

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vliv rychlosti zatěžování na únosnost svarových spojů vysokopevných
ocelí

Bc. Josef Hylský

Diplomová práce

2011

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef HYLSKÝ**
Osobní číslo: **D09658**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**
Název tématu: **Vliv rychlosti zatěžování na únosnost svarových spojů vysokopevných ocelí**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování:

1. Vliv rychlosti zatížení, resp. rychlosti deformace na pevnost materiálu.
2. Perspektivní způsoby spojování bezpečnostních prvků karoserií.
3. Vlivy na pevnost bodových odporových svarů vysokopevných ocelí.
4. Vyhotovení experimentálních bodových odporových svarů martenzitické oceli, návrh metody hodnocení dynamické pevnosti svarů.
5. Experimentální hodnocení vybrané vysokopevné martenzitické oceli při zvýšené rychlosti zatížení.
6. Vyhodnocení výsledků ve srovnání se statickými parametry oceli.
7. Hodnocení průběhu lomů ve vazbě na dosaženou pevnost svarů.
8. Souhrnné posouzení výsledků při použití dané metodiky, diskuse možností hodnocení podle stávajících norem.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. **Abbashian R., Abbashian L., Reed-Hill R.E.: Physical Metallurgy Principles, Stamford, USA, 2010, ISBN: 978-0-495-43851-9**
2. **Koutský, J.- Jandoš, F.-Karel, V.: Lomy ocelových částí, Praha 1976, SNTL**
3. **Kuncipál, J.: Teorie svařování, SNTL, 1986**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**
Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2011**


prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.


Ing. Ivo Šefčík, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2011

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 23. 5. 2011

Josef Hylský

Poděkování

Děkuji všem, kteří mi ochotně pomáhali jak při tvorbě této práce, tak i při realizaci experimentu. Zvláště pak doc. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. a Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D.

ANOTACE

Obsahem práce je ověření použité metodiky tahové dynamické zkoušky, uskutečněné v návaznosti na prvotní experiment. Těžištěm práce bylo testování vlivu rychlosti zatěžování na únosnost bodových odporových svarů a identifikace mechanismů porušení.

KLÍČOVÁ SLOVA

svaritelnost, dynamické tahové zkoušky, bodové odporové spoje, vysokopevné oceli

TITLE

The loading speed influence on the capacity of the high strength steel welding joints.

ANNOTATION

The work contains a verification of the used impact tensile test methodology, which was performed after a beginning experiment. The work was focused on the testing of the dotted resisted welds capacity influenced by different loading speed and on the failure mode identification.

KEYWORDS

weldability, dynamic tensile tests, dotted resisted welds, high stress steels

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod | 9 |
| 1 Vliv rychlosti zatěžování, resp. rychlosti deformace na pevnost materiálu.. | 10 |
| 2 Lomové mechanismy | 12 |
| 2.1 Mechanismus křehkého porušení | 12 |
| 2.2 Mechanismus plastického porušení | 13 |
| 3 Vysokopevné martenzitické oceli | 15 |
| 4 Perspektivní způsoby spojování bezpečnostních prvků karoserií | 19 |
| 4.1 Lepení | 19 |
| 4.2 Pájení | 20 |
| 4.3 Bodové odporové svařování | 21 |
| 5 Vlivy na únosnost bodových odporových svarů vysokopevných ocelí | 22 |
| 5.1 Pokles tvrdosti..... | 22 |
| 5.2 Případné vady bodových svarů | 23 |
| 5.3 Horké trhliny | 25 |
| 5.4 Studené trhliny | 25 |
| 6 Výchozí experimentální práce..... | 27 |
| 6.1 Příprava experimentálního materiálu..... | 27 |
| 6.2 Metodika dynamických destruktivních zkoušek..... | 32 |
| 6.3 Vyhodnocení výchozího experimentu | 37 |
| 7 Experimentální hodnocení vybrané vysokopevné martenzitické oceli při zvýšené rychlosti zatížení | 38 |

| | | |
|------|--|----|
| 8 | Vyhodnocení výsledků ve srovnání se statickými parametry oceli | 41 |
| 9 | Hodnocení průběhu lomů ve vazbě na dosaženou pevnost svarů | 43 |
| 9.1 | Příprava vzorků a měření | 43 |
| 9.2 | Výsledky rastrovací elektronové mikroskopie | 44 |
| 10 | Možnosti hodnocení jakosti svarů podle stávajících norem..... | 56 |
| 10.1 | Nedestruktivní kontrolní metody | 56 |
| 10.2 | Destruktivní kontrolní metody..... | 57 |
| 10.3 | Možnosti hodnocení pomocí ITT (Impact Tensile Testing)..... | 58 |
| | Závěr | 59 |
| | Použitá literatura..... | 61 |
| | Seznam obrázků..... | 63 |
| | Seznam tabulek..... | 65 |

Úvod

Aktivní a pasivní bezpečnost automobilu se v dnešní době neustále zdokonaluje. V případě selhání aktivní bezpečnosti, potažmo lidského faktoru, přichází na řadu bezpečnost pasivní.

Silniční automobil má celou řadu prvků pasivní bezpečnosti. Deformační zóny automobilu, popř. výztuže, výlisky z vysokopevných ocelí nebo jejich konstrukční spoje na sebe váží určitou míru bezpečnosti právě svou pevností, únosností a vůbec schopností pohlcovat velké množství energie vzniklé při jejich zatížení.

Cílem této práce bude zjištění vlivu rychlosti zatěžování na únosnost konstrukčních spojů materiálu vysokopevné oceli reprezentovaných bodovými odporovými svary. Dále je obsahem práce ověření metodiky použité zkoušky, včetně přípravy vzorků, vyhotovení bodových odporových svarů, vyhodnocení zkoušky a rozbor lomových ploch svarové čochky po dynamické tahové zkoušce.

1 Vliv rychlosti zatěžování, resp. rychlosti deformace na pevnost materiálu

Pevnost materiálu se může podstatně lišit v případě, že zvolíme různé rychlosti jeho zatěžování. Výskyt vnitřních vad a heterogenita struktury mohou být dalším faktorem ovlivňujícím pevnost materiálu.

Výsledná pevnost je také závislá na charakteru zatěžování, tedy velikosti, směru a smyslu působících sil. V závislosti na rychlosti zatěžování se uplatní rovněž v různé intenzitě vliv vnitřních vad, vnějších koncentrátorů napětí apod.

Pomalé rychlosti zatěžování dávají prostor vzniku tvárného lomu, který je charakteristický svými stříhovými důlky, které se mohou lišit jak svým průměrem, tak i svou hloubkou. Oproti tomu zatížení s rychlostmi srovnatelně vyššími, může mít za následek iniciaci lomu křehkého.

Je-li těleso zatíženo tak, že deformace po odlehčení vymizí (je vratná), jedná se o deformaci pružnou (elastickou). Její fyzikální podstatou je relativně malé vychýlení atomů z rovnovážných ploch, které způsobí distorzi mřížky. Po odstranění se vlivem meziatomových odpudivých a přitažlivých sil vrátí atomy zpět do původních poloh. Pružná deformace je úměrná napětí, které ji vyvolává – platí známý Hookeův zákon.

Většinou se u kovových materiálů předpokládá časová nezávislost deformace. Za určitých podmínek (vysoká citlivost měření, rychlost zatěžování je srovnatelná s rychlostí šíření elastické deformace) můžeme zaznamenat opoždování deformace za napětím. Vratná deformace se tak stává časově závislou a nazýváme ji deformací anelastickou.

Zatížíme-li těleso nad platnost Hookeova zákona, přestává platit lineární závislost mezi napětím a deformací, závislost získává složitější tvar, po odlehčení deformace nevymizí a způsobuje tak trvalou změnu tvaru tělesa. Tuto deformaci nazýváme plastickou. [2]

Vnějšími podmínkami mechanismu plastické deformace jsou:

- způsob zatěžování,
- rychlost zatěžování,
- teplota.

Samotné mechanismy deformace jsou pak reprezentovány:

- deformace skluzem,
- deformace dvojčatěním.

Skluz je nejčastějším deformačním mikromechanismem. Naproti tomu dvojčatění je mikromechanismem doplňujícím, který se uplatňuje zvláště při vysokých rychlostech deformace a nízkých teplotách. [2]

Rychlá změna síly v závislosti na čase zvětšuje deformaci uvnitř zrn a naopak změna pomalá nám zvětšuje deformaci mezi zrny. V prvním případě se jedná o kluzovou deformaci, v případě druhém jde o deformaci difúzní.

Skluzový mechanismus vzniká v krystalických materiálech v určitých rovinách a šíří se postupným pohybem jednotlivých vrstev (lamel) krystalu. Tloušťka těchto nedeformovaných lamel je 10^{-3} až 10^{-4} cm. Velikost posunu je celistvým násobkem nejmenší mřížkové vzdálenosti, pravidelná krystalová mřížka zůstává zachována.

Za běžných podmínek tváření kovů je rozhodujícím mechanismem skluz, umožňující dosažení největších deformací a deformačních rychlostí. Ostatní mechanismy se uplatňují zejména při vysokých teplotách nebo velmi malých deformačních rychlostech a vyznačují se malými velikostmi deformace. [3]

2 Lomové mechanismy

Experimentálním studiem lomových ploch se zabývá fraktografie, která slouží pro identifikaci působícího mechanismu lomu, studium vlivu struktury a vnitřní jakosti materiálu na lomové chování apod. [4]

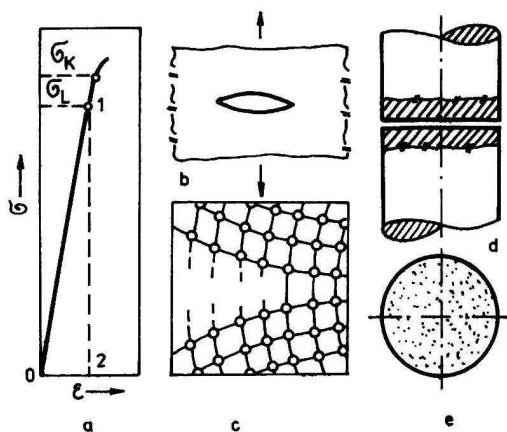
Primárním cílem fraktografie v našem případě je zjištění iniciace trhliny popř. místa počátku lomu. Následně nám pomůže odhalit, kudy a jakým směrem či směry se lom šířil. Výsledná struktura lomu bude podrobněji specifikována v části experimentálního hodnocení.

Zatížení v mezním případě vyvolá v kovu vznik zárodků, postupné poškozování a porušování až do vzniku lomu. Působením jediného nebo více externích faktorů se poruší soudržnost materiálu, jehož části se oddělují při současném vzniku nových volných povrchů. [4]

V následující části si definujeme mechanismy vzniku křehkého a plastického porušení materiálu.

2.1 Mechanismus křehkého porušení

Při napětí blízkém mezi skluzu se za jistých podmínek může uskutečnit postupné porušování meziatomových vazeb štěpením až k vytvoření lomu bez makroskopické plastické deformace tělesa.

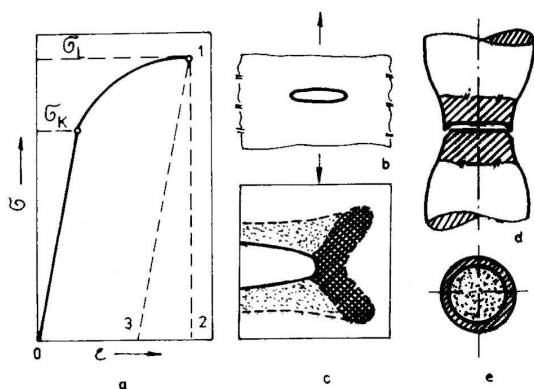


Obr. 1 Schéma pro ilustraci křehkého lomu [5]

Hranice zrn mohou být slabým místem struktury, např. v důsledku vyloučení precipitátů na hranicích zrn, v důsledku vytvoření souvislého filmu sekundární fáze nebo segregací atomů příměsí na hranicích zrn, v důsledku snížení koheze na hranicích zrn při vyšších teplotách apod. Potom se porušení materiálu může uskutečnit interkrystalickým štěpením. Lomové plošky, fasety, odpovídají velikosti ploch, které oddělují zrna kovu, přitom mají charakter odpovídající mechanismu porušení. [5]

2.2 Mechanismus plastického porušení

Když porušení předchází makroskopická plastická deformace tělesa, může se uplatnit skluzový mechanismus a pozoruje se tvárné porušení. Velikost deformace před vznikem a šířením porušení je funkcí druhu, čistoty, struktury a deformačního stavu materiálu.



Obr. 2 Schéma pro ilustraci tvárného lomu [5]

Při plastické deformaci tělesa, vzrůstu kontrakce, v místech budoucího lomového průřezu vznikají dutiny, které zvětšují svůj rozměr intenzivněji v směru kolmém na směr hlavních tahových napětí. Můstky mezi dutinkami se vytahují a zeslabují. Porušováním můstků se trhliny spojují až do konečné lomové plochy. [6]

Tvárné porušení může probíhat transkrystalicky nebo interkrystalicky. Energetické nároky na rozvoj interkrystalického tvárného porušení jsou relativně nízké a celková deformace tělesa je malá.

V polykrystalickém materiálu se transkrystalické i interkrystalické štěpení a tvárné porušení uplatňuje podle místních podmínek, především v závislosti od strukturního a napěťového stavu prostředí. Při šíření magistrální trhliny a rozvoji přes průřez tělesa se mechanismus porušování může měnit. [5]

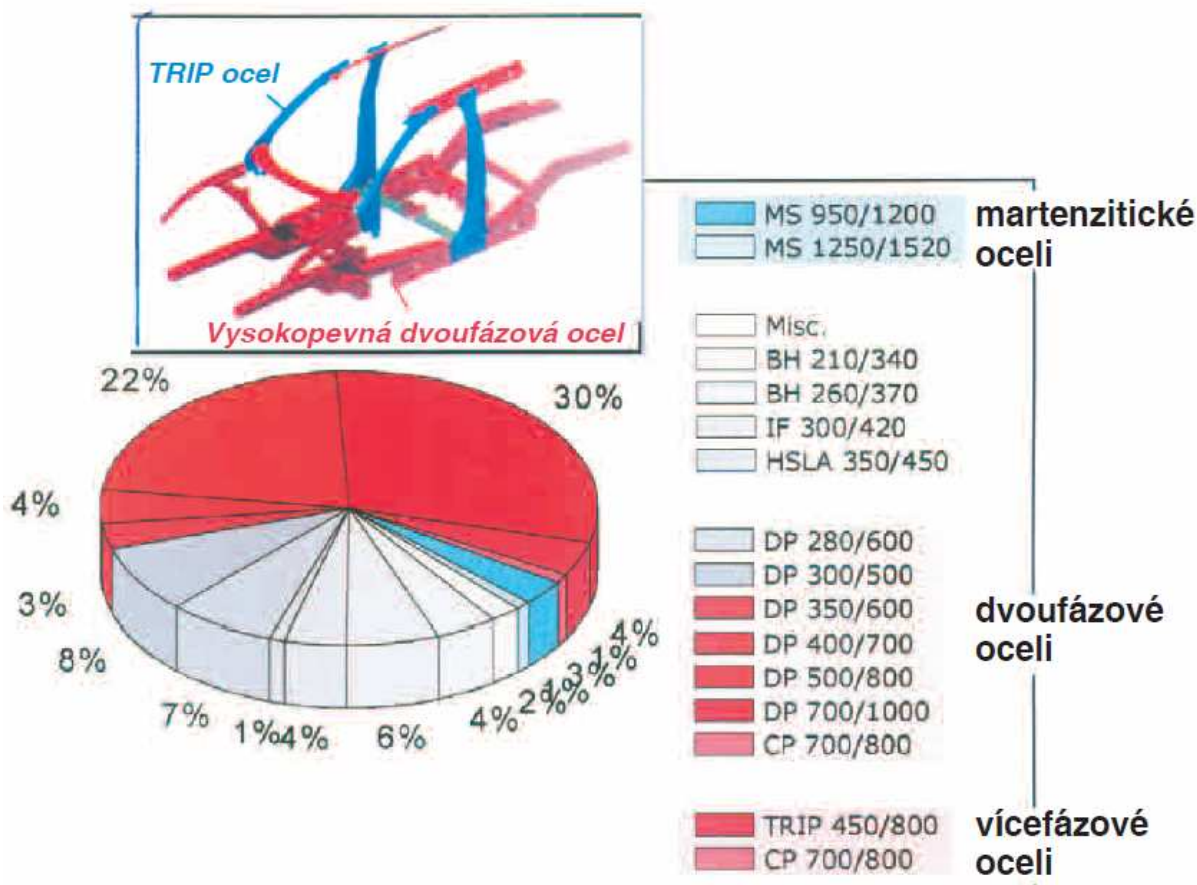
3 Vysokopevné martenzitické oceli

Experimentální studium dynamické pevnosti svarových spojů bylo v práci provedeno u martenzitické vysokopevné oceli, používané v automobilovém průmyslu jako jeden z typů materiálů pro bezpečnostní prvky karoserií. Pro experimenty byl použit výlisek vysokopevnostního materiálu, který svým chemickým složením patří mezi oceli nízkouhlíkové, legované Mn + B s procentuálním obsahem prvků:

- 0,2% C
- 1,2% Mn
- 0,3% Si
- 0,002% B

Pro tyto oceli je význačná právě jejich zaručená svařitelnost. Při svařování ocelí vyšších pevností a vyšším obsahem Mn je vhodné použít převážně nelegované přídavné materiály. [8]

Oceli pro aplikace v osobních automobilech tvoří velmi různorodou skupinu. Pro jednotlivé části karoserie se dnes používá celá řada značek ocelí s různými vlastnostmi. Za příklad může sloužit použití vysokopevných a hlubokotažných ocelí v karoserii automobilu Porsche Cayenne (obr. 3). Zároveň z něj vyplývá, že se používají i oceli s mezí pevnosti přes 1000MPa. Charakteristika jednotlivých ocelí se nachází níže. [7]



Obr. 3 Podíly různých druhů ocelí v karoserii automobilu Porsche Cayenne [7]

BH (bake hardened steel) je jakákoliv vysokopevná ocel, u níž je zvýšení pevnosti výsledkem kombinace deformace a stárnutí při teplotách a časech typických pro lakování částí automobilu.

IF (interstitial-free steel) – ocel s velmi nízkým obsahem uhlíku a dusíku, do které je přidáno malé množství Ti a Nb k zamezení nežádoucího zpevnění způsobeného zbytkovým množstvím C a N interstiticky rozpuštěných ve struktuře.

HSLA (high strength low alloy steel) – ocel obsahující mikrolegující prvky jako Ti, V a Nb, které zvyšují pevnost řízením velikosti zrna a rovněž precipitačně zpevňují strukturu. Dalším možným příspěvkem ke zvýšení pevnosti těchto ocelí je substituční zpevnění.

DP (dual phase steel) – ocel sestávající z feritické matrice, která obsahuje druhou tvrdou fázi ve formě ostrůvků.

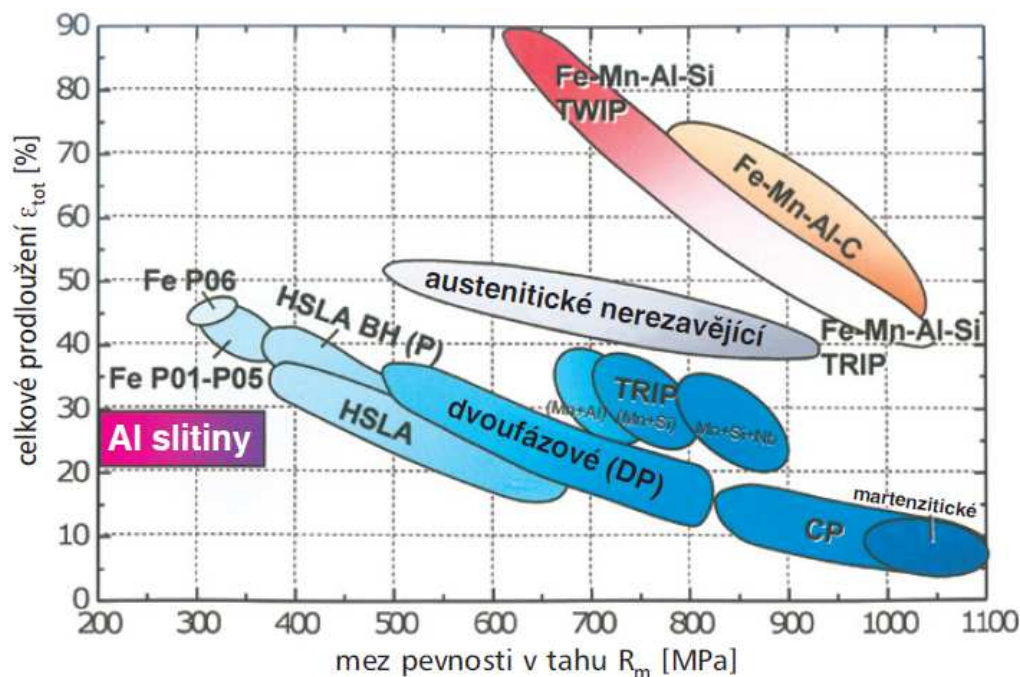
CP (complex-phase steel) – vícefázová ocel s velmi jemnou feritickou strukturou vysokým podílem vysokopevných fází, které jsou dále zpevněny jemnými precipitáty.

TRIP (transformation induced plasticity) – ocel s multifázovou strukturou obsahující 50-60% feritu, 25-40% bainitu a 5-15% zbytkového austenitu. Zbytkový austenit je při 20°C nestabilní a při deformaci může transformovat na martenzit.

MS (martensitic steel) – ocel, ve které se struktura v průběhu zpracování téměř úplně přeměnila na tvrdý martenzit.

TWIP (twinning induced plasticity) – je skupina uhlíkových ocelí na bázi FeMnAlC (0,5-0,7% C, 17-24% Mn, 9% Al) se zcela austenitickou strukturou při všech teplotách, ve které je základním deformačním mechanismem dvojčatění.

Pevnostně-plastické vlastnosti ocelí používaných v karoserii automobilu Porsche Cayenne a další druhy ocelí jsou znázorněny na obr. 4.



Obr. 4 Závislost meze pevnosti na prodloužení vybraných druhů ocelí [7]

Materiály používané v automobilech musí mít celou řadu důležitých vlastností, jako např.: musí být pevné, odolné proti únavě, svařitelné různými způsoby svařování, tvárné za studena, hlubokotažné, odolné proti rázu (i za nízkých teplot), schopné absorbovat energii při srážce, musí být korozivzdorné, dobře lakovatelné atd. Tyto leckdy protichůdné požadavky nemůže splnit jeden materiál, a proto se používají kombinace více druhů materiálů nebo více typů jednoho materiálu (např. ocelí).

Vysokopevné a ultrapevné za tepla válcované oceli pokrývají široký rozsah pevnosti od hodnoty 400MPa pro termomechanicky válcované oceli po jakosti s pevností nad 1100MPa s martenzitickou strukturou.

Pro takovou vysokou úroveň pevnosti je nezbytné optimalizovat jednotlivé příspěvky mechanismů zpevnění, tj.:

- zpevnění interstiticky a substitučně rozpuštěnými atomy (C, Mn, Si),
- precipitační zpevnění (Ti, Nb, V),
- zjemnění zrna,
- dislokační (transformační) zpevnění.

Při výrobě vysokopevných a ultrapevných ocelí se vychází ze dvou fyzikálně-metalurgických koncepcí:

- termomechanické zpracování mikrolegovaných ocelí (oceli HSLA, BH), které využívá zejména zjemnění zrna a precipitační zpevnění,
- termomechanické zpracování vícefázových ocelí (oceli DP, CP, martenzitické), při jejichž výrobě se používá dislokační zpevnění, zjemnění zrna a zpevnění tuhého roztoku (např. uhlíkem). [7]

4 Perspektivní způsoby spojování bezpečnostních prvků karoserií

4.1 Lepení

Únosnost lepeného spoje je závislá na:

- délce přeplátování tj. $N/1\text{mm}$ šířky spoje,
- na porušujícím zatížení [Nmm^{-1}] šířky spoje na tloušťce plechu.

Zájem o konstrukční lepené spoje karoserií v posledních letech u výrobců automobilů stále vzrůstá. Jako hlavní důvody proč tomu tak je, můžeme uvést např.:

- plošné uchycení plechů zajišťuje karoserii větší pevnost a tuhost,
- povrch spojovaných míst je zcela hladký, odpadají nákladné operace začišťování,
- spoje jsou těsné, není je třeba utěšňovat dodatečně,
- těsnost spojů má pozitivní vliv na korozní odolnost karoserie,
- lepený spoj se vyrovná integrální konstrukci, mezi spojovanými plechy nemůže dojít k žádnému klepání či skřípání, což podstatně snižuje hlučnost karoserie,
- u větších dílů lze nalepením výztuh zabránit kmitáním.

V dnešní době mají největší možnost použití plastisoly, které mají svůj základ ve vinylových polymerech. Jejich nespornou výhodou je možnost lepit materiály, které jsou mírně zamaštěné. Při samotném vytvrzování společně s nátěrem karoserií vozů se tyto plastisoly udrží ve spoji i po průchodu běžně používanými lázněmi. Proces lze automatizovat a přitom pevnost spojů je vyhovující v rozmezí tloušťek lepidla od 0,5 až do 4,0 mm.

Lepení karoserií se neomezuje pouze na plastisoly, ale lze použít i modifikovaných epoxidových lepidel, které se vytvrzují např. za horka. Dále to mohou být i polyesterová a polyuretanová lepidla, pro jejichž použití je povrch nutný nejprve odmastit. [9]

4.2 Pájení

Pájení je způsob metalurgického spojování kovových součástí roztavenou pájkou, přičemž pájené plochy nejsou nataveny, ale jen smáčeny použitou pájkou.

Pájené spoje se používají nejčastěji v těch případech, kde se požaduje:

- těsnost,
- elektrická vodivost,
- korozivzdornost,
- mechanická pevnost při statickém nebo dynamickém namáhání,
- pěkný povrchový vzhled,
- plynulý přechod spoje do základního materiálu.

Výhodné je použití pájení pro spojování kombinovaných železných a neželezných materiálů, při spojování komplikovaných výrobků ze žárovevných, žáruvzdorných a korozivzdorných ocelí a slitin s vysokou pevností a všude tam, kde není možno použít z metalurgických nebo technologických důvodů tavné svařování.

K hlavním a v současné době nejvíce využívaným přednostem pájení patří:

- vysoká produktivita práce,
- možnost hromadné výroby pájených spojů,
- vysoká reprodukovatelnost výrobků,
- velká rozměrová přesnost pájených součástek.

Spoj vzniká při nižších teplotách než při svařování, což se příznivě projevuje na úrovni vnitřních napětí a strukturálních změnách základního materiálu. Při rozhodování o použití pájených spojů je nutno brát v úvahu, že pájené spoje mají menší pevnost, jsou tvarově složitější a vyžadují větší pracnost v přípravě a vzájemném polohování pájených součástek.

[10]

4.3 Bodové odporové svařování

Tohoto způsobu odporového spojování materiálu se v současné době stále velice využívá. Právě svými přednostmi jako jsou:

- automatizace,
- jednoduchost,
- vysoká produktivita,

se řadí tento perspektivní způsob spojování bezpečnostních prvků karoserie na vrchol užívaných metod. Kvalita a jakost jednotlivých svarových čoček je zaručena právě výše zmíněnou automatizací. Vhodným přesazením svarových čoček lze dosáhnout švového spoje, který plní požadavky těsnosti při styku s kapalinou. Díky své mechanické pevnosti jak statické tak dynamické, odolávají bodové spoje velmi vysokým namáháním.

Spojení vzniká za pomoci natavení materiálu vlivem procházejícího elektrického proudu. Teplota mezi svařovacími elektrodami při průchodu elektrického proudu je okolo 1000°C. V bezprostřední blízkosti nově vzniklé svarové čočky je tzv. teplotně ovlivněná oblast, která svou teplotu snižuje od středu svarové čočky do okolního materiálu o pokojové teplotě.

5 Vlivy na únosnost bodových odporových svarů vysokopevných ocelí

U řešeného případu je hlavní vliv na pevnost spoje pokles pevnosti materiálu v teplotně ovlivněné oblasti. To ovlivňuje místo iniciace i další rozvoj lomu. Proto je dále představena problematika poklesu tvrdosti.

5.1 Pokles tvrdosti

V zóně tepelného ovlivnění rozeznáváme oblasti s charakteristickými teplotami od působení svarového cyklu – pod A1, mezi A1 a A3, nad A3.

Při teplotách nad AC3 dochází k úplné fázové přeměně, proto při ochlazování může vzniknout celá škála mikrostruktur, jejíž jedním extrémem je perliticko-feritická a druhým čistě martenzitická mikrostruktura. Na hranici ztavení základních materiálů se k plné austenitizaci přidružuje růst zrna. Tento efekt znamená nevýhodné:

- snížení plasticity podle Hall-Petchova vztahu,
- zbrzdění kinetiky rozpadu austenitu směrem k bezdifúzním přeměnám (často za vzniku Widmannstättenovy struktury),
- zvyšuje náchylnost oceli k defektům.

Limitujícím faktorem jakosti teplem ovlivněné zóny (dále TOO) je dostatečná houževnatost výsledné mikrostruktury pro potřebnou únosnost při působení značných teplotních a deformačních napětí. V sledovaném objemu kovu spolupůsobí více degradačních mechanismů plasticity. Vedle uváděného zhrubnutí mikrostruktury a segregace některých povrchově aktivních prvků na hranicích γ -zrna má rozhodující účinek průběh transformace γ na α . Jako kritérium dostatečné rezervy houževnatosti se v praxi pro hodnocení jakosti svarů používá měření tvrdosti TOO podél linie ztavení a limitování nárůstu hodnot tvrdosti ve srovnání se základním materiálem. Tvrdost bude záviset od chemického složení konkrétní svařované oceli a obsahu difúzního vodíku.

Pro tvrdost martenzitu v konstrukčních ocelích platí, že je dána pouze obsahem uhlíku v oceli, s rostoucím procentem uhlíku se zvyšuje jeho pevnost, tvrdost i mez kluzu.

Na jakost TOO, a tedy i na jejich svařitelnost, má rovněž výrazný vliv mikročistota oceli, zejména dva základní typy inkluzí - oxidy a sulfidy. Oxidy vyloučené v tepelně ovlivněné zóně jsou stabilní i při maximálních teplotách ovlivnění. Při obsahu vyššího podílu FeO v komplexních oxidech, nebo jiných nízkotavitelných oxidů, přispívají k likvační praskavosti oceli. Výraznější negativní vliv na jakost TOO mají sulfidy. Až na výjimky se jedná na rozdíl od netvárných oxidů o tvárné vměšky, vedoucí k anizotropii vlastností oceli a spolupůsobí při vzniku řady defektů. [11]

5.2 Případné vady bodových svarů

Plynové dutiny

Bubliny: dutiny kulového tvaru v jádru svaru vyplněné plynem, které po ztuhnutí svaru zůstaly v roztaveném kovu.

Póry: dutiny protáhnutého tvaru v jádru svaru vyplněné plynem, který po ztuhnutí zůstávají v roztaveném kovu a jeho zjištěná délka je větší jak jeden a půl násobek jeho šířky.

Řádek dutin: dutiny kulového (bubliny) nebo protáhnutého (póry) tvaru uspořádané v řádku.

Vměšky

Oxidické vměšky: nepravidelné útvary kysličníků, případně jiných nekovových vměšků, které po ztuhnutí svaru zůstaly ve ztuhlém kovu.

Vady natavení

Studený spoj: nedokonalé spojení svařovaných materiálů v požadovaném průřezu.

Výstřik roztaveného kovu: kov vystříknutý z bodového svaru mezi svařované materiály.

Netěsný svar: svar, přes který proniká zkušební látka, nebo švový svár, při kterém je překrytí bodů menší jak jedna třetina průměru čoček.

Trhliny

Podélné trhliny: prasklé místo uvnitř nebo na povrchu svaru orientovaného podél nebo v rovině styku.

Příčné trhliny: prasklé místo uvnitř nebo na povrchu svaru orientovaného napříč svaru nebo styku.

Rozvětvené trhliny: prasklé místo uvnitř nebo na povrchu bodového svaru vycházející zpravidla z jednoho místa a šířící se v různých směrech.

Vady tvaru a rozměru svarů

Malý rozměr svaru: rozměr čocky bodového svaru je oproti předepsanému menší víc jak o deset procent.

Nízká čocka: čocka bodového svaru rozvinutá do hloubky menší jak třicet procent hloubky tenčího z materiálů.

Vysoká čocka: čocka bodového svaru rozvinutá do hloubky větší jak sedmdesát procent hloubky tenčího z materiálů.

Nesymetrický tvar svaru: čocka bodového svaru v příčném řezu k rovině styku nebo k ose kolmé na rovinu styku je výrazně nesymetrická.

Vady povrchu svarových spojů

Hluboké vtisky: nepřiměřená hloubka stopy po elektrodách, která je větší jak patnáct procent tloušťky tenčího z materiálů.

Natavení povrchu materiálu: natavení v místě styku elektrod s materiálem.

Výstřik z povrchu materiálu: natavený kov zpravidla jehlicovitého tvaru, který po ztuhnutí zůstává na povrchu. [12]

5.3 Horké trhliny

Vznikají ve svarovém kovu, méně v tepelně ovlivněné oblasti v průběhu krystalizace, popř. těsně v podsolidusových teplotách. V určitém stadiu krystalizačního procesu je vznikající pevná fáze ve tvaru dendritů obklopená taveninou. Tahové napětí během tuhnutí má tendenci kompenzovat se deformací, soustředěnou do mezidendritických prostor. V případě již vysoké viskozity, nebo nedostatečného objemu okolní taveniny vznikají kavity a jejich koalescencí trhliny – tzv. krystalizační horké trhliny. Defekt je vedle vnějších podmínek ze strany materiálu podporovaný segregáčními procesy a výskytem nečistot.

U ocelí náchylných na uvedenou skupinu trhlín je vhodné limitovat měrný příkon svařování (omezení difúzních procesů). Dalším vhodným řešením pro dané chemické složení oceli je použití pulzního režimu svařování. Vhodná frekvence pulzů ovlivňuje krystalizaci svarového kovu směrem k celulární struktuře, která je podstatně odolnější proti vzniku všech typů horkých trhlín. [11]

Námi zvolený vstupní materiál, který byl použit pro zhotovení bodových odporových svarů, není náchylný na vznik horkých trhlín.

5.4 Studené trhliny

Studené trhliny (jinak označované jako transformační, vodíkem indukované, nebo opožděné) vznikají při teplotách pod 200 °C. Zdrojem je vzájemné působení třech rozhodujících faktorů:

- *Přítomnost vodíku ve svarovém spoji.* Zdrojem vodíku je především svarový kov (obal elektrody, difúze do roztaveného kovu z atmosférické vlhkosti). Vodík je v disociovaném stavu při teplotě cca 200 °C, což se využívá jako opatření na jeho zpětné uvolnění – řízené ochlazování, resp. dohřev svaru. Poklesem teploty přechází do molekulárního stavu, vylučující se v mikropórech, na rozhraních inkluze-matrice, dislokacích, popř. na povrchu již iniciovaných trhlín jako zdroj dalšího napětí. Difúze, a tedy i okamžitá koncentrace vodíku, je pod vlivem především strukturní transformace TOO (rozpadem austenitu klesá rozpustnost

vodíku a opačně stoupá jeho difúzní rychlost ve feritu), v menší míře stavem napětí a deformace.

Za působení vysokých teplot vzniká tzv. „up hill“ efekt, kdy uhlík vytváří koncentrační skok proti přirozenému koncentračnímu spádu na hranici základního materiálu a svarové čočky. Tímto mechanismem tak vlastně uhlík může vytvořit mezi jednotlivými vrstvami bariéry, blokující přerozdělení vodíku při chladnutí svarového spoje. Tento model redistribuce uhlíku v oblasti ztavení dvou ocelí odlišných fází by znamenal nehomogenní koncentraci uhlíku ve svaru, což spolu se značným sklonem k odmíšení hlavních legujících prvků může vést ke strukturní nestabilitě austenitu. Dále může vést ke zvýšení nežádoucí lokální koncentraci vodíku v TOO, kde jeho přítomnost podporuje riziko vzniku opožděných trhlin.

- *Mikrostrukturní vlivy* – tj. přítomnost mikrostruktury citlivé na účinky vodíku, tj. především martenzitické a rozměr zrna. Hrubé výchozí zrna austenitu prodlužuje jeho stabilitu a podporuje vznik křehkých strukturních složek.
- *Přítomnost tahových zbytkových pnutí v oceli*, kterých míru určuje tuhost svarového spoje. Hladina zbytkových napětí je výsledkem superpozice původních napětí od výrobního procesu, případného dalšího zpracování a napětí vnesených svařovacím tepelným cyklem.

Jako nejúčinnější technologické opatření na zamezení studených trhlin se doporučuje předehřev základního materiálu. Jednotlivé přístupy pro stanovení teploty předehřevu zohledňují vliv uvedených činitelů zavedením parametrů, které jsou výrazem:

- stavu mikrostruktury, daném chemickým složením (vyjádřeným uhlíkovým ekvivalentem CE), kritickou rychlostí ochlazování a tepelným příkonem svařování,
- obsahu vodíku, stanovený experimentálně,
- obsahem zbytkových pnutí vyjádřeného rozměry svařovaného uzlu. [11]

V našem případě materiálu studené trhliny nehrozí, jelikož nedisponuje takovým obsahem uhlíku, aby mohlo dojít k iniciaci studených trhlin.

6 Výchozí experimentální práce

6.1 Příprava experimentálního materiálu

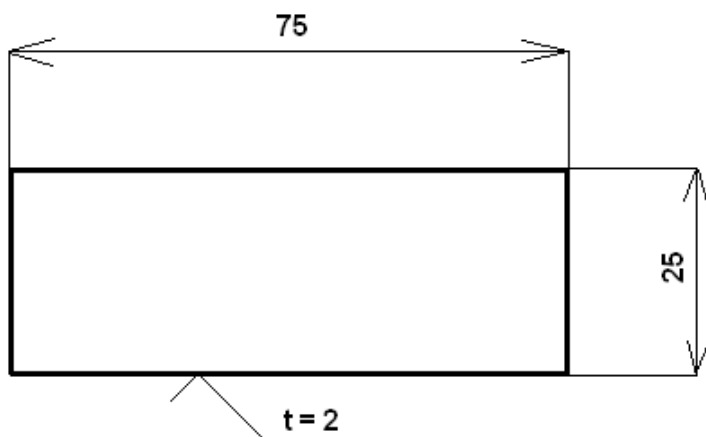
Jako vstupní materiál pro experiment byl B-sloupek od firmy Škoda Auto a.s. z vozu Škoda Octavia.



Obr. 5 B-sloupek vozu Škoda Octavia

Z tohoto B-sloupku bylo odebráno několik vzorků, které svou velikostí a tvarem splňovaly prvotní požadavek proveditelnosti zkoušky. Celkem byly použity tři B-sloupky, abychom získali větší počet kusů pro realizaci experimentu. Velikost odebraného vzorku vycházela z prostoru, který nám zkušební stav umožňoval a zároveň z míst výlisku, ze kterých se vzorek dal odebrat v plochém tvaru. Případné délkové korekce byly na zkušebním stavu provedeny pomocí vymezovacích podložek, případně pomocí stavěcího závitu. Ten umožňoval citlivější a daleko jemnější nastavení, než nám svým rozměrem umožňovaly vymezovací podložky.

Na následujícím obrázku jsou uvedeny základní rozměry odebraných vzorků z B-sloupku (rozměry a tloušťka materiálu jsou uvedeny v milimetrech) a přehled některých míst, ze kterých byly kusy odebrány.



Obr. 6 Rozměr odebíraného vzorku



Obr. 7 Možná místa odběru vzorků

Takto vyznačené kusy byly z B-sloupku vyřezány pomocí pásové pily, aby nedošlo k teplotnímu a tvarovému ovlivnění okrajových částí získávaného kusu.

Do odebraných kusů ze vstupního materiálu bylo nutno vyvrtat otvory o jistém průměru, aby při jejich následném bodovém odporovém svaření vždy po dvojicích, je bylo

možno uchytit do zkušebního stavu. Zároveň byl kladen důraz na přesnost vyvrtaného otvoru. Pokud by mezi zajišťovacím kolíkem a zhotoveným otvorem v kuse byla příliš velká vůle, vneslo by to do měření zkreslení výstupních hodnot. Toto zkreslení by se nám projevilo jako vymezení vůlí při samotném experimentu v průběhu dynamické tahové zkoušky.

Pomocný přípravek při bodovém odporovém svařování

Za použití pomocného přípravku při vyhotovování experimentálních bodových svarů bylo dosaženo:

- dodržení rozteče upevňovacích ok při svaření dvou kusů,
- podélná souosost svařovaných kusů,
- velikost přesazení dvou svařovaných kusů,
- rovnoběžnost podélných rovin svařovaných kusů.

Pomocný přípravek byl vyroben z dvou destiček materiálu 11373, výplň tvořena polyesterovou pryskyřicí, izolační kroužek z dentakrylu a usazovací trny z borovicového dřeva.

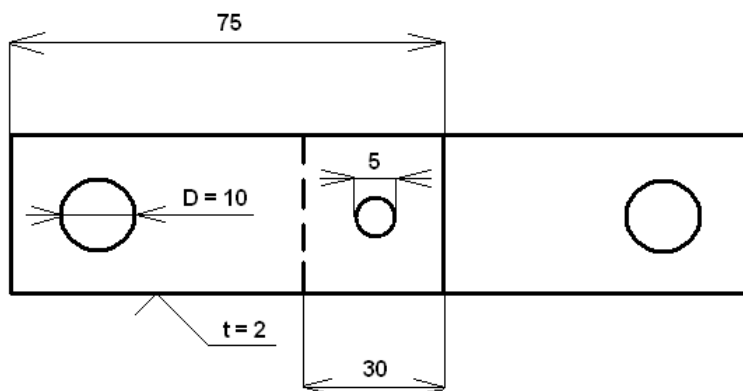


Obr. 8 Pomocný přípravek při svařování

Středový otvor byl místem vstupu dolní elektrody pneumatické bodové svářečky. Právě tímto středovým otvorem se po svařování obou kusů dosahovalo požadovaného umístění svarové čočky.

Vyhotovení bodových odporových svarů

Dle níže uvedeného schématu (obr. 9) byly vyhotoveny experimentální bodové odporové svary, které se následně podrobily tahové dynamické zkoušce na zkušebním stavu. K vyhotovení experimentálních bodových odporových svarů bylo použito pneumatické bodové svářečky (obr. 10) a pomocného přípravku.



Obr. 9 Svařované dvojice kusů (rozměry v mm)



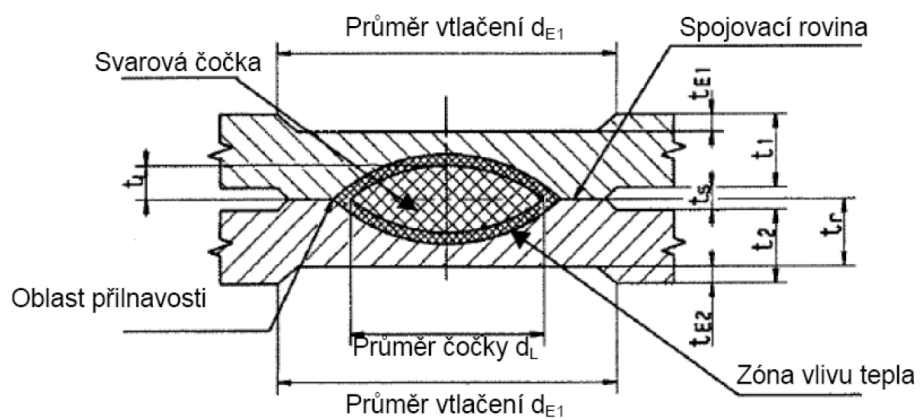
Obr. 10 Pneumatická bodová svářečka BP 20.12 [13]



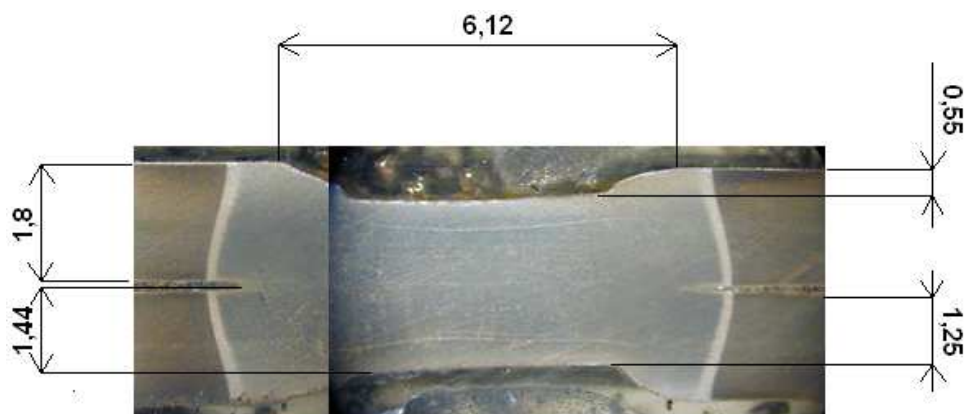
Obr. 11 Detail svařovacích elektrod [13]

Použité technologické parametry svařování:

- svařovací proud $I = 9800 \text{ A}$,
- čas svařování (doba, po kterou prochází elektrodami elektrický proud) 25 period;
přičemž 1 perioda = 0,02 ms,
- přítláčná síla svařovacích elektrod $F = 3000 \text{ N}$.



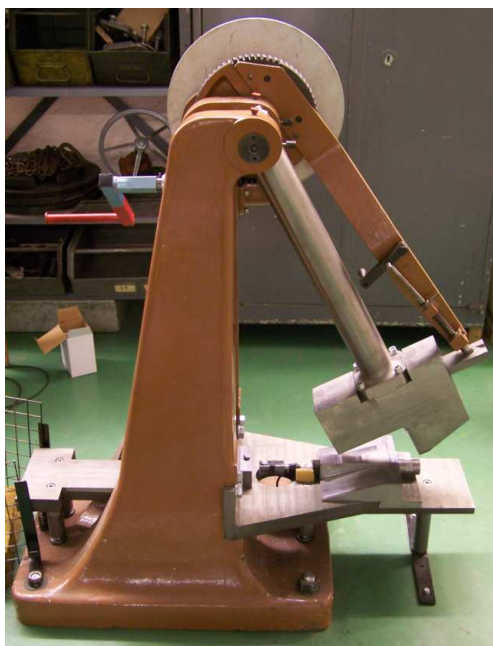
Obr. 12 Schematické znázornění bodového svaru [14,15]



Obr. 13 Parametry vyhotoveného bodového svaru (rozměry v mm)

6.2 Metodika dynamických destruktivních zkoušek

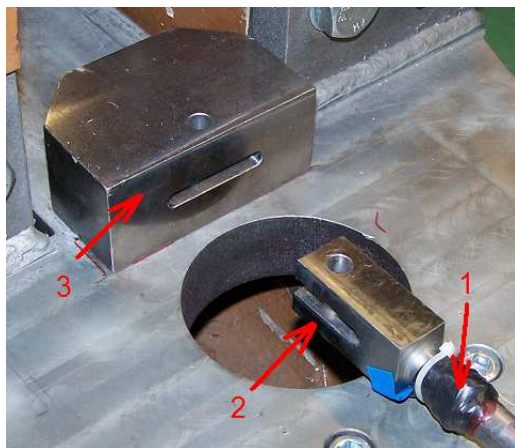
K tomu, abychom mohli uskutečnit prvotní experiment, jsme využili zkušebního stavu, který byl speciálně zkonstruován pro účely našeho zkoumání. Jedná se o úpravu Charpyho kladiva, které je navíc rozšířeno o deformační člen. Úprava spočívala v možnosti provádění tahových dynamických zkoušek. Tento deformační člen je reprezentován tyčí, kde jeden konec je opatřen vidlicí a na druhém konci je vyroben závit. V části za vidlicí je tato tyč osazena tenzometrickými snímači zapojenými do plného mostu. Zkušební vzorek se svými oky umístí do vidlice a jezdec, kde se zajistí čepy. Jezdec je po nárazu kladiva směřován do útlumové zóny, kde odevzdá svou udělenou kinetickou energii. Tím, že vidlice je pevnou částí zkušebního stavu a jezdec se pohybuje volně, je možné při úderu kladiva zkušební vzorek tahově zatížit. Vyvolaná změna napětí je registrována přes ústřednu a A/D převodník do PC pro evidenci a další zpracování dat.



Obr. 14 Zkušební stav pro tahovou dynamickou zkoušku



Obr. 15 Stupnice zkušebního stavu



- 1 - deformační člen
- 2 - vidlice
- 3 - jezdec

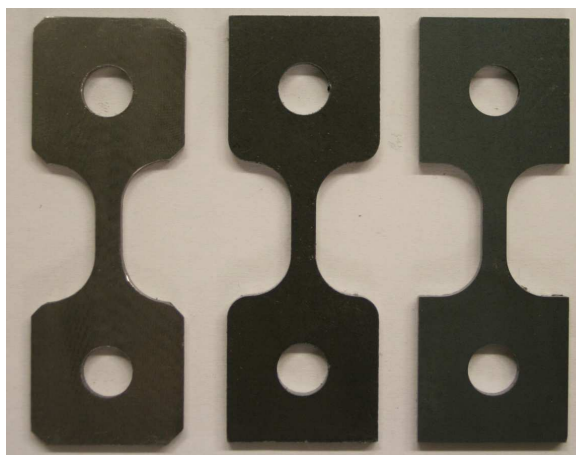
Obr. 16 Deformační člen a jezdec

Ověření metodiky dynamické zkoušky

K ověření metodiky zkoušky bylo použito vyhotovených zkušebních vzorků z oceli 11373 specifického tvaru. Tato ocel byla volena z důvodu ekonomičnosti a zároveň z důvodu, že se nekladl důraz na pevnost materiálu.

Zkušební vzorky získaly několik tvarových podob. Při jejich návrhu bylo použito normy ČSN EN 10002-1, díky které se jednoznačně určila délka destruované části vzorku při následné dynamické zkoušce.

Vyhotovení experimentálních ověřovacích vzorků



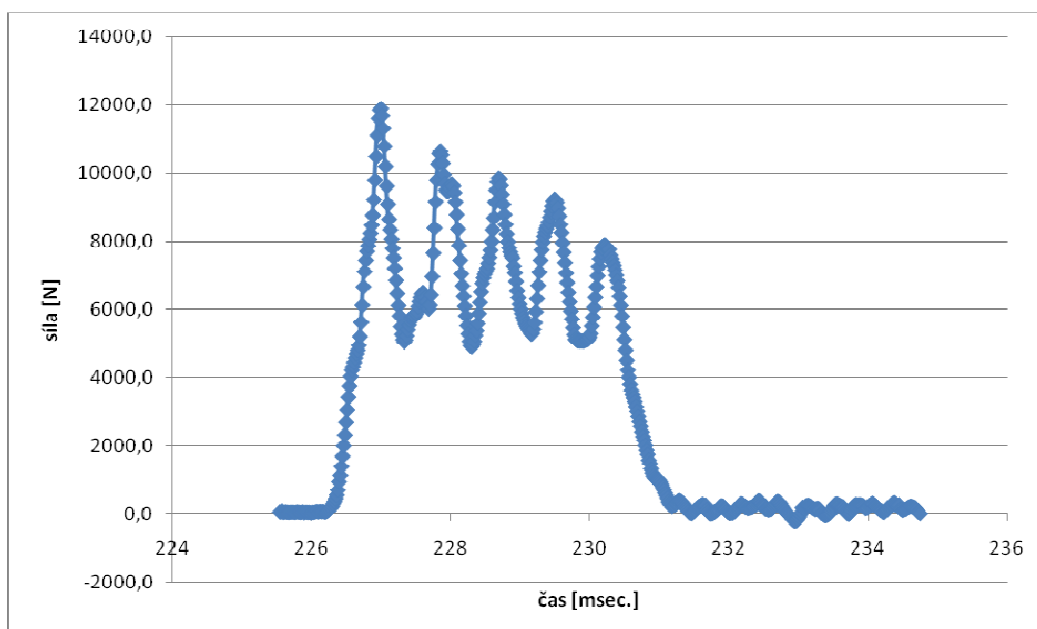
Obr. 17 Druhy ověřovacích vzorků

Tyto vzorky byly laserově vyřezány z tabule plechu oceli 11373 o tloušťce 2 a 3 mm.

Průběh zkoušky pro ověřování metodiky

Zkušební vzorky z oceli 11373 byly upnuty svými oky do jezdce a vidlice deformačního členu. Při následné dynamické zkoušce byly zničeny zkušební vzorky v předem definovaném místě a výstupní charakteristika v podobě grafu nám odhalila průběh destrukce zkušební vzorku.

Z uvedeného grafu (obr. 18) není jednoznačně zjistitelné, jakému ději v průběhu destrukce můžeme přiřadit jednotlivé kmity ze záznamu. Zkoušce byl podroben vzorek vk24 se zatěžující rychlostí 3,23 m/s (mat. 11373). Tato zkouška byla ověřením, zda je možné použít metodiku dynamické tahové zkoušky.



Obr. 18 Záznam vzorku vk24

V průběhu dynamické zkoušky byl evidován typ vzorku, jeho bližší specifikace a hodnota zatěžující rychlosti, která byla použita při dynamické zkoušce. V rámci studia možných vlivů na tvar záznamu, se experimentovalo se zatěžovaným průřezem zkušební vzorku.

Následující tabulka (tab. 1) blíže specifikuje průběh ověřování metodiky.

Tab. 1 - Průběh ověřování metodiky

| Průběh ověřování metodiky | | | |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------|
| označení vzorku | specifikace vzorku | zatěžující rychlost [m/s] | pozn. |
| vk19/1 | 11 373 | 3,23 | |
| vk20/2 | 11 373 | 3,23 | bez záznamu |
| vk21/3 | 11 373 | 3,23 | |
| vk22/4 | 11 373 | 3,23 | |
| vk23/5 | 11 373 | 3,23 | |
| vk24/6 | 11 373 | 3,23 | |
| vk25/7 | 11 373...2ks spojené vz. 5x2mm | 4,5 | |
| vk26/8 | 11 373...zaoblené hrany | 3,23 | |
| vk27 | 11 373...planžeta | 3,23 | |
| vk28 | 11 373...5x3mm | 4,5 | |

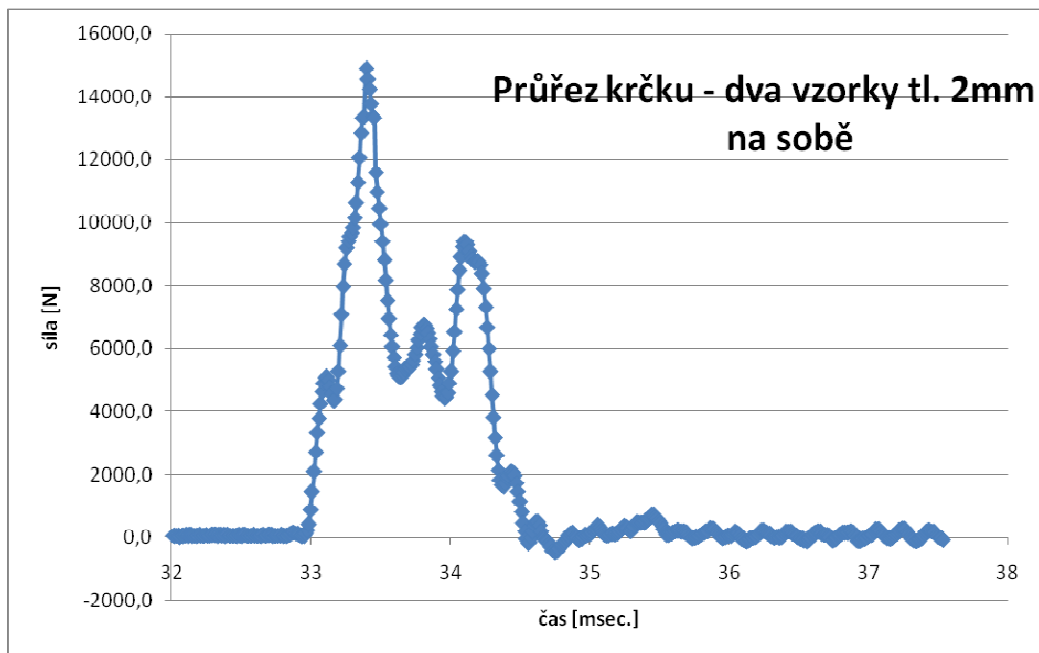
Použity byly dvě základní hodnoty zatěžujících rychlostí:

- 3,23 m/s,
- 4,5 m/s.

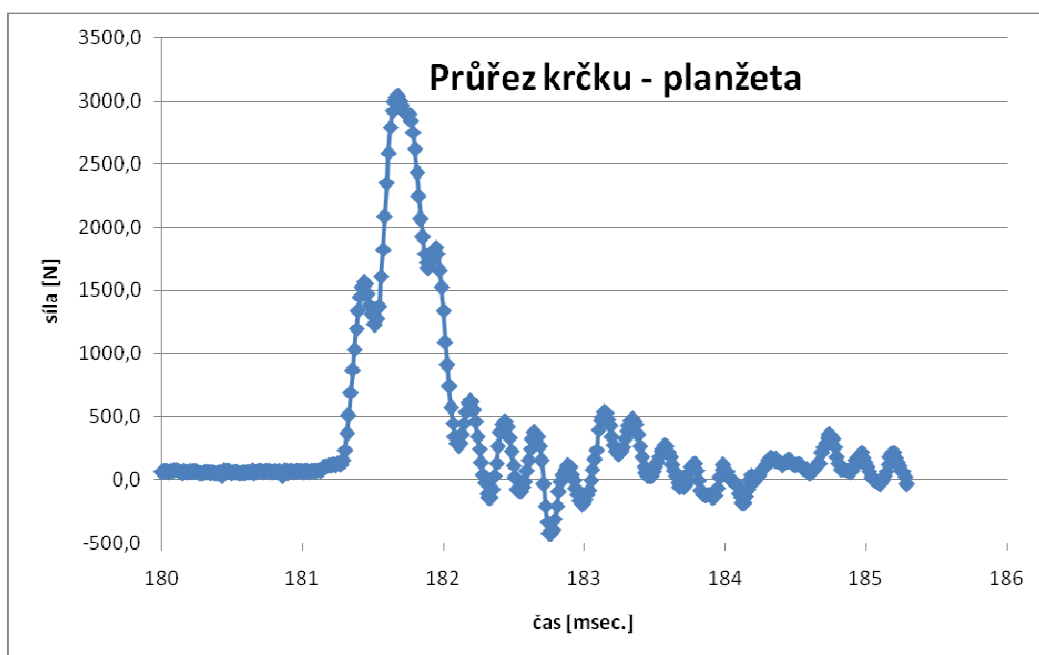
Vyhodnocení zkoušky pro ověřování metodiky

Jelikož se právě změnou průřezu či jeho přizpůsobením geometricky symetrickým tvarům dosahovalo jednoznačnějších výstupních charakteristik, bylo možno uvažovat vlivy na tvar záznamu. Závěrem bylo zjištění, že následné zákmitý jsou odezvou od:

- šíření trhliny v průřezu krčku zkušebních vzorků,
- dynamickou odezvou upínacího mechanismu zkušebního stavu.



Obr. 19 Záznam vzorku vk25



Obr. 20 Záznam vzorku vk27

Z výše uvedených grafů (obr. 19, obr. 20), které jsou výstupem dynamické zkoušky již lze identifikovat hodnotu pevnosti materiálu.

6.3 Vyhodnocení výchozího experimentu

Cílem výchozího experimentu měření únosnosti svarových spojů vysokopevné martenzitické oceli bylo:

- Ověření metodiky pro testování daného typu svarových spojů, tj. z hlediska tvaru, reálné pevnosti spojů apod.
- Stanovení limitních hodnot zatěžování pro následující testování vlivu rozdílné rychlosti zatěžování. Experimentálně bylo nutno stanovit především minimální rychlost, resp. velikost výchozí potenciální energie pro úplné porušení bodového odporového svaru, který byl předmětem našeho zkoumání.

Dalším úkolem byla analýza získaných záznamů destruktivní zkoušky. Při samotné realizaci prvotního experimentu byl zjištěn jeden ze stěžejních problémů této zkoušky. Tím byla správná interpretace jednotlivých částí záznamu vyjadřující závislost deformační síly na čase průběhu destrukce svaru.

Tab. 2 - Výsledky výchozí dynamické zkoušky

| Výsledky výchozí dynamické zkoušky | | | |
|------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|
| Označení vzorku | Rychlost zatěžování [m/s] | Spotřebovaná energie [J] | poznámka |
| vk01 | 3,23 | 139,3 | |
| vk02 | 4,5 | 263,4 | lom v oku |
| vk03 | 4,5 | 112,5 | |
| vk04 | 3,23 | 104,3 | |
| vk05 | 3,23 | 131,9 | bez záznamu |
| vk06 | 3,23 | 87,1 | |
| vk07 | 4,5 | 112,4 | bez záznamu |
| vk08 | 4,5 | 68,9 | bez záznamu |
| vk09 | 4,5 | 79,7 | bez záznamu |

Výsledky vstupních experimentů jsou uvedeny v tabulce č. 2. Testovány byly dvě úrovně rychlosti zatěžování, nižší hodnota rychlosti byla stanovena jako minimální možná pro destrukci bodového svaru.

Tabulka č. 2 vyjadřuje rozdíly spotřebované energie do lomu v závislosti na rychlosti. Jelikož se jednalo o prvotní experiment, docházelo v měřícím řetězci k nedostatkům v podobě nezaznamenání průběhu destruktivní zkoušky. U vzorku vk02 došlo při zkoušce k lomu v zajišťovacím oku.

7 Experimentální hodnocení vybrané vysokopevné martenzitické oceli při zvýšené rychlosti zatížení

Při zkoušce byly zvoleny dvě hodnoty zatěžovací rychlosti, které byly použity pro dvě skupiny zkušebních vzorků a to:

- 3,26 m/s,
- 5,16 m/s.

Každá skupina čítala tolik vzorků, aby alespoň čtyři provedené tahové dynamické zkoušky pro jednotlivé hodnoty zatěžujících rychlostí byly platné. Platnost zkoušky spočívala v získání záznamu odezvy deformačního členu při průběhu zkoušky a porušení svarové čocky v horizontální rovině popřípadě dojde-li k jejímu vytržení. Následná tabulka charakterizuje, zda bylo během zkoušky dosaženo splnění hodnotících kritérií pro platnost zkoušky.

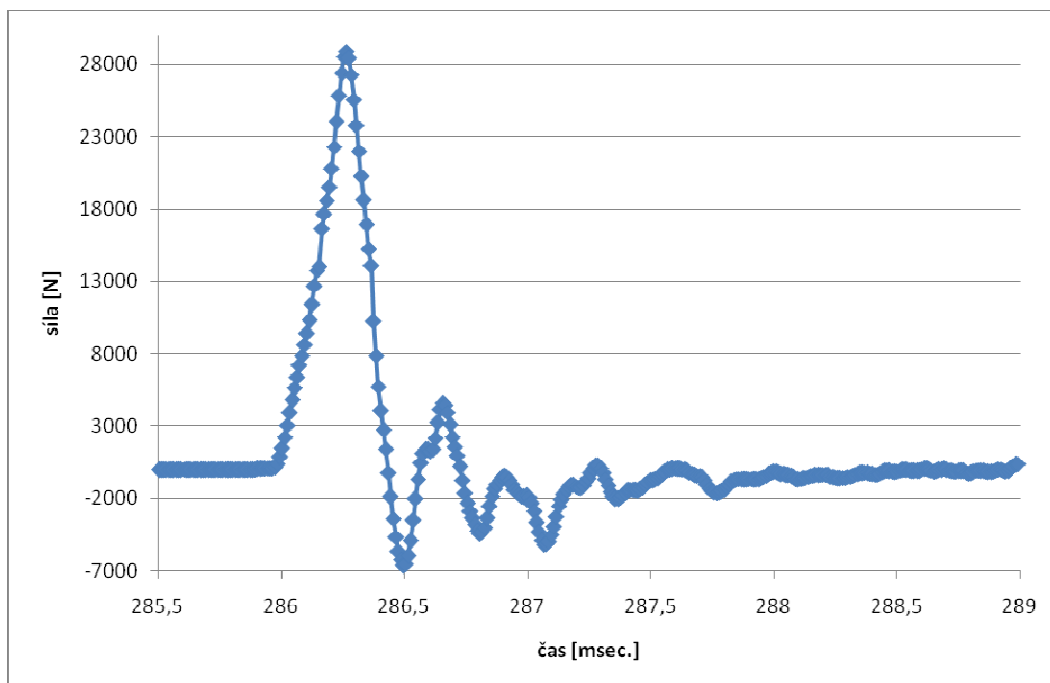
Vyhodnocení hlavního experimentu

Tab. 3 - Výsledky hlavního experimentu

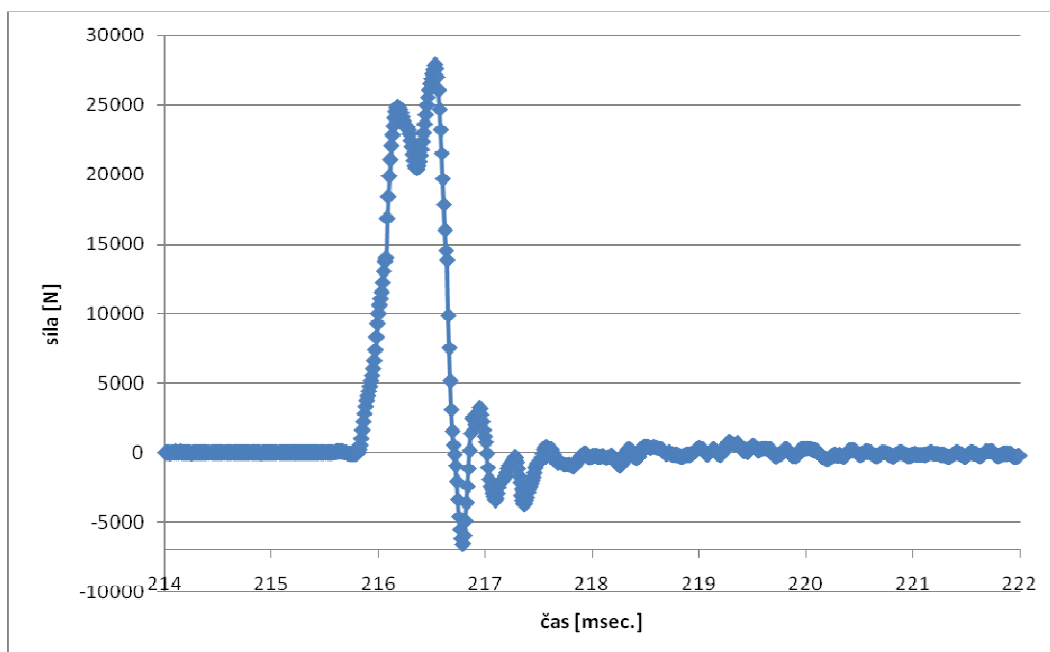
| Výsledky hlavního experimentu | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------------|
| Číslo vzorku | Rychlost zatěžování [m/s] | Spotřebovaná energie [J] | Poznámka | Pevnost svaru (materiálu) [N] |
| 17 | 3,26 | 68,3 | OK | 24171 |
| 18 | 3,26 | 82,5 | OK | 24888 |
| 19 | 3,26 | 62,6 | vytržená čocka | 26588 |
| 20 | 3,26 | 95,4 | OK | 21877 |
| 21 | 3,26 | 219,8 | NEZLOMENO | X |
| 22 | 3,26 | 201,1 | lom v oku | 25123 |
| | | | | |
| 1 | 5,16 | 231,7 | lom v oku | 30059 |
| 2 | 5,16 | 135,4 | vytržená čocka | 31319 |
| 3 | 5,16 | 130,2 | OK | 29711 |
| 4 | 5,16 | 318,2 | lom v oku | 34360 |
| 5 | 5,16 | 110,0 | vytržená čocka | 28881 |
| 6 | 5,16 | 328,7 | lom v oku | 33858 |
| 7 | 5,16 | 135,4 | OK | 30581 |

I přesto, že první vstupní zatěžovací rychlost hodnoty 3,26 m/s byla považována za nejnižší možné minimum pro porušení bodového odporového svaru, došlo během hlavního experimentu k ojedinělé situaci. Svarová čocka vzorku č. 21 uvedeného v tabulce č. 3 byla

natolik precizně provedena, že se hodnota této zatěžující rychlosti ukázala jako nedostačující a tím se nepodařilo dosáhnout jejího zničení. Veškerá vstupní potenciální energie se zmařila ve formě deformace upínacích ok a zbytkového materiálu v jejich okolí.



Obr. 21 Záznam vzorku 5 – rychlost zatížení 5,16 m/s (vytržená čočka)



Obr. 22 Záznam vzorku 18 – rychlost zatížení 3,26 m/s (horizontální lom)

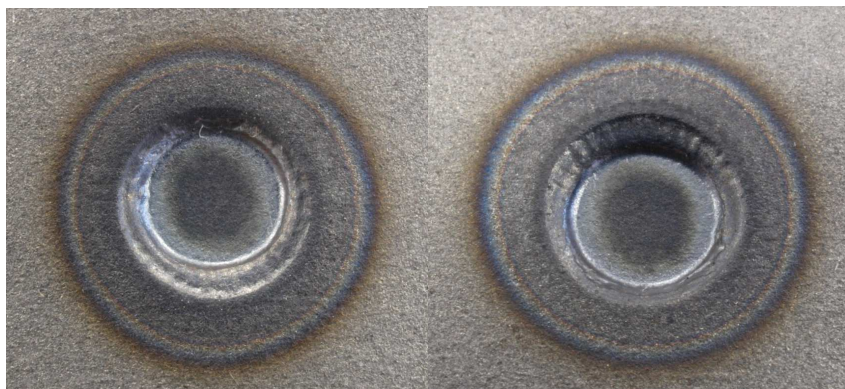
Na obrázku č. 23 je znázorněn zkušební vzorek před dynamickou tahovou zkouškou. Skrz upínací oka se vzorek zajistí čepy v jezdcí a ve vidlici deformačního členu.



Obr. 23 Neporušený zkušební vzorek před dynamickou tahovou zkouškou



Obr. 24 Zkušební vzorek po dynamické tahové zkoušce zničen v oku



Obr. 25 Detail otisku svařovacích elektrod

8 Vyhodnocení výsledků ve srovnání se statickými parametry oceli

V rámci práce byly dále provedeny statické zkoušky, se kterými se budou srovnávat výsledky zkoušek dynamických.

Při statických zkouškách byla vyhodnocována výsledná pevnost bodových odporových svarů s jednou velikostí zatěžující rychlosti. K destrukci spojů došlo dvěma možnými způsoby (obr. 27):

- vytržením ze základního materiálu,
- dělením v horizontální rovině.

Výsledný rozptyl hodnot pevnosti svarů byl způsoben rozdílnými jakostmi svařových čoček.

Tab. 4 - Výsledky statické tahové zkoušky

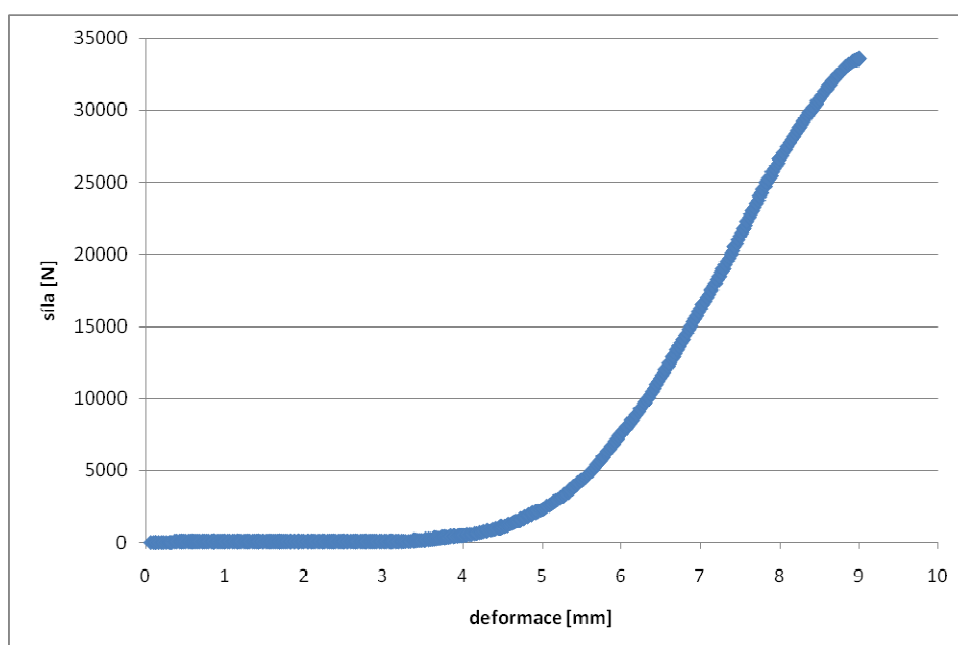
| Výsledky statické zkoušky tahem | | | |
|---------------------------------|---------------------------|----------------|-------------------|
| Označení vzorku | Rychlost zatěžování [m/s] | Poznámka | Pevnost svaru [N] |
| STAT. BOD 1 | 0,00033 | OK | 32689 |
| STAT. BOD 2 | 0,00033 | OK | 33557 |
| STAT. BOD 3 | 0,00033 | vytržená čočka | 25416 |
| STAT. BOD 4 | 0,00033 | vytržená čočka | 24134 |
| STAT. BOD 5 | 0,00033 | OK | 29063 |

Z následující tabulky (tab. 5) vyplývá, že zjištěná závislost pevnosti na rychlosti zatěžování nebyla v daném rozsahu zkoušek jednoznačná. Zatímco u dynamického zatěžování se plně potvrdilo očekávané navýšení únosnosti svarů se zvyšující se rychlosti zatížení, u statického zatížení bylo dosaženo únosnosti v hodnotách mezi 3,26 a 5,16 m/s. Z toho lze vyvodit, že ve vlivu rychlosti se může uplatňovat nelineární závislost a pro její korektní zjištění nutno provést rozšířené experimenty. Zároveň nutno vzít v úvahu podstatný vliv jakosti svařování, který byl v rámci práce řešen tříděním vzorků pro testy podle vizuálně rozlišitelných ukazatelů.

Jako základní hodnota únosnosti spoje byla volena průměrná hodnota výsledků statických tahových zkoušek. Na jejím základě se porovnávaly průměrné hodnoty únosnosti dynamických tahových zkoušek.

Tab. 5 - Porovnání únosnosti dle rychlosti zatěžování

| Porovnání únosnosti dle rychlosti zatěžování | | | |
|--|---------------------------|--------------------------------|------------------|
| zkouška | rychlost zatěžování [m/s] | průměrná hodnota únosnosti [N] | rozdíl únosnosti |
| statická | 0,00033 | 28971,8 | 100,0% |
| dynamická | 3,26 | 24381 | 81,2% |
| dynamická | 5,16 | 33324 | 136,7% |



Obr. 26 Průběh statické zkoušky vzorku STAT. BOD 2



Obr. 27 Průběhy lomů svarových čoček

9 Hodnocení průběhu lomů ve vazbě na dosaženou pevnost svarů

Za pomoci rastrovací elektronové mikroskopie můžeme odhalit strukturu lomu, ke kterému došlo při podrobení bodového svaru tahové dynamické zkoušce. Pomocí struktury lomu můžeme jednoznačně určit, zda se jedná o lom plastický (tvárný) nebo lom křehký (štěpný).

Součástí hodnocení vlivu rychlosti zatěžování na pevnost svarových spojů byly rozbor jejich lomového chování. Provedeny byly fraktografické analýzy lomových ploch po statické zkoušce a po dynamických zkouškách při dvou rychlostech zatěžování.

Hodnocení bylo zaměřeno na identifikaci módu lomu a vlivů na případné změny lomového mechanismu. Vedle vlivu geometrie svarové čočky se zde může uplatnit kupř. vliv vnitřních vad či vměstků v podobě oxidu či sulfidu. Podrobnější rozbor jejich zdroje nebo možná opatření, však překračují rámec diplomové práce a bylo by je vhodné řešit v samostatné práci.

Vzhledem k typu aplikovaného se předpokládá, že výsledný mód lomu svarové čočky bude právě tvárný lom. Z destruovaných vzorků byly vybrány a následně podrobeny na rastrové elektronové mikroskopii vzorky:

- STAT. BOD 1 (zatěžující rychlost 0,00033 m/s),
- STAT. BOD 2 (zatěžující rychlost 0,00033 m/s),
- BS 03 (zatěžující rychlost 5,16 m/s),
- BSN 00 (zatěžující rychlost 3,26 m/s).

9.1 Příprava vzorků a měření

Vzorky byly odřezány z destruovaných částí bodových odporových svarů. Pro tento účel posloužila pila MIKRON 110 MTH s nastavitelnými otáčkami pilového kotouče. Zároveň aby nedošlo ke znečištění pozorovaných ploch, byla svarová čočka zabalena do celofánu a v jejím okolí byl proveden řez pro oddělení ze zničeného zkušební vzorku.

Takto odebrané vzorky byly ustaveny na měřící nosič, který byl za pomoci uhlíkové pásky připevněn z důvodu vodivosti celé soustavy. Na vyhodnocení lomových ploch odporových bodových svarů byl použit rastrovací elektronový mikroskop TESCAN 5130SB, mikroanalyzátor EDAX Brooker.

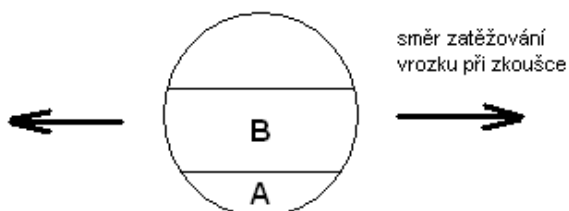
9.2 Výsledky rastrovací elektronové mikroskopie

Srovnávacím parametrem byla rychlost zatěžování jednotlivých vzorků. Proto jako první byla vyhodnocována lomová plocha vzorků:

- BSN 00
- STAT. BOD 1

Lomová plocha vzorku BSN 00

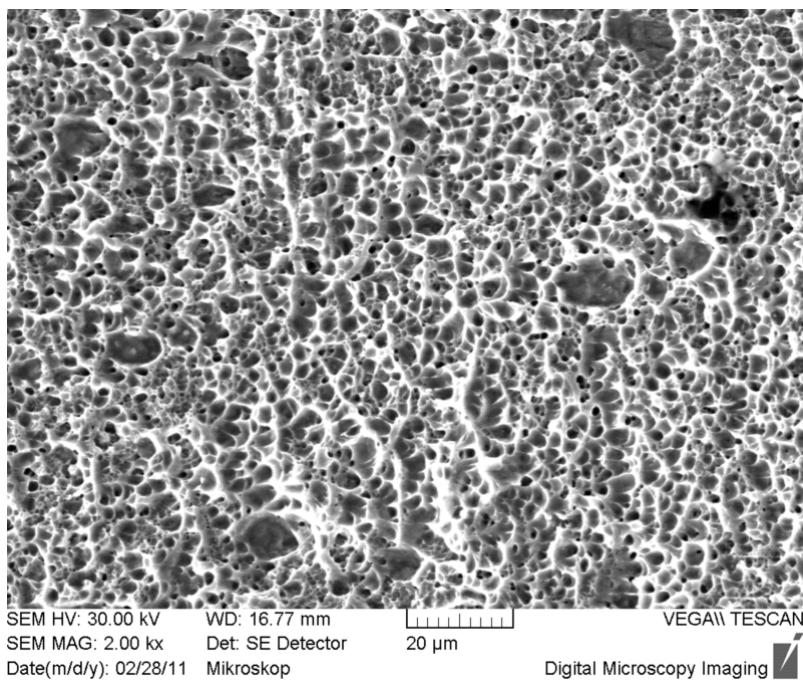
Lomová plocha tohoto vzorku byla rozdělena na části A a B vzhledem ke směru zatěžování viz obrázek.



Obr. 28 Rozdělení lomové plochy čočky

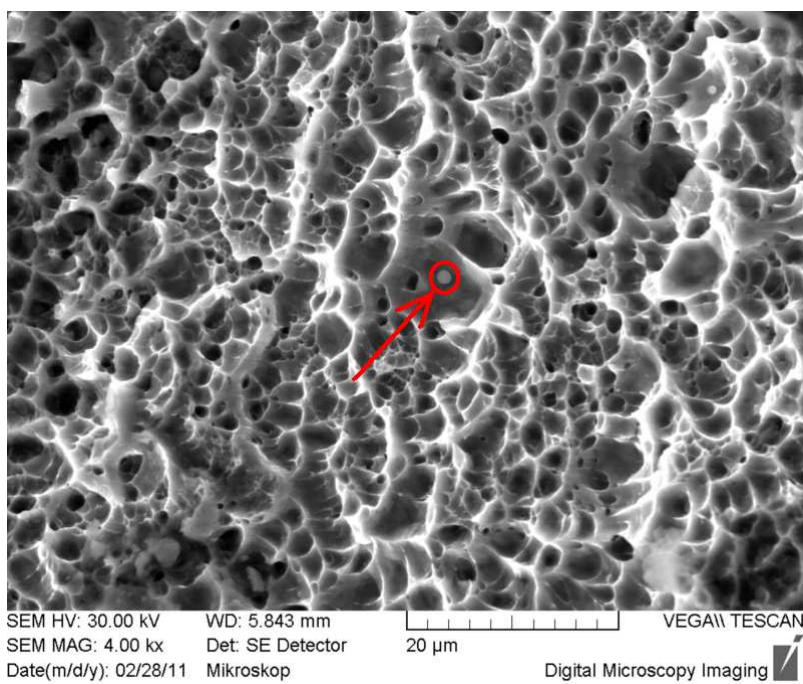
Lomová plocha A

Při bližším rozboru lomové plochy A bylo zjištěno, že se jedná o transkrystalický tvárný lom typický svou důlkovitou strukturou. Důlky se od sebe lišily svým průměrem a hloubkou, což dokazuje jak přítomnost nečistot ve struktuře, tak i velikost energie, která byla potřebná pro jeho vytvoření. Následující obrázek představuje nerovnoměrnost ve velikosti důlků. Podle vzhledu a uspořádanosti důlků se lze domnívat, že v této části lomové plochy vznikaly tyto důlky tahovým mechanismem, který během tahové zkoušky vznikl právě v této okrajové části svarové čočky.



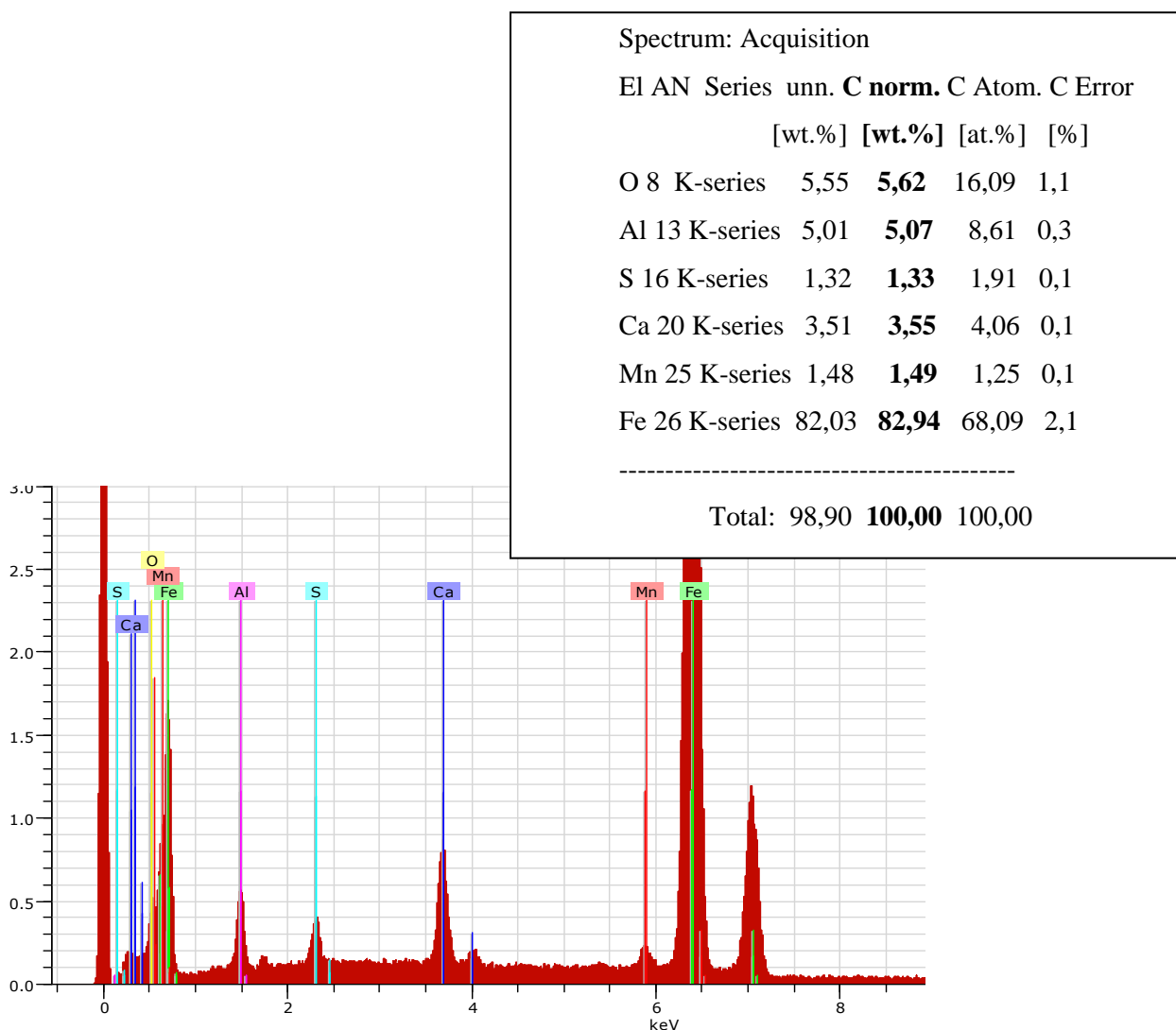
Obr. 29 Struktura lomové plochy A vzorku BSN 00

Právě ve zvětšených důlcích mohly být viditelné nečistoty.



Obr. 30 Detail nečistoty ve struktuře lomové plochy

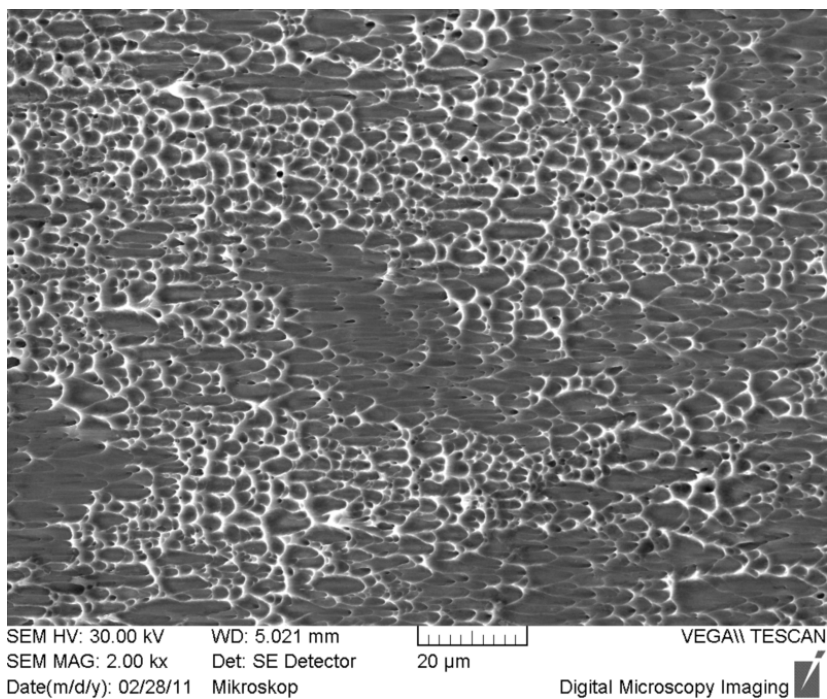
Pro identifikaci této nečistoty bylo použito chemického rozboru (výsledek viz obr. 31). Na základě chemické analýzy bylo zjištěno, že se jedná o komplexní oxi-sulfidický vměstek. Oxid byl zjištěn na bázi hliníku a vápníku, tj. použitých dezoxidačních prvků.



Obr. 31 Výsledky chemické mikroanalýzy oxi-sulfidického vměstku

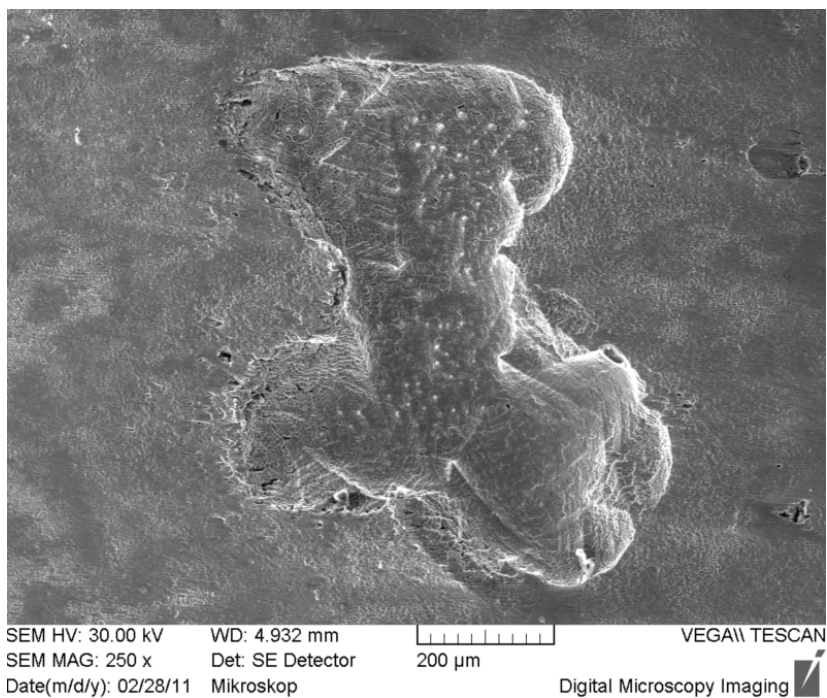
Lomová plocha B

Stejně jako u předcházející lomové plochy A byl i zde identifikován transkrystalický tvárný lom. V této části svarové čočky byl tvárný lom svými specificky orientovanými důlky iniciován stříhovým mechanismem vzniklým při tahové zkoušce.

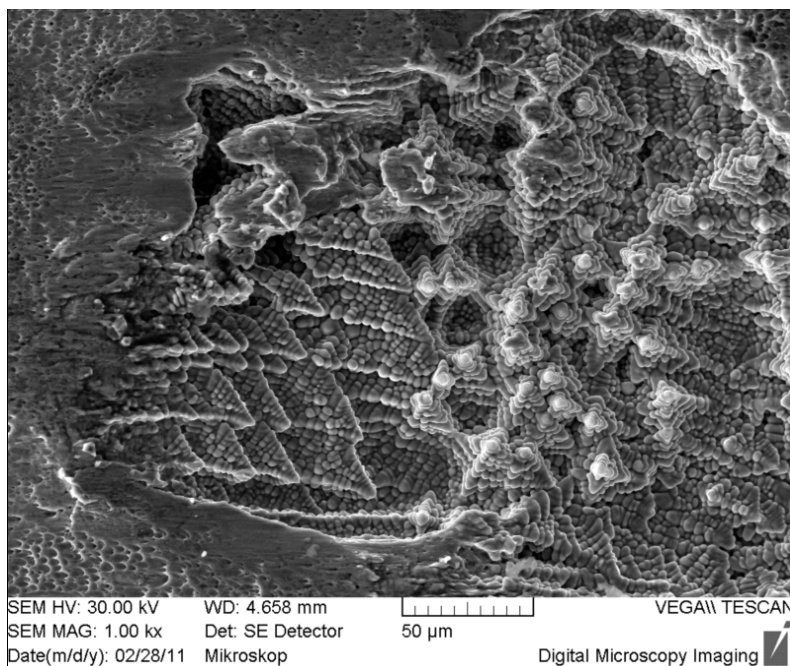


Obr. 32 Struktura lomové plochy B vzorku BSN 00

Ve středu lomové plochy B byla zjištěna dutina, ve které jsou patrné primární dendrity. Dutina vznikla při procesu odporového bodového svařování a to za nedostatku svarového kovu při tuhnutí a následném chladnutí.

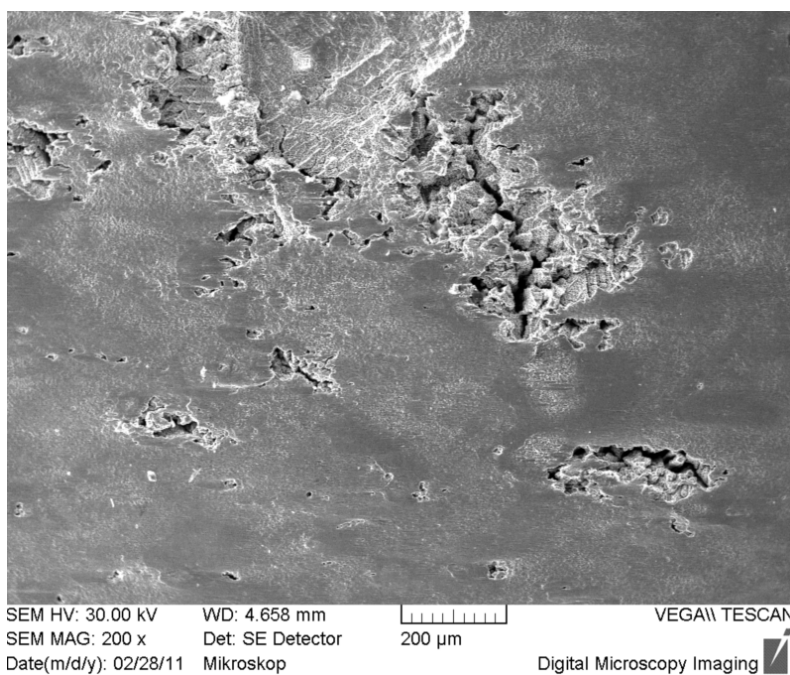


Obr. 33 Dutiny v oblasti B



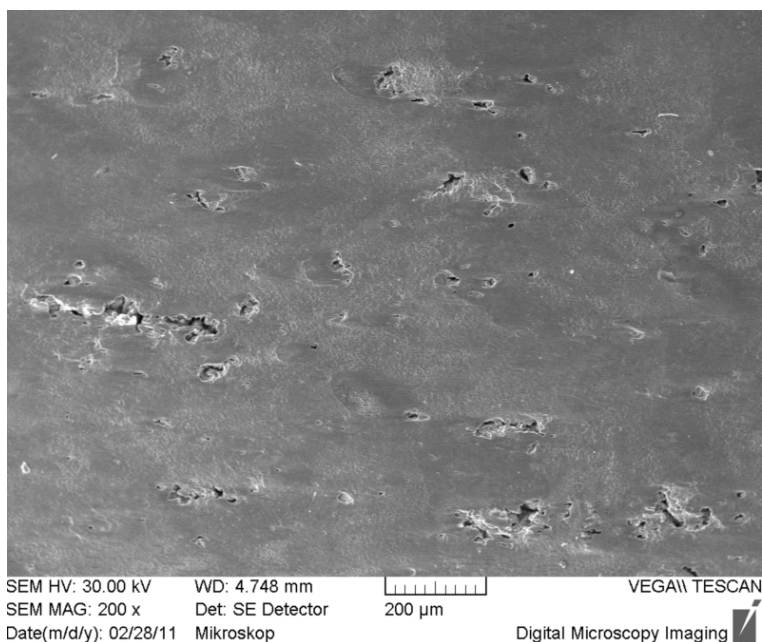
Obr. 34 Rozhraní dutiny a lomové plochy

Ve svarové čočce byly dále nalezeny trhliny, které vznikly buď při odporovém svařování, nebo při chladnutí. Ty se následně po rázové zkoušce rozevřely a snížily tak únosnost spoje.



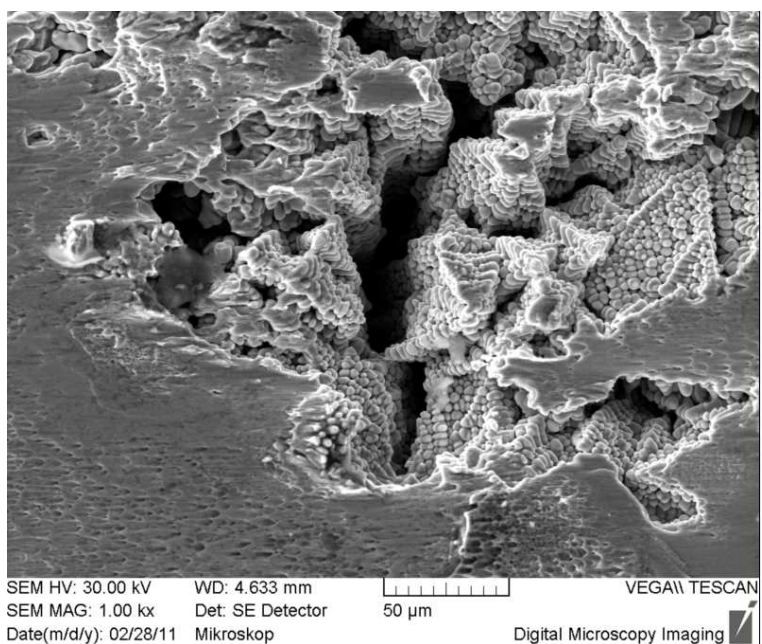
Obr. 35 Trhliny a dutina na lomové ploše v oblasti B

Mimo trhlin a dutin v lomové ploše byly nalezeny i řediny, jejich výskyt a počet mohl mít za následek již znatelný pokles únosnosti odporového bodového svaru.



Obr. 36 Výskyt ředin

V následujícím snímku je jasně zřetelné, že i když trhlina představuje koncentrátor napětí a tudíž se na jejím hrotu soustředí velké množství energie, nezmění se mód lomu. Mechanismus lomu je stále tvárný.

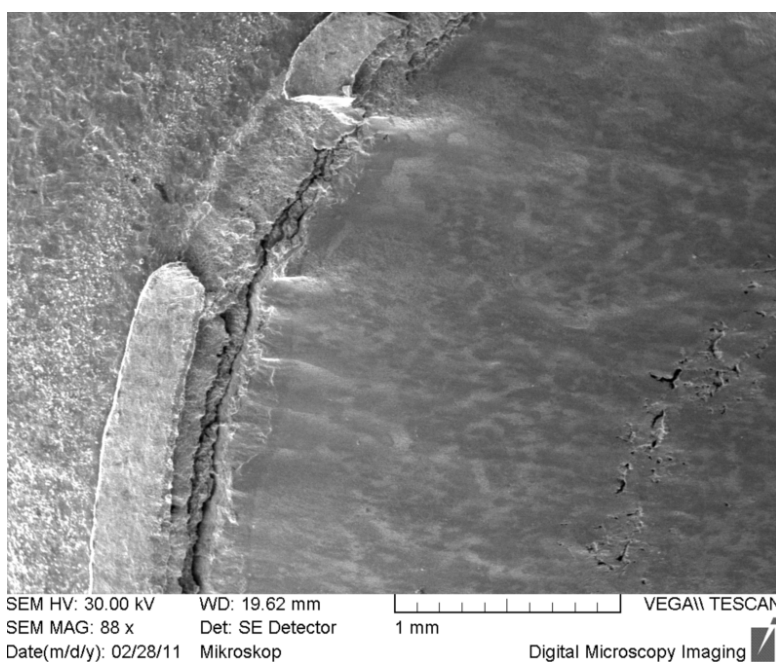


Obr. 37 Neměnnost tvárného lomu v oblasti kolem trhliny

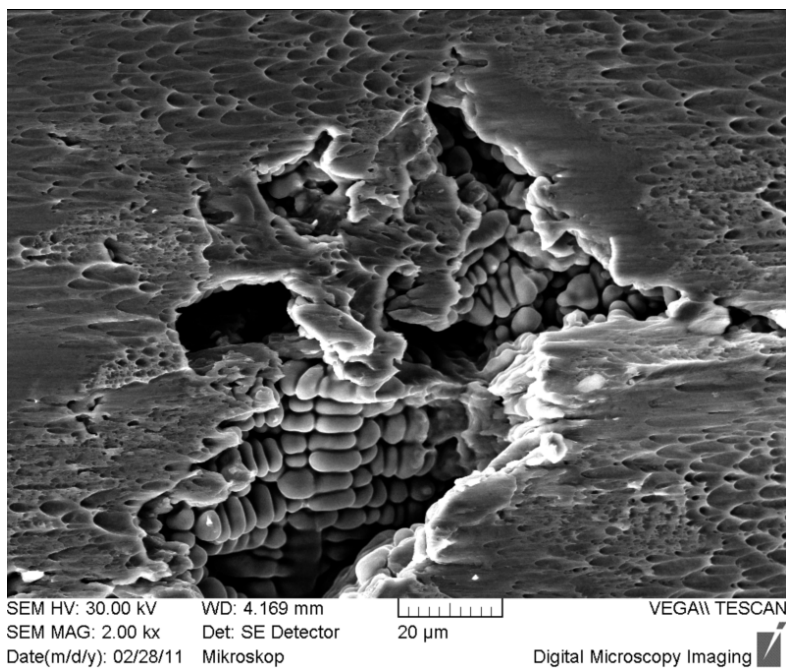
Lomová plocha vzorku STAT. BOD 1

Zjištěn byl efekt násobné iniciace lomu. Jak je možno vidět na následujícím obrázku, trhlinka byla iniciována po obvodu svarové čočky, avšak převládl charakter tvárného smykového lomu po průřezu čočky, který se následně potvrdil.

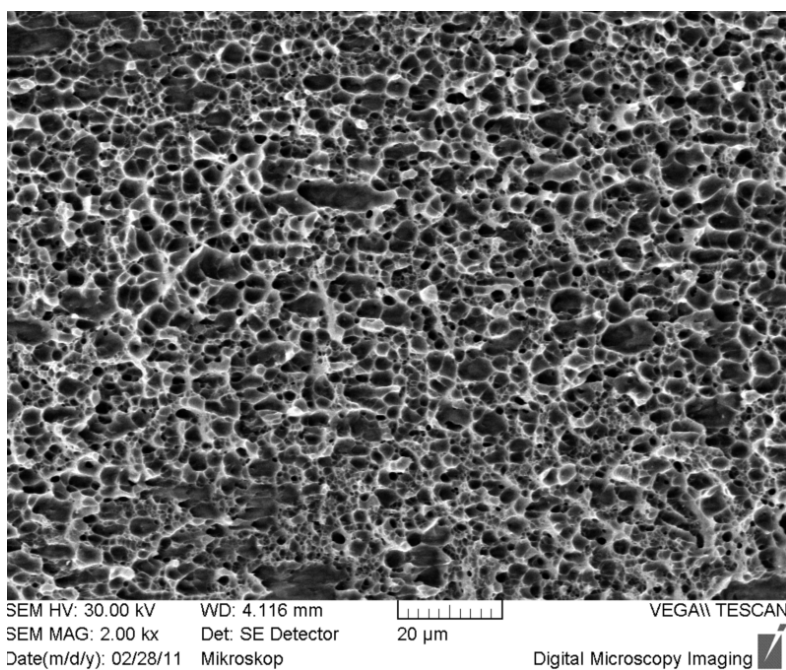
Vnitřní vady typu ředin a dutin byly na této lomové ploše obsaženy stejně jako u vzorku, který byl podroben dynamické tahové zkoušce. Tyto vady neměly nijak vliv na možnou změnu módu lomu. Taktéž byl v celé lomové ploše zachován tvárný lom.



Obr. 38 Souběžná iniciace

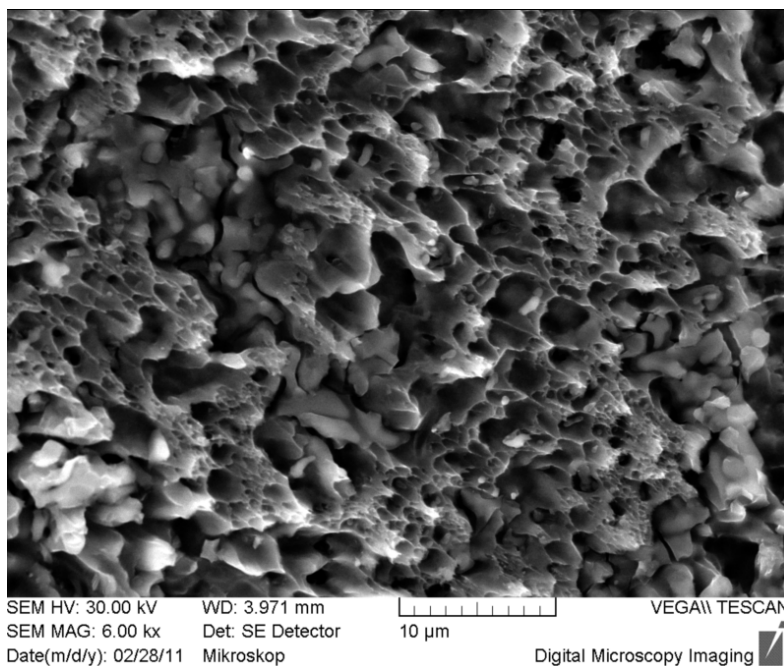


Obr. 39 Dutina v lomové ploše



Obr. 40 Tvárný lom staticky zatíženého vzorku STAT. BOD 1

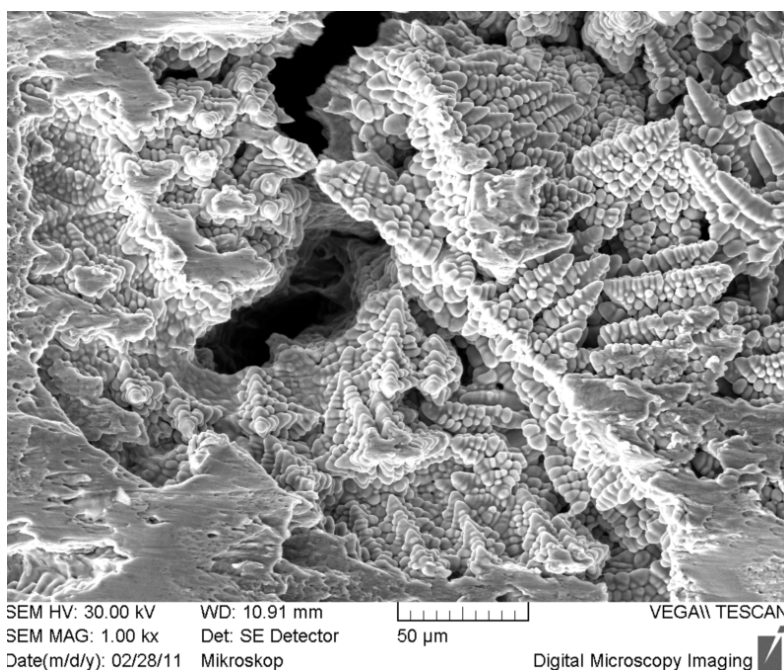
Strukturu TOO je možné při rastrovací mikroskopii rozpoznat právě tím, že se v ní nacházejí místa částečného ztavení materiálu a tím se tak struktura povrchu střídá s tvárným lomem a s povrchem základního materiálu.



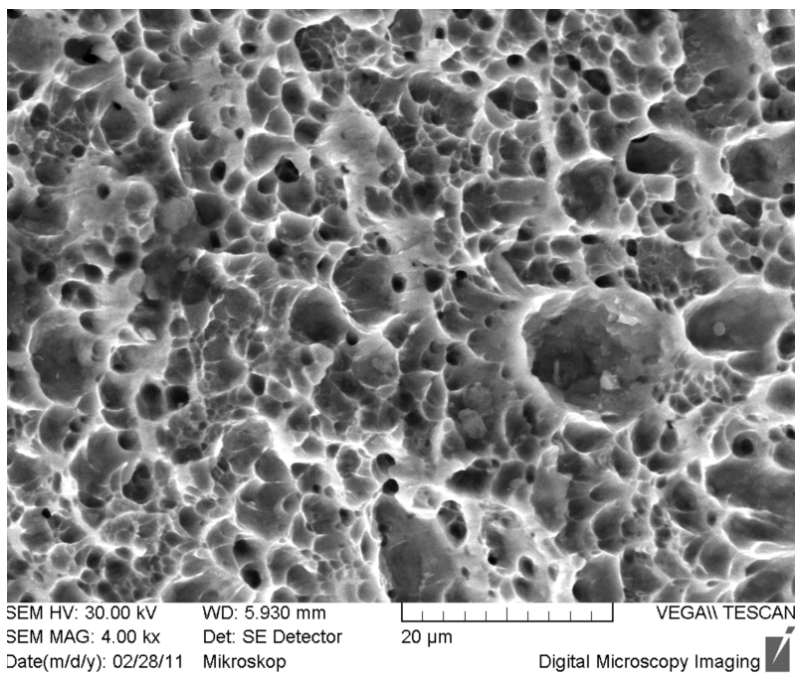
Obr. 41 TOO staticky zatřženého vzorku STAT. BOD 1

Lomová plocha vzorku BS 03

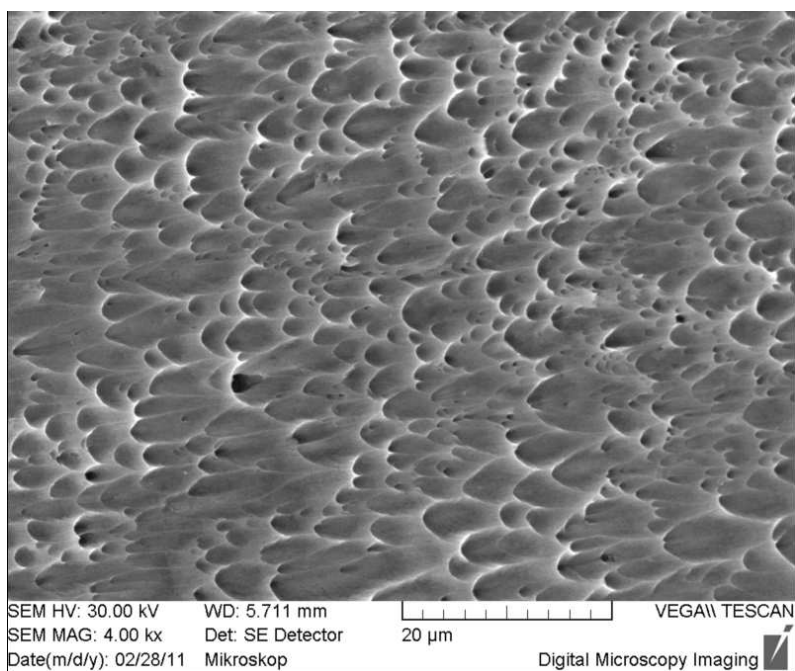
Svarová čočka byla rozdělena na dvě části A, B stejně jako u vzorku BSN 00. Tento vzorek byl deformován zatěžující rychlostí 5,16 m/s. Ve střední části, tedy v oblasti B, byly opět nalezeny dutiny s ředinami. Mód lomu se opět ověřil jako transkrystalický tvárný lom.



Obr. 42 Dutiny s rozevřenými ředinami



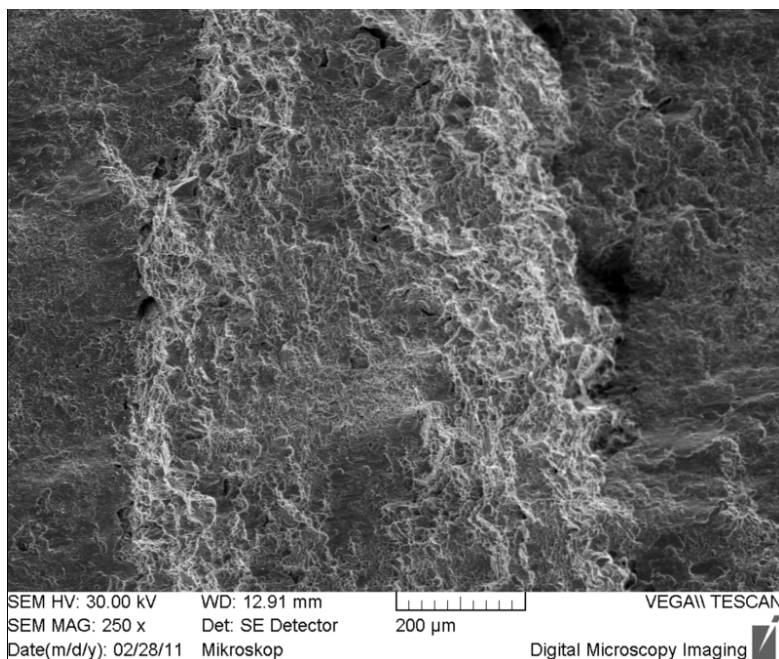
Obr. 43 Detail lomové plochy v oblasti A s viditelnými nečistotami



Obr. 44 Lomová plocha v oblasti B s patrným stříhovým mechanismem

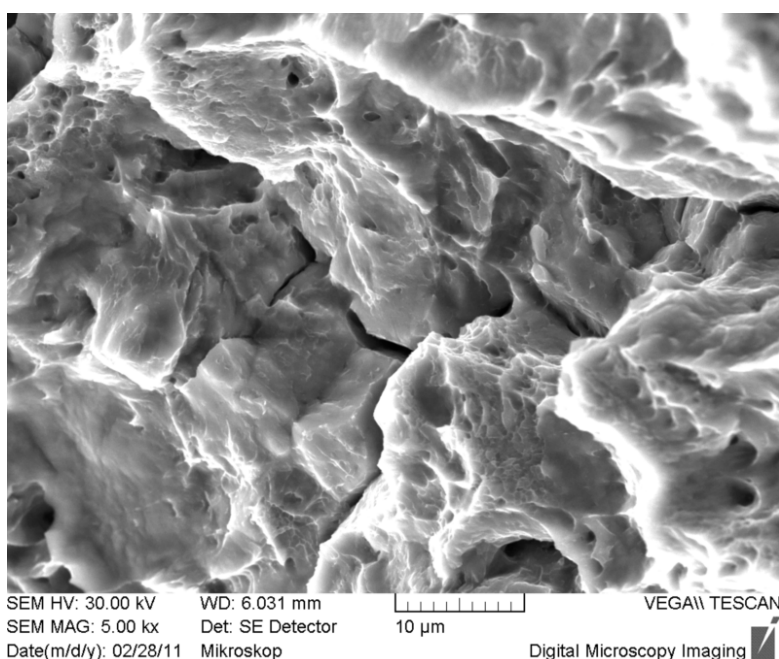
Lomová plocha vzorku STAT. BOD 2

Velmi zajímavým zjištěním u tohoto vzorku byl vznik dvou módů lomu v různých rovinách lomové plochy. Patrný rozdíl rovin je na následujícím obrázku.

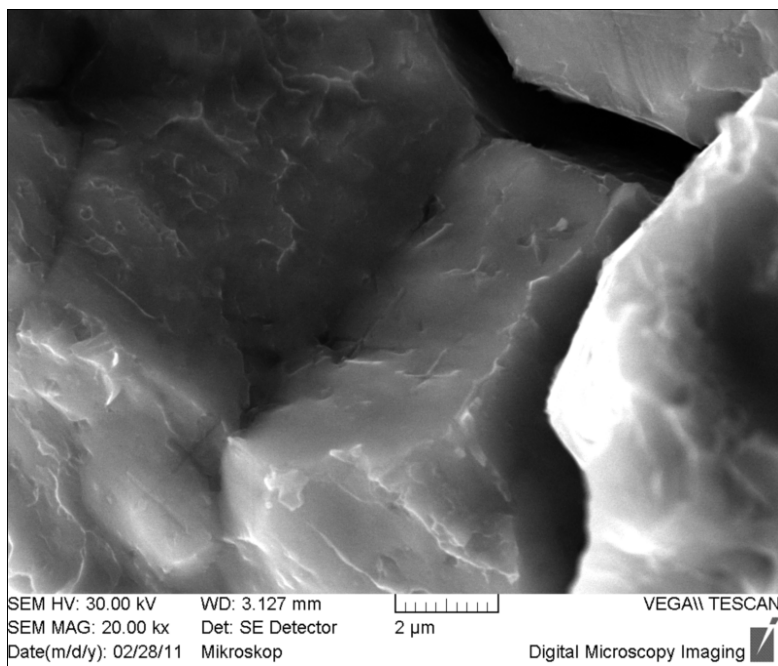


Obr. 45 Členitost lomové plochy

Včetně transkrystalického tvárného lomu zde byl odhalen štěpný interkrystalický lom, který se inicioval právě v jiné rovině, než je smykový lom. Štěpný lom kopíruje hranici zrn a jedná se tedy o jasnou vadu materiálu. Právě tento interkrystalický lom je dokladem toho, že se změna módu lomu odehrává skutečně v jiné rovině. Zřejmě došlo ke snížení kohézní pevnosti zrn. Identifikace zdroje tohoto lokálního poklesu jakosti materiálu přesahuje rozsah práce.



Obr. 46 Iniciace interkrystalického lomu



Obr. 47 Detail iniciace interkrystalického lomu

10 Možnosti hodnocení jakosti svarů podle stávajících norem

10.1 Nedestruktivní kontrolní metody

Kontrola svarů prohlídkou

Jako nejjednodušší a počáteční lze uvést kontrolu prohlídkou, při které zkušený defektoskopický pracovník již podle vzhledu povrchu jednotlivých vrstev svaru posuzuje jakost práce svářeče a bývá schopen předložit správné závěry o možnosti výskytu vnitřních vad. Vizuální hodnocení má následovat po každé dílčí části svařovací operace, jejíž provedení je spojeno s určitými těžkostmi.

Zkoušení svarů prozařováním

Hodnocení jakosti svarů prozařováním zajišťuje obor nedestruktivní kontroly technické radiografie. Využívá se metody, při které se vhodným detektorem obrazově vyhodnocuje přítomnost vnitřních materiálových vad, a to na základě vznikající diference zeslabení pronikavého záření, procházejícího kontrolovaným svarem. Pro dosažení požadované jakosti radiografického obrazu (ostrost, kontrast, rozlišitelnost detailů), se nejčastěji používá záznam na radiografický film, který je stále považován za nejprůkaznější detektor záření.

Zkoušení svarů ultrazvukem

V oblasti nedestruktivní kontroly svařovaných konstrukcí představuje ultrazvuková defektoskopie jednu z velkých skupin, která nabývá stále na významu a má před sebou perspektivu dalšího rozvoje. Ultrazvuková metoda pracuje výsledně s elektrickým signálem, což umožňuje získat požadované závěrečné kvantitativní vyhodnocení detekovaných vad. Základní rozdělení této zkušební metody můžeme provést na podkladě způsobu podání informace o vnitřním stavu materiálu.

Zkoušení magnetickou práškovou metodou

Vady na svarech typu povrchových trhlin jsou prozařovacími metodami jen podmíněně zjistitelné, přičemž výsledek je i při správně zvolené technice snímkování problematický. Proto se trhliny zjišťují především magnetickou práškovou metodou na

feromagnetických materiálech a metodami kapilárními na materiálech nemagnetických. Oba jmenované kontrolní způsoby jsou spolehlivější, zejména při odhalování povrchových necelistvostí.

Zkoušení metodou kapilární

Metoda kapilární umožňuje zjištění pouze těch necelistvostí, souvisejících s povrchem součásti, a je využitelná i pro zkoušení materiálů nemagnetických. Ve srovnání s magnetickými práškovými metodami jsou kapilární metody méně spolehlivé, protože jejich úspěšné použití předpokládá, že necelistvost je při povrchu otevřená.

Použitelnost defektoskopických metod

Žádná z uvedených nedestruktivních kontrolních metod není univerzální. Každý způsob defektoskopické kontroly má svoje určitá omezení, vyplývající z jeho fyzikální podstaty. Většinou nelze jedinou zkušební metodou zjistit jednoznačně všechny skryté vady, které bývají různého charakteru. Používá se proto účelné kombinace dostupným defektoskopických metod.

Kromě druhů vad rozhoduje o způsobu zkoušení materiál součásti, tvar, rozměry a složitost svařované konstrukce, dále přístupnost ke zkoušené oblasti a měřítko hospodárnosti. V případě nutnosti získání doplňujících informací o hodnocené struktuře svarů lze použít i některé další speciální obory defektoskopie, jako např. stereoradiografie, tomografie, ultrazvuková spektrometrie, defektoskopie vířivými proudy apod. [10]

10.2 Destruktivní kontrolní metody

- zkouška sekáčem,
- zkouška loupáním a odvíjením,
- stříhává zkouška,
- zkouška vrcholového tahu.

Hodnocení výsledků destrukčních zkoušek

Známka 1 = v pořádku

Známka 3 = ještě použitelné; prověřit proces

Známka 6 = oprava (pokud je přípustná) [8]

10.3 Možnosti hodnocení pomocí ITT (Impact Tensile Testing)

Jednou z perspektivních cest hodnocení materiálů je použití tahových dynamických zkoušek, metodicky vyvozených ze zkoušky rázem v ohybu podle Charpyho. Vhodná modifikace testovacího zařízení umožňuje sledování únosnosti materiálu v závislosti na rychlosti zatížení, rovněž otevírá možnosti testování různých vrubových účinků.

Zkouška rázem je užitečný nástroj k popisu materiálových vlastností jako funkce strukturních parametrů při evidenci zatěžovacích podmínek jako je např. teplota a rychlost zatěžování.

Zkouška přináší možnosti testování u dvou velice žádaných aplikací:

- Hodnocení různých spojovacích technologií, tj. svařování, pájení, lepení. Ve všech uvedených případech konstrukční uspořádání umožňuje provedení referenčního spoje podle odpovídajících norem. Aplikační možnosti výzkumu pevnosti těchto spojů v závislosti na rychlosti zatěžování, zejména směrem k automobilovému průmyslu, jsou tak velice široké, ale i k dalším odvětvím.
- Hodnocení vlivu vnitřní jakosti na dynamickou odolnost – vliv charakteristických vnitřních vad (plynové bubliny a mikrořediny), které nelze bezpečně eliminovat zavedenými nedestruktivními metodami testování. Standardně používané metody hodnocení dosažených pevnostních parametrů se opírají o výsledky statické tahové zkoušky, rázové zkoušky, popř. lomové houževnatosti (především statické). Výsledky tak nejenom korektně nevystihují reálnou jakost a únosnost, ale pro vyšší rychlosti zatížení představují pouze údaje na úrovni porovnávacího kritéria při volbě materiálu. [16]

Závěr

V práci byly ověřeny možnosti testování dynamické pevnosti bodových odporových svarů na modifikovaném Charpyho kladivu. V rámci experimentů byly zjištěny nejdůležitější vlivy na získané dynamické charakteristiky a problémy pro následující práce.

V rámci experimentální části diplomové práce bylo využito statických a dynamických zkoušek. Při těchto zkouškách byly vzorky z vysokopevné oceli zatíženy třemi různými rychlostmi zatěžování:

- 0,00033 m/s,
- 3,26 m/s,
- 5,16 m/s.

Vyhodnocením příslušných zkoušek byl zjištěn procentuální rozdíl únosnosti svarových spojů vlivem rychlosti jejich zatěžování. V rámci dynamických zkoušek se předpoklad vyšší únosnosti vlivem zvyšující se rychlosti zatěžování potvrdil. Rovněž byla ověřena vhodnost použití dynamické zkoušky.

Konečné hodnoty únosnosti (pevnosti) svarových spojů byly zejména ovlivněny jakostí svarové čočky, jejímž ukazatelem byl průběh lomu svarové čočky (horizontálně dělená či vytržená). Dalším faktorem, který sehrál roli ve výsledcích, byla i samotná velikost zkušebních vzorků. Poněvadž jsme byli limitováni rozměrem jednotlivých odebíraných vzorků ze vstupního materiálu, je konečný počet záznamů z provedených zkoušek nižší.

Rastrovací elektronovou mikroskopií byly analyzovány lomové plochy bodových odporových svarů. Nečistoty, dutiny a řediny uvnitř struktur lomových ploch měly za příčinu snížení únosnosti svarových spojů a tím způsobený rozptyl výsledných hodnot únosnosti v daných kategoriích rychlosti zatěžování.

Z rozborů získaných výsledků v rámci výchozích experimentů vyplývají jednotlivé vlivy:

1. Tvar testovaného průřezu.

Byl potvrzen vliv okolností rozvoje lomu iniciovaného ve středové části průřezu. Předpoklad je, že se zde uplatňuje i vliv kolize postupující trhliny s „tvarem volného povrchu“. Tento vliv je maximálně potlačen u kruhových vzorků; což je problematické právě pro testování svarových spojů, plochých polotovarů, především plechů apod.

V rámci této práce testovaný průřez představoval průřez svarové čočky, tj. jednalo se o specifické podmínky, kde výše uvedený problém není zásadní.

2. Nutnost maximálně omezit rozvoj deformace mimo testovaný průřez.

Jedná se o stěžejní problém rovněž u standardních zkoušek rázem v ohybu, kde je situace navíc komplikovaná tím, že se zvyšující se houževnatostí (a plasticitou) materiálu se zvětšuje objem deformovaného materiálu, tj. nelze hodnoty vztahovat na průřez pod vrubem.

V daném případě je tento problém zásadní, protože odběr vzorků limitoval možnosti úpravy testovaného profilu. Tím nebylo možno zcela zamezit deformaci mimo testovaný průřez.

Pro zamezení této deformace by se vyžadovalo zvětšení vzorků. Vyjádřit tento vliv je možné pouze evidencí celkové spotřebované energie a evidencí deformace vzorku bez vlivu na pevnost.

3. Dynamické působení celé soustavy, především upínací soustavy.

Problém přesahuje zadání práce, jelikož vyžaduje celkovou analýzu soustavy. U daného uspořádání lze navrhnout vymezení vůlí zavedením předpětí před zatížením do lomu.

Použitá literatura

1. Abbashian R., Abbashian L., Reed-Hill R.E.: Physical Metallurgy Principles, Stamford, USA, 2010, ISBN: 978-0-495-43851-9
2. Janovec, J., Macek, K., Zuna, P.: Fyzikální metalurgie. ČVUT, Fakulta strojní, Praha, 2004. ISBN: 80-01-02935-2
3. Žídek, M.: Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena, Praha 1995, ALEKO, ISBN: 80-85341-45-X
4. Koutský, J., Jandoš, F., Karel, V.: Lomy ocelových částí, Praha 1976, SNTL
5. Puškár, A.: Mikroplastickosť a porušenie kovových materiálov, Bratislava 1986, VEDA
6. Puškár, A., Hazlinger, M.: Porušovanie a lomy súčastí, Žilinská univerzita, 2000, ISBN: 80-7100-654-8
7. Zrník, J., Kraus, L., Prnka, T., Šperlink, K.: Příprava ultrajemnozrných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti [online databáze]. Evropská strategie výrobních procesů, červen 2007, ISBN: 978-80-7329-153-2, [cit. 2011-5-16]. Dostupná z WWW: <http://www.nanotechnologie.cz/storage/strategie4.pdf>
8. Hylský, J.: Vliv svarového cyklu na pevnost materiálů pro výztuže karoserií osobních vozů. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Pardubice 2009. Bakalářská práce
9. Peterka, J.: Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství, Praha 1980, SNTL
10. Kuncipál, J.: Teorie svařování, SNTL, 1986
11. Schmidová, E; Švanda, P.: Efekty překrytí odporových svarových spojů. In: sborník TechMat '08, s. 83-89, Svitavy, ČR, 2008. ISBN: 978-80-7395-136-8.
12. ČSN 05 0005 Zváranie. Chyby zvarových spojov: Základné pojmy. 1969

13. Konečný, M.: Parametry jakosti svařování vysokopevnostních materiálů při stavbě automobilu. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Pardubice 2009. Diplomová práce
14. DIN EN 10149-2, Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen-Allgemeine Lieferbedingungen, ©WOLKSWAGEN AG, November 1995
15. DIN EN 10149-2, Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen-Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle, ©WOLKSWAGEN AG, November 1995
16. Tomanovič, J., Schmidová, E.: Testování dynamické odolnosti hliníkové slitiny v tahu, International conference of technology knowladge and information '10, Ústí nad Labem, 2010
17. ČSN EN 10002-1 Kovové materiály: Zkouška tahem. Listopad 1994

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Schéma pro ilustraci křehkého lomu | 12 |
| Obr. 2 Schéma pro ilustraci tvárného lomu | 13 |
| Obr. 3 Podíly různých druhů ocelí v karoserii automobilu Porsche Cayenne..... | 16 |
| Obr. 4 Závislost meze pevnosti na prodloužení vybraných druhů ocelí | 17 |
| Obr. 5 B-sloupek vozu Škoda Octavia | 27 |
| Obr. 6 Rozměr odebíraného vzorku | 28 |
| Obr. 7 Možná místa odběru vzorků | 28 |
| Obr. 8 Pomocný přípravek při svařování | 29 |
| Obr. 9 Svařované dvojice kusů..... | 30 |
| Obr. 10 Pneumatická bodová svářečka BP 20.12..... | 30 |
| Obr. 11 Detail svařovacích elektrod | 30 |
| Obr. 12 Schematické znázornění bodového svaru..... | 31 |
| Obr. 13 Parametry vyhotoveného bodového svaru | 31 |
| Obr. 14 Zkušební stav pro tahovou dynamickou zkoušku | 32 |
| Obr. 15 Stupnice zkušebního stavu | 32 |
| Obr. 16 Deformační člen a jezdec | 33 |
| Obr. 17 Druhy ověřovacích vzorků | 33 |
| Obr. 18 Záznam vzorku vk24 | 34 |
| Obr. 19 Záznam vzorku vk25 | 36 |
| Obr. 20 Záznam vzorku vk27 | 36 |
| Obr. 21 Záznam vzorku 5 – rychlost zatížení 5,16 m/s (vytržená čočka) | 39 |
| Obr. 22 Záznam vzorku 18 – rychlost zatížení 3,26 m/s (horizontální lom)..... | 39 |
| Obr. 23 Neporušený zkušební vzorek před dynamickou tahovou zkouškou | 40 |
| Obr. 24 Zkušební vzorek po dynamické tahové zkoušce zničen v oku..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Obr. 25 Detail otisku svařovacích elektrod | 40 |
| Obr. 26 Průběh statické zkoušky vzorku STAT. BOD 2..... | 42 |
| Obr. 27 Průběhy lomů svarových čoček..... | 42 |
| Obr. 28 Rozdělení lomové plochy čočky | 44 |
| Obr. 29 Struktura lomové plochy A vzorku BSN 00 | 45 |
| Obr. 30 Detail nečistoty ve struktuře lomové plochy | 45 |
| Obr. 31 Výsledky chemické mikroanalýzy oxi-sulfidického vměstku..... | 46 |
| Obr. 32 Struktura lomové plochy B vzorku BSN 00..... | 47 |
| Obr. 33 Dutiny v oblasti B | 47 |
| Obr. 34 Rozhraní dutiny a lomové plochy | 48 |
| Obr. 35 Trhliny a dutina na lomové ploše v oblasti B..... | 48 |
| Obr. 36 Výskyt ředin | 49 |
| Obr. 37 Neměnnost tvárného lomu v oblasti kolem trhliny | 49 |
| Obr. 38 Souběžná iniciace | 50 |
| Obr. 39 Dutina v lomové ploše..... | 51 |
| Obr. 40 Tvárný lom staticky zatíženého vzorku STAT. BOD 1 | 51 |
| Obr. 41 TOO staticky zatíženého vzorku STAT. BOD 1..... | 52 |
| Obr. 42 Dutiny s rozevřenými ředinami | 52 |
| Obr. 43 Detail lomové plochy v oblasti A s viditelnými nečistotami | 53 |
| Obr. 44 Lomová plocha v oblasti B s patrným stříhovým mechanismem | 53 |
| Obr. 45 Členitost lomové plochy..... | 54 |
| Obr. 46 Iniciace interkrystalického lomu | 54 |
| Obr. 47 Detail iniciace interkrystalického lomu..... | 55 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 - Průběh ověřování metodiky | 35 |
| Tab. 2 - Výsledky výchozí dynamické zkoušky..... | 37 |
| Tab. 3 - Výsledky hlavního experimentu | 38 |
| Tab. 4 - Výsledky statické tahové zkoušky | 41 |
| Tab. 5 - Porovnání únosnosti dle rychlosti zatěžování..... | 42 |