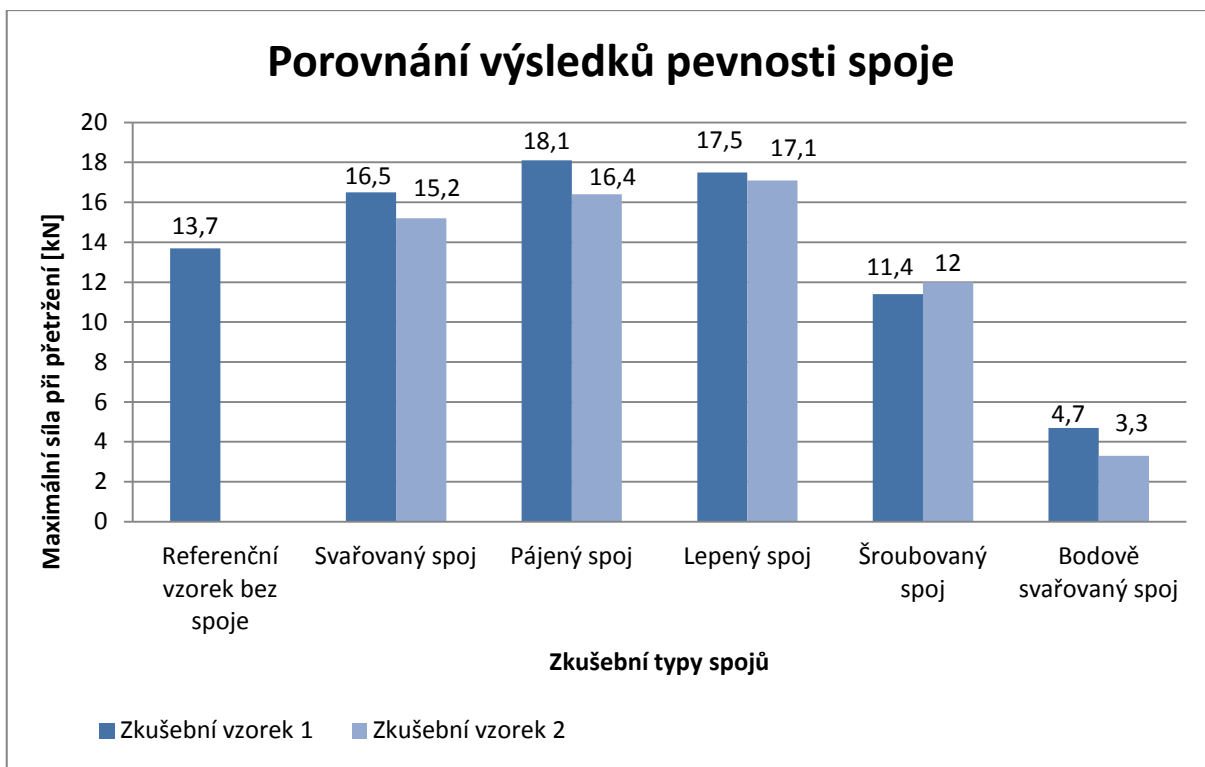
Obr. 37 Bodově svařovaný zkušební spoj po porušení

Každý typ zkušebního spoje byl testován pro dva vzorky připravené stejným způsobem.

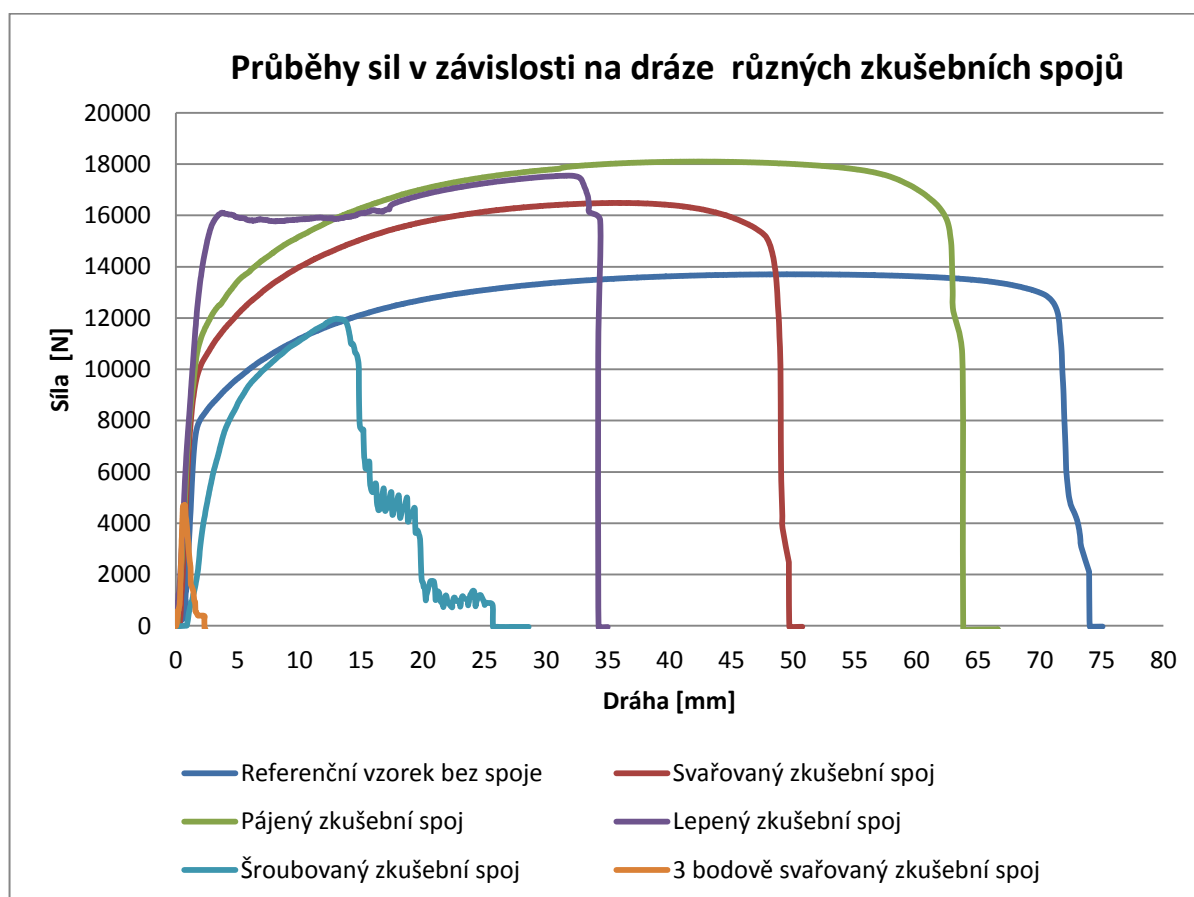
4.3 Porovnání dosažených výsledků pevnosti spoje

Stanovení pevnosti zkušebního spoje byla provedena vyhodnocením tahové zkoušky na univerzálním zkušebním stroji ZD 10/90 za normálních teplot 20°C. Předmětem testování byly zkušební spoje s překlátováním, které byly svařované, bodově svařované, pájené (tvrdou pájkou), lepené a šroubované (dvěma šrouby s maticemi a s podložkami). Toto testování probíhalo současně s měřením deformací na stejných vzorcích. Každý typ zkušebního spoje byl testován pro dva vzorky připravené stejným způsobem. Dále byl otestován referenční vzorek bez vytvořeného spoje, který slouží pro porovnání s ostatními zkušebními vzorky. Všechny dosažené výsledky maximálních sil při přetržení jsou uvedené na grafu 7 a jejich průběhy sil v závislosti na dráze na grafu 8.

Je zřejmé, že nejvyšší tažnost má plech bez vytvořeného spoje. U ostatních spojů je prodloužení před přetržením menší. Nicméně celková energie pro porušení je srovnatelná pro spoje svařovaný a pájený (energie je plocha pod křivkou). Lepený spoj má energii pro porušení nižší, ale i tak je řádově vyšší než v případě šroubové spoje.



Graf 7 Porovnání maximální síly při přetržení v závislosti na typu zkušebního spoje



Graf 8 Porovnání průběhů sil v závislosti na dráze různých typů zkušebních spojů

5 ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabýval porovnáním mechanických vlastností jednotlivých typů zkušebních spojů po provedení destruktivní zkoušky. Pro stanovení pevnosti spoje byla u každého typu zkušebního spoje provedena statická zkouška tahem. Dále byla provedena analýza kritických oblastí spoje těsně před jeho porušením a vyhodnocení bylo provedeno pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS 4M. Součástí zadání práce bylo také navrhnout vhodné řešení uchycení zkušebního vzorku do univerzálního zkušebního stroje ZD 10/90 pro měření systémem ARAMIS 4M.

Vyhodnocením tahové zkoušky se zjistilo, že vyšších pevností dosahovaly zkušební vzorky pájené a lepené. Jejich pevnosti spoje byly téměř srovnatelné a pohybovaly se na hodnotě 17,5 kN. Nižších pevností ze všech měření bylo dosaženo u šroubovaného a bodově svařovaného zkušebního spoje. Šroubované spoje dosahovaly pevnosti o průměrné hodnotě 11,7 kN a bodově svařované spoje pouhých 4 kN. Důvodem nízké pevnosti bodově svařovaného spoje bylo nedokonalé tavné spojení mezi materiály. Příčinou mohl být nízký svařovací proud.

Dále je zřejmé (i podle grafu 8), že nejvyšší tažnost měl plech bez vytvořeného spoje. U ostatních spojů byla prodloužení před přetržením menší. Nicméně celková energie pro porušení byla srovnatelná pro spoje svařované a pájené (energie je plocha pod křivkou). Lepené spoje měli energii pro porušení nižší, ale i tak byla řádově vyšší než v případě šroubovaného spoje.

Současně s tahovou zkouškou probíhalo měření deformací na stejných zkušebních vzorcích. Vyhodnocení bylo uskutečněno v softwaru ARAMIS, který umožňuje měřit deformace ve 3D. U každého typu zkušebního vzorku byl vyhodnocován stav před jeho porušením, kde dochází k největším deformacím. Na modelu vzorku byl v místě vzniku trhliny proložen podélný nebo příčný rovinný řez, čímž byly získány průběhy hlavní deformace v závislosti na délce řezu.

Závěrem lze říci, že velmi uspokojivé mechanické vlastnosti měly pájené a lepené spoje. V posledních letech se konstrukční lepidla výrazně rozšiřují, protože dosahují vysokých pevností při namáhání ve smyku i v tlaku a často tak nahrazují jiné druhy spojů. Lepené spoje především snižují hmotnost konstrukce, tlumí vibrace, nezeslabují nosný průřez a při lepení nedochází k tepelnému ovlivnění. Využívají se převážně v automobilovém a leteckém průmyslu.

5 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SCHMIDOVÁ, Eva. *Metalurgické vady svarových spojů*. Vyd. 2. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a části strojů, 2014. ISBN 978-80-7395-851-0.
- [2] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [3] RUŽA, Viliam. *Pájení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [4] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí*. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] MACURA, Pavel. *Experimentální metody v mechanice. Tenzometrie* [online]. [2013] [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_007/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice/02%20Text%20pro%20e-learning/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice%205%20.pdf. ISBN 978-80-248-3018-6.
- [6] CULEK, Bohumil. *Tenzometrické měření ocelových konstrukcí, DFJP*, 2005. 22 s.
- [7] *Bezkontaktní měřicí metody v experimentální mechanice*. [online]. [2009] [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/doktorske-studium/bezkontaktni-merici-metody-v-experimentalni-mechanice?prezentace>.
- [8] MACURA, Pavel. *Experimentální metody v mechanice. Fotoelasticimetrie* [online]. [2013] [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_007/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice/02%20Text%20pro%20e-learning/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice%202%20.pdf. ISBN 978-80-248-3018-6.
- [9] *Measurement Principles of ESPI* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-espi>.

- [10] TRANSFER. *Experimentální metody zkoušení* [online]. [2006] [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.vzlu.cz/cs/casopis-transfer-rocnik-2006-c497.html>> ISSN 1801-9315.
- [11] [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.mcae.cz/aramis>>.
- [12] PAN, Bing, Kemao QIAN, Huimin XIE a Anand ASUNDI. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*[online]. 2009, 20(6), 062001- [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1088/0957-0233/20/6/062001. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0957-0233/20/i=6/a=062001?key=crossref.37cf26a6947e54eb5498e67742a4e2ad>
- [13] GREGOR, Miroslav. *Technologie a technika lepení* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW:<www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>.
- [14] VOJÁČEK, Antonín. *Fóliové tenzometry - princip, provedení, použití, historie.*[online].[2005] [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: < <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111201>>.
- [15] VLK, Miloš a kol. *Experimentální mechanika.* [online]. [2003] [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: <http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf>.
- [16] *Laboratoře katedry VŠB.* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.fs.vsb.cz/330/cs/veda-a-vyzkum/Laboratore/>>.
- [17] Insitut PWO. *ESPI.* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW: <<https://institute.ntb.ch/en/pwo/competencies-and-infrastructure/technical-optics/deformation-metrology/espi.html>>.
- [18] MANDEL, Harald. *Fakultät Technik beschafft neues Messsystem ARAMIS 3D 4M* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupný z WWW:<www.dhbw-stuttgart.de/themen/aktuelles/meldung/2013/04/fakultaet-technik-beschafft-neues-messsystem-aramis-3d-4m/>.
- [19] ARAMIS. *Uživatelská příručka – Software*, Braunschweig, 2007.

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozložení napětí při deformaci jednostranně lepeného přeplátovaného spoje [13].....	14
Obr. 2 Princip fungování tenzometru při deformaci [14]	17
Obr. 3 Typy foliových tenzometrů [15].....	17
Obr. 4 Typy zapojení tenzometrů ve wheastonově můstku [15]	18
Obr. 5 Měřicí řetězec [6].....	18
Obr. 6 Ukázka fotoelasticimetrického experimentu maticového klíče [16]	19
Obr. 7 Model polariskopu [8].....	21
Obr. 8 Schéma polariskopu [8].....	21
Obr. 9 Reflexní polariskop [8]	22
Obr. 10 princip reflexní fotoelasticimetrie [8].....	22
Obr. 11 Princip laserové interferometrie - ESPI [17]	24
Obr. 12 Optický měřicí systém ARAMIS 4M [18]	25
Obr. 13 Obr. Ukázka vhodného a nevhodného kontrastního vzoru [19].....	26
Obr. 14 Schematické znázornění čtvercové fasety před deformací a po deformaci [12]	28
Obr. 15 Korelační kritéria CC a SSD [12].....	30
Obr. 16 Výpočet korelačního koeficientu na základě deformovaného obrazce posuvného pohybu [12].....	31
Obr. 17 Maximální korelační koeficient [12]	31
Obr. 18 Upínací přípravek	34
Obr. 19 Umístění upínacích přípravků do držáků zkušebního stroje	34
Obr. 20 Zkušební vzorek před nanesením rastru	36
Obr. 21 Zkušební vzorek po nanesení rastru	36
Obr. 22 Kalibrační deska	37
Obr. 23 Proces kalibrování	38
Obr. 24 Proces měření optickým měřicím systémem ARAMIS 4M	39
Obr. 25 Referenční vzorek před porušením	41
Obr. 26 Referenční vzorek po porušení	42
Obr. 27 Model svařovaného zkušebního spoje před úplným porušením (bez a s izočáry)	43
Obr. 28 Svařovaný zkušební spoj po porušení	44
Obr. 29 Model pájeného zkušebního spoje před vznikem trhliny (bez a s izočáry).....	45
Obr. 30 Pájený Zkušební vzorek po porušení.....	46
Obr. 31 Model zkušebního spoje těsně před porušením.....	47

Obr. 32 Boční pohled lepeného zkušební spoje.....	48
Obr. 33 Lepený zkušební spoj po porušení.....	49
Obr. 34 Model šroubovaného zkušební spoje před úplným porušením	50
Obr. 35 Šroubovaný zkušební spoj po porušení	51
Obr. 36 Rozložení deformace v podélném směru a model bodově svařovaného zkušební spoje po porušení	52
Obr. 37 Bodově svařovaný zkušební spoj po porušení.....	53
Obr. 38 Ukázka vhodného a méně vhodného rastru	66

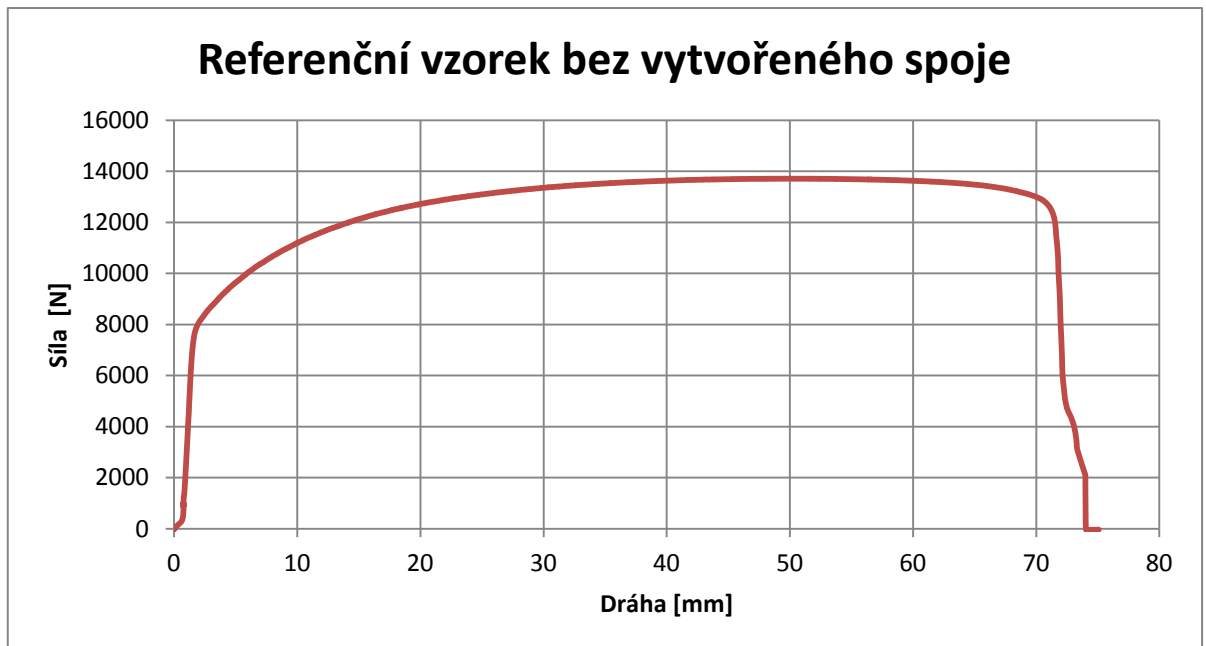
7 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Rozložení deformace v podélném řezu referenčního vzorku bez spoje	42
Graf 2 Rozložení deformace v podélném řezu svařovaného zkušební spoje.....	44
Graf 3 Rozložení deformace v podélném řezu pájeného zkušební spoje	46
Graf 4 Rozložení deformace v podélném řezu lepeného zkušební spoje	48
Graf 5 Rozložení deformace v příčném řezu pro každou úroveň zatížení šroubovaného zkušební spoje („section 0“ na obr. 34)	50
Graf 6 Rozložení deformace v příčném a podélném řezu šroubovaného zkušební spoje	51
Graf 7 Porovnání maximální síly při přetržení v závislosti na typu zkušební spoje	54
Graf 8 Porovnání průběhů sil v závislosti na dráze různých typů zkušebních spojů.....	54
Graf 9 Referenční vzorek bez vytvořeného spoje.....	61
Graf 10 1. Svařovaný zkušební spoj	62
Graf 11 2. Svařovaný zkušební spoj	62
Graf 12 1. Pájený zkušební spoj	63
Graf 13 2. Pájený zkušební spoj	63
Graf 14 1. Lepený zkušební spoj	64
Graf 15 2. Lepený zkušební spoj	64
Graf 16 1. Šroubovaný zkušební spoj	65
Graf 17 2. Šroubovaný zkušební spoj	65

8 SEZNAM PŘÍLOH

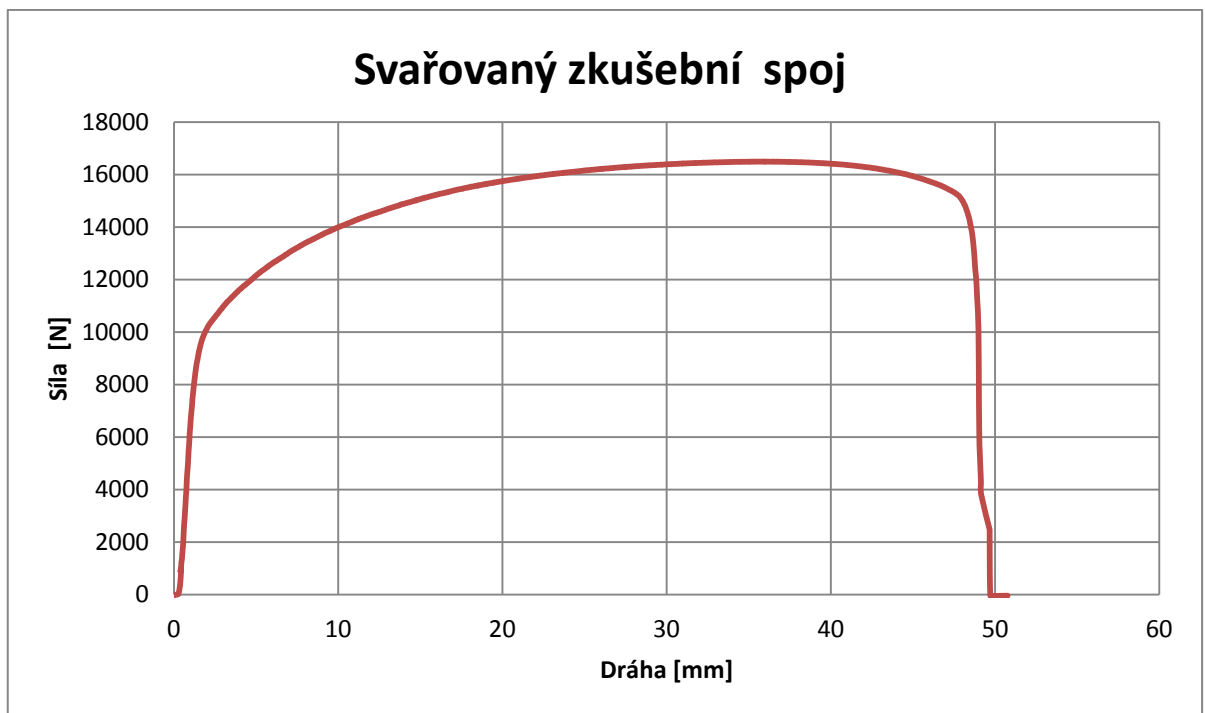
Příloha A <i>Referenční vzorek bez vytvořeného spoje</i>	61
Příloha B <i>Grafy svařovaných zkušebních spojů</i>	62
Příloha C <i>Grafy pájených zkušebních spojů</i>	63
Příloha D <i>Grafy lepených zkušebních spojů</i>	64
Příloha E <i>Grafy šroubovaných zkušebních spojů</i>	65
Příloha F <i>Ukázka vhodného a méně vhodného rastru</i>	66
Příloha G <i>Průběh deformování svařovaného spoje (vznik trhliny v TOO)</i>	67

Příloha A *Referenční vzorek bez vytvořeného spoje*

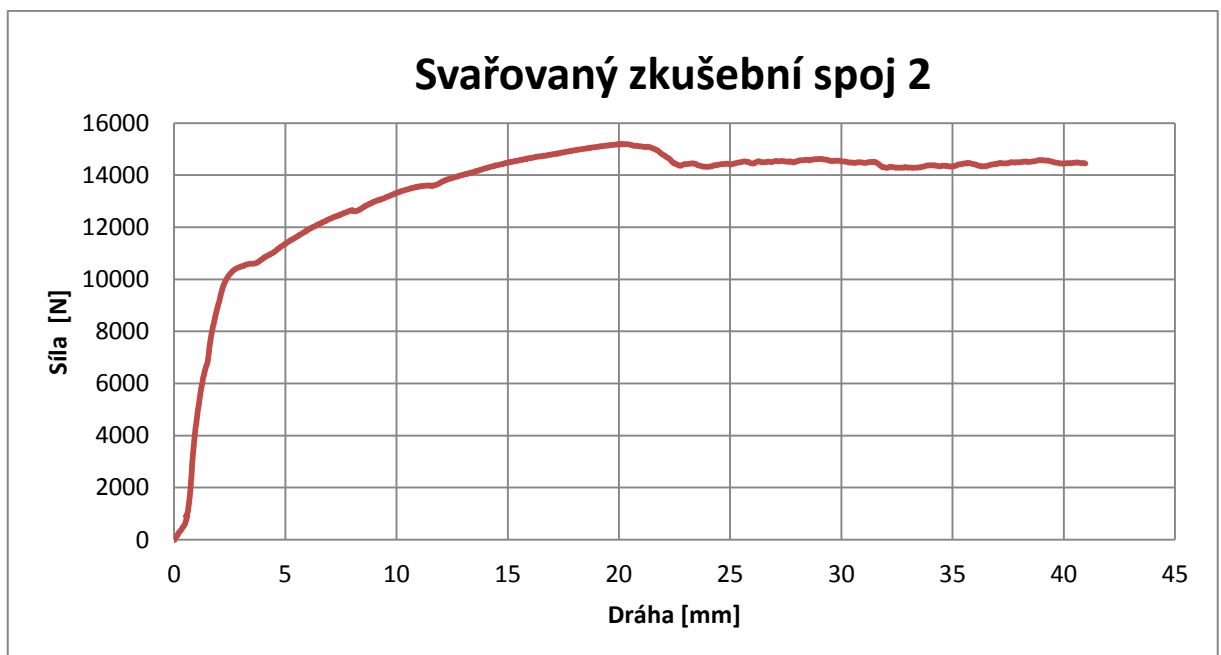


Graf 9 Referenční vzorek bez vytvořeného spoje

Příloha B Grafy svařovaných zkušebních spojů

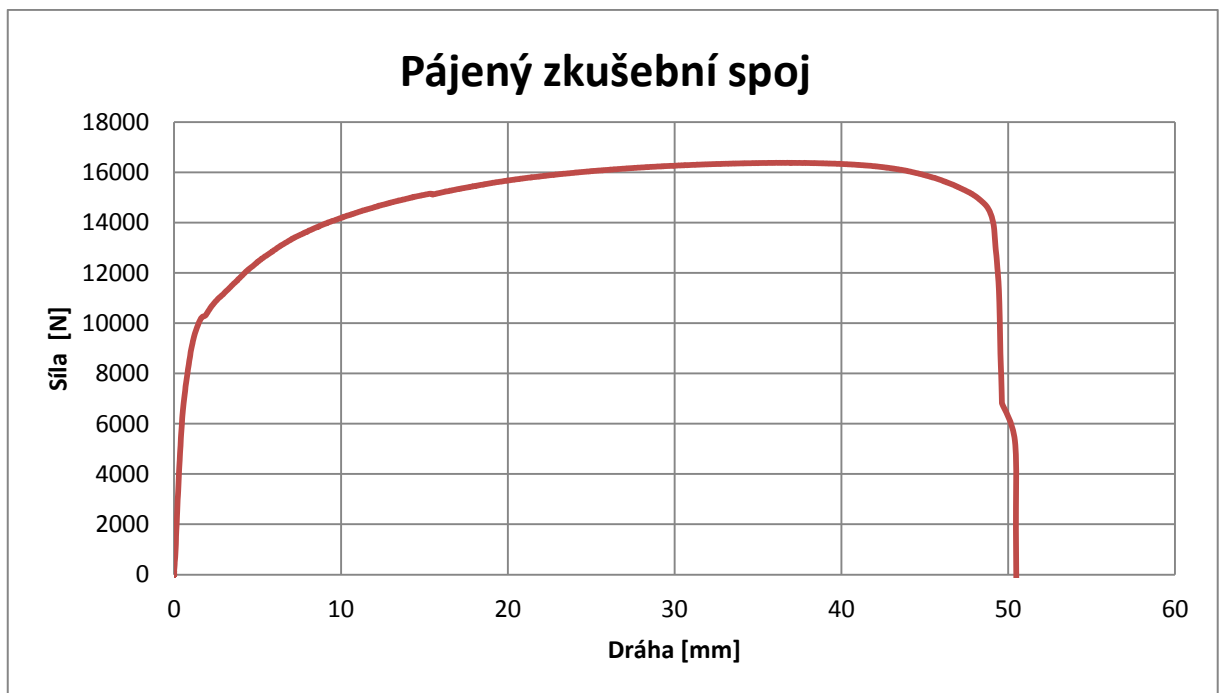


Graf 10 1. Svařovaný zkušební spoj

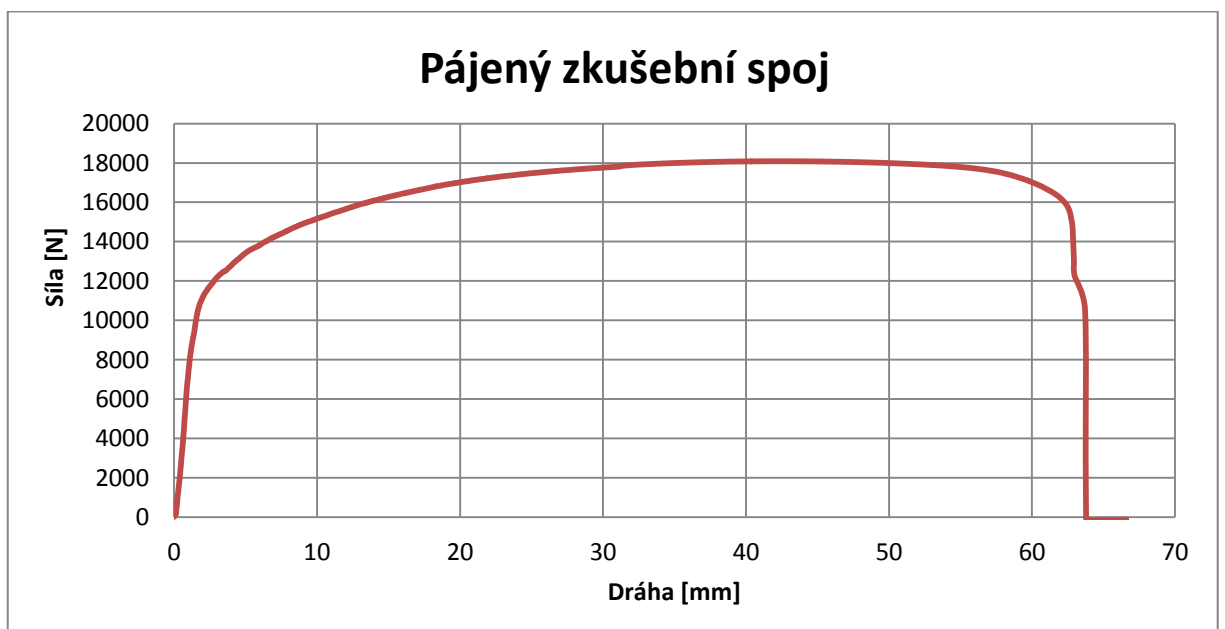


Graf 11 2. Svařovaný zkušební spoj

Příloha C Grafy pájených zkušebních spojů

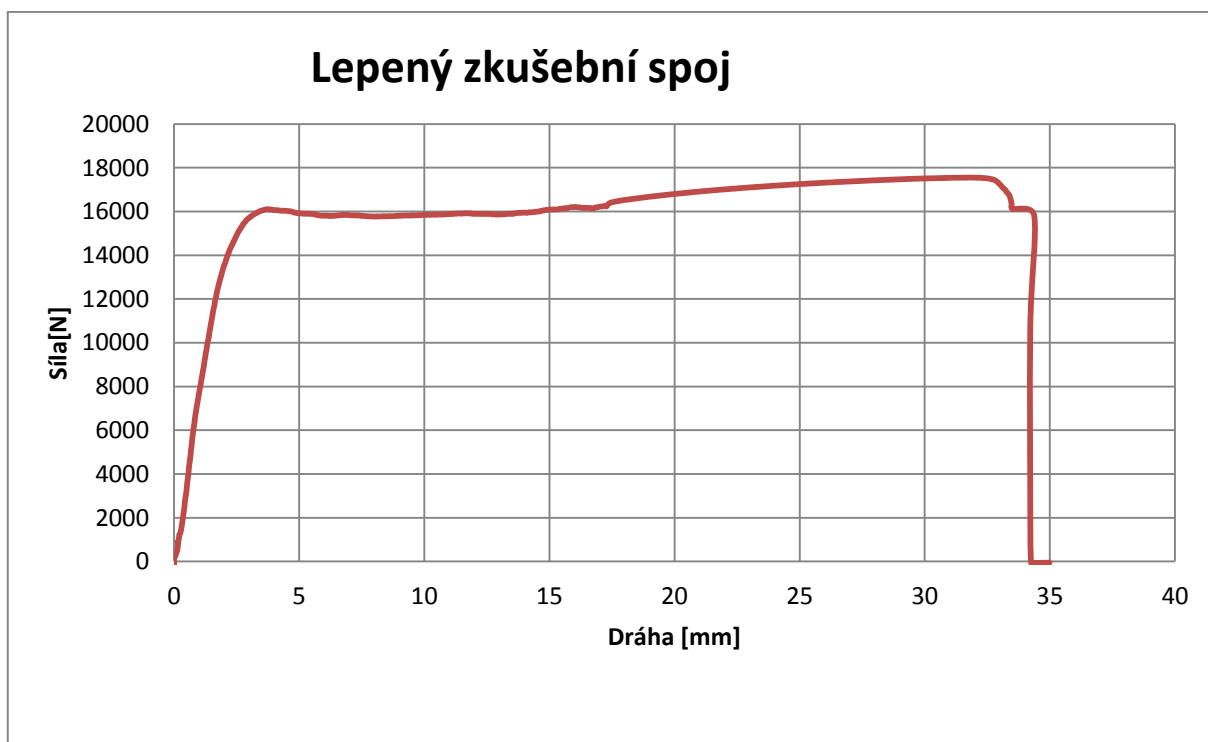


Graf 12 1. Pájený zkušební spoj

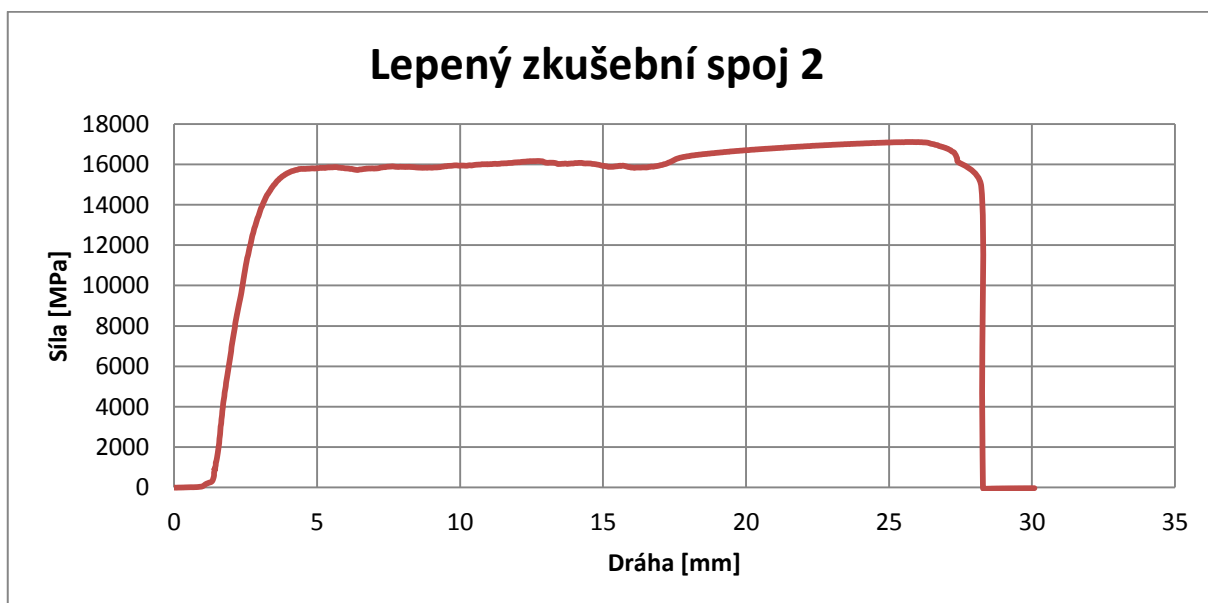


Graf 13 2. Pájený zkušební spoj

Příloha D Grafy lepených zkušebních spojů

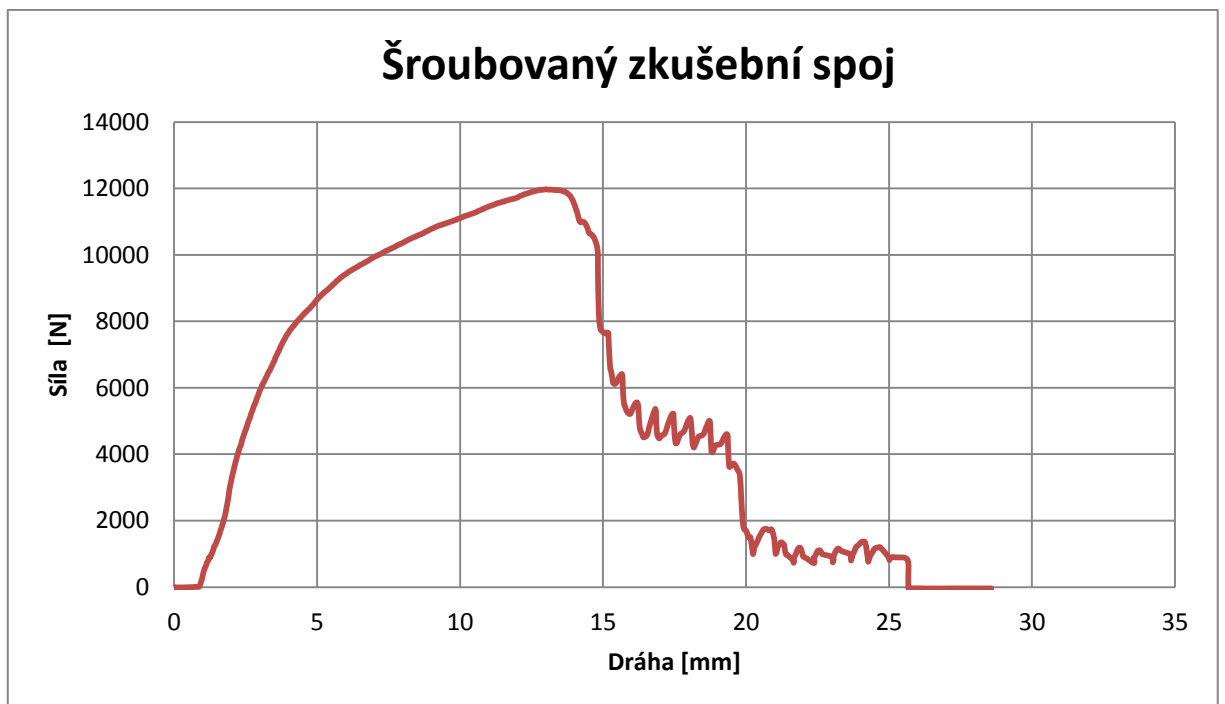


Graf 14 1. Lepený zkušební spoj

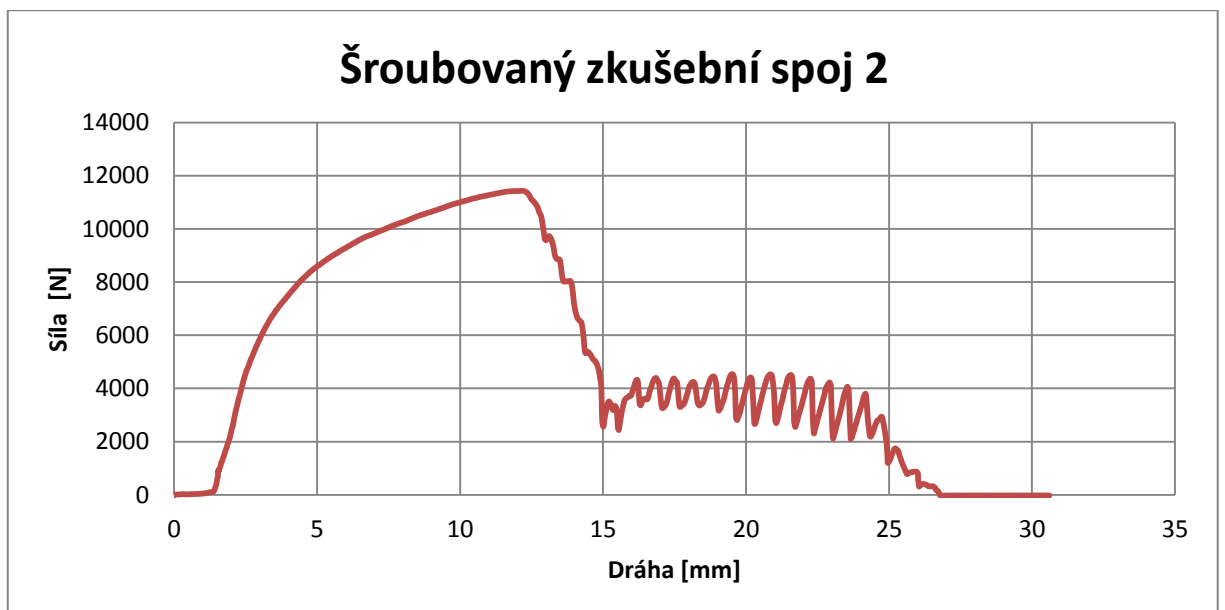


Graf 15 2. Lepený zkušební spoj

Příloha E Grafy šroubovaných zkušebních spojů

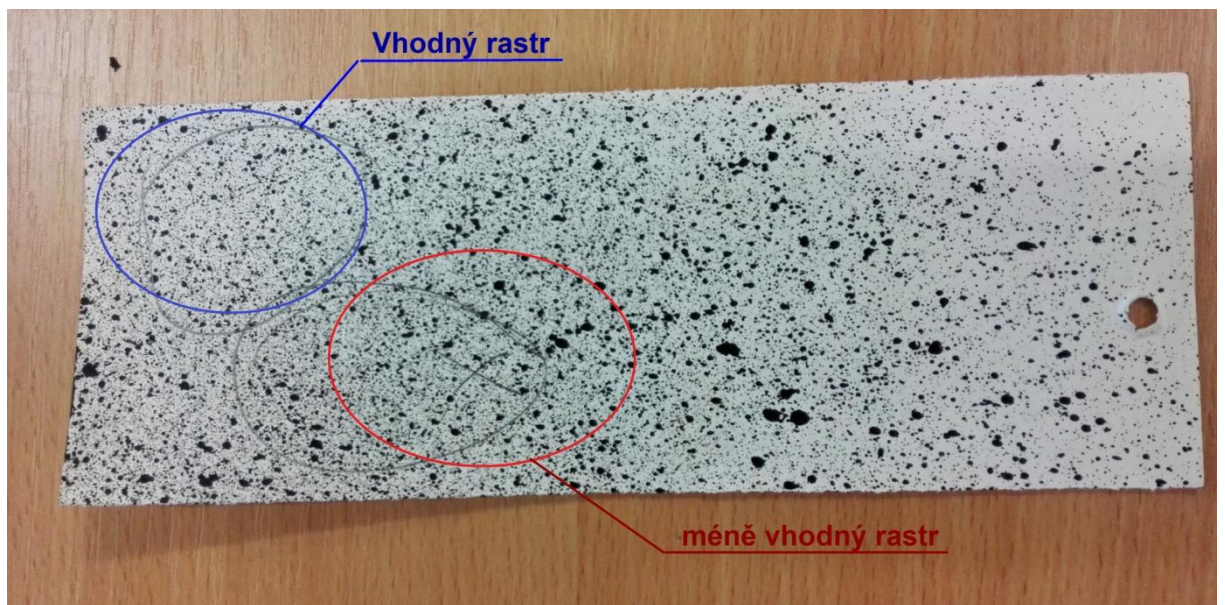


Graf 16 1. Šroubovaný zkušební spoj



Graf 17 2. Šroubovaný zkušební spoj

Příloha F *Ukázka vhodného a méně vhodného rastru*



Obr. 38 Ukázka vhodného a méně vhodného rastru

Příloha G *Průběh deformování svařovaného spoje (vznik trhliny v TOO)*

