

Nahradzovanie bodových zvarov pozinkovaných častí lepením

**The replacement of welds of zinc-coated elements by
adhesive bonding**

Peter Hvizda

Diplomová práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Vložit oficiální zadání diplomové práce

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. A. Poláškov, CSc. za odborné vedenie, pomoc, rady a pripomienky pri vypracovávaní tejto diplomovej práce a spracovávaní výsledkov. Ďalej by som chcel poďakovať firme AVEX Trade, spol. s r.o. za poskytnutie vzoriek, firme HANÁK – Lepidlá & Tmely za poskytnutie lepidiel a Ing. M. Žaludkovi za pomoc pri uskutočnení skúšok.

Táto diplomová práca s názvom Nahradzovanie bodových zvarov pozinkovaných častí lepením bola vypracovaná na Ústave fyziky a materiálového inžinierstva fakulty technologickej Univerzity Tomáše Bati v Zlíne za pomoci finančného zabezpečenia tejto inštitúcie. Je preto jej majetkom a akékoľvek údaje v tejto diplomovej práci môžu byť využité literárne, technicky a technologicky len po spoločnom súhlase riaditeľa uvedeného ústavu a vedúceho diplomovej práce. V prípade publikovanie výsledkov v odborných časopisoch budem uvedený ako spoluautor.

Prehlasujem, že som na celej diplomovej práci pracoval samostatne a použitú literatúru som citoval.

V Zlíne, 25. 05. 2005

.....

podpis diplomanta

RESUMÉ

V dnešnej dobe existuje množstvo spôsobov spájania konštrukčných materiálov a je len otázkou aplikácie, kde má byť daný spoj použitý a konštruktéra, aby zvolil ten najvhodnejší spôsob spájania. K tomu, aby sa správne rozhodol, musí zohľadniť množstvo faktorov, finančnú a energetickú náročnosť, ale aj nároky na personál a pod.

Táto diplomová práca sa snaží riešiť možnosť nahradenia zváraných spojov u pozinkovaných plechov lepením. Podnet k riešeniu tohto problému vychádza z praktickej aplikácie bodových zvarov na pozinkovanom plechu, kde dochádza k poškodeniu vrstvy zinku, čo má negatívny vplyv na životnosť daného spoja. Práve použitím vhodného lepidla sa tomu dá vyhnúť. Porovnávali sme spoje lepené a spoje zvárané bodovými zvarmi z hľadiska ich pevnosti. Na dané vzorky boli aplikované zaťažovacie skúšky. Analýzou výsledkov týchto skúšok a aplikáciou MKP by sme mali dôjsť k potrebným záverom.

There are many ways of bonding structural materials these days and it is only a question of the application or the constructor to choose the best way of bonding. There have to be many factors considered to make the right decision.

This thesis is trying to deal with the ability of replacing the welding bonds with the adhesive bonding of zinc-coated plates. The reason of writing this thesis is to avoid the risk of damaging the plate zinc-coating, that decreases the durability of bonding. This risk can be avoided by using the accurate adhesive. We confronted the welding bonds with the adhesive bonding of zinc-coated plates from aspect theirs strongholds. On samples were applied stress test. Analysis of results of these tests and apalication of FEM (finite element method) were obtained results.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÁ ČASŤ.....	9
1.1 ZÁKLADNÉ POJMY Z TEÓRIE ADHÉZIE A LEPENIA	9
1.2 TEÓRIA ADHÉZIE	11
1.3 ZÁKLADNÉ DELENIE LEPIDIEL	11
1.4 TECHNOLOGICKÉ ZÁSADY PRE LEPENÉ SPOJE	12
1.5 LEPENIE KOVOV	13
1.6 PRÍPRAVA MATERIÁLOV NA LEPENIE	15
1.6.1 Konštrukčné usporiadanie spoja	15
1.6.2 Predbežné úpravy povrchu	15
1.6.3 Nanášanie lepidiel	16
1.6.4 Vznik spoja.....	17
1.7 PEVNOSŤ LEPENÝCH SPOJOV	17
1.7.1 Faktory ovplyvňujúce pevnosť lepeného spoja	18
1.8 VÝPOČET LEPENÝCH SPOJOV	20
1.8.1 Ťahové namáhanie.....	20
1.8.2 Šmykové namáhanie.....	21
1.9 SKÚŠKY LEPENÝCH SPOJOV	22
1.9.1 Skúšky lepených spojov pre materiálové listy	22
1.10 ZVÁRANIE	24
1.11 METÓDY ZVÁRANIA S POUŽITÍM TLAKU	24
1.11.1 Odporové zváranie.....	24
1.11.2 Trecie zváranie	28
1.11.3 Difúzne zváranie.....	28
1.11.4 Zváranie explóziou	28
1.12 METÓDY TAVNÉHO ZVÁRANIA	29
1.13 METALURGICKÉ REAKCIE PRI ZVÁRANÍ.....	30
1.13.1 Reakcie roztaveného kovu s kyslíkom	30
1.13.2 Reakcie roztaveného kovu s dusíkom	31
1.13.3 Reakcie roztaveného kovu s vodíkom	32
1.14 VADY ZVAROV	32
1.15 SKÚŠKY ZVAROV	32
1.16 ĎALŠIE TYPY SPOJOV	33
1.16.1 Pájkované spoje.....	33
1.16.2 Nitované spoje.....	34
1.16.3 Skrutkované spoje	34
1.16.4 Spoje kolíkmi a čapmi	35
1.17 ŽIAROVÉ POZINKOVANIE	35
1.17.1 Výhody žiarového pozinkovania	36
1.17.2 Nevýhody žiarového pozinkovania	37
1.17.3 Zváranie pozinkovaných plechov	37
2 STANOVENIE CIEĽOV DIPLOMOVEJ PRÁCE	39
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ.....	40
3.1 SKÚŠKY BODOVÝCH ZVAROV	40
3.2 SKÚŠKY LEPENÝCH SPOJOV	40
3.2.1 Použité lepidlá.....	41
3.3 POPIS METODIKY	42
3.4 POPIS ZHOTOVENIA VZORIEK	43
3.5 POPIS ŠMYKOVEJ ŤAHOVEJ SKÚŠKY	43
3.6 SPÔSOB VYHODNOTENIA ŠMYKOVEJ ŤAHOVEJ SKÚŠKY	44

3.7	NAMERANÉ HODNOTY	45
3.8	TRHACIE KRIVKY JEDNOTLIVÝCH SPOJOV	47
3.9	APLIKÁCIA METÓDY KONEČNÝCH PRVKOV (MKP) PRE RIEŠENIE NAPÄTOSTI LEPENÉHO SPOJA	54
3.9.1	Teoretický úvod	54
4	DISKUSIA VÝSLEDKOV	67
	ZÁVER	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK	80

ÚVOD

Vývoj ľudského myslenia a spoločnosti už odpradáva viedol človeka k tomu, aby sa snažil uľahčovať si život. Výroba primitívnych nástrojov, ktoré sa využívali k lovu, k obrábaniu pôdy a k ostatným činnostiam nevyhnutným pre život sa stávala samozrejmosťou a v neposlednom rade aj nevyhnutnosťou. Väčšina týchto nástrojov bola najprv vyrábaná ako celok. Človek si ale uvedomoval, že kombináciou rôznych materiálov dokáže vyrobiť dokonalejšie nástroje a častokrát s menším úsilím. K spájaniu materiálov sa používali rôzne „povrázky“, ktoré sa vyrábali z rastlín alebo kože a tiež rôzne kliny z dreva, kameňa a neskôr aj z kovu. Človek si začal všímať aj lepivosť niektorých látok. A práve z týchto spôsobov spájania sa vyvinulo dnešné nitovanie, pájkovanie, skrutkovanie, lepenie a pod.

Počiatky lepenia siahajú až do doby kamennej. Nešlo o lepenie, aké poznáme v súčasnosti, ale o spájanie rozličných materiálov za určitým účelom. Prírodné živice zo stromov a rastlín, hlina, niektoré bitúmeny a vosky boli prvými adhezívami – spojivami. Neskôr človek zistil, že krv, vajcia, niektoré druhy rozžúvanej potravy a zvyšky mlieka či syrov, rozvarené ryby, kosti, chrupky a rozdrvený hmyz sú taktiež lepkavé a teda sa taktiež dajú použiť na spájanie rozličných materiálov. Prvými tavnými lepidlami boli prírodný asfalt a roztavená živica ihličnatých stromov.

Podľa rozličných prameňov sa objavujú dôkazy o uvedomelom lepení staré okolo 6000 rokov. Prvé správy o priemyselnej výrobe lepidiel však pochádzajú až zo 17. storočia nášho letopočtu. Väčšinou sa používali lepidlá živočíšneho pôvodu.

Významným medzníkom vývoja lepidiel a aj lepenia je objav nitrácie celulózy v polovici 19. storočia. S tým súvisí začiatok priemyselného využívania syntetických lepidiel.

Prakticky až do druhej svetovej vojny boli lepené len materiály, ktoré boli schopné vsiaknuť lepidlo – drevo, koža, textil a papier. Toto obdobie sa teda dalo charakterizovať, pokiaľ neuvažujeme lepenie dreva a fólie, použiteľnosťou lepenia predovšetkým v spotrebnom priemysle.

V druhej polovici minulého storočia sa teória aj technológia lepenia výrazne zdokonalila. S tým súvisí aj vývoj meracích a skúšobných prístrojov a metód, od

jednoduchých trhacích a odlupovacích skúšok až po nedeštruktívne metódy stanovenia statickej i dynamickej pevnosti spoja.

Je známe, že lepenie má mnoho výhod v porovnaní s klasickými metódami spájania materiálov, ako je nitovanie, skrutkovanie alebo zváranie. Lepiť možno veľké aj malé plochy, veľmi tenké fólie kovov alebo plastov, spoje sú pritom nepriepustné pre kvapaliny, prípadne pre plyny (podľa použitého typu lepidla). Lepením sa navyše neznižuje pevnosť vlastného materiálu v mieste spoja ako napr. pri vŕtaní otvorov na nitovanie a pod. Veľmi dôležité je aj to, že technológia spájania lepením je často efektívnejšia a ekonomicky výhodnejšia. Hlavne pri výrobe vo veľkých sériách sú rozhodujúce celkové náklady (materiál, energia, zariadenia, kvalifikácia pracovníkov, veľkosť série a pod.). Ich porovnaním vychádza lepenie častokrát ekonomickejšie ako klasické spôsoby spojovania.

Napriek veľkým výhodám lepenia je potrebné vykonať laboratórne skúšky s každým novým lepidlom a dokonale overiť jeho vlastnosti, prípadne vlastnosti lepeného spoja (1, 2, 3).

V minulosti sa lepenie používalo hlavne tam, kde na pevnosť spoja neboli kladené vysoké požiadavky (papier, textil, drevo, atď.). V súčasnosti sú ale lepidlá na takej úrovni, že umožňujú vytvárať aj veľmi pevné spoje. Tieto lepidlá sa používajú v automobilovom, leteckom a kozmickom priemysle, ale aj v iných oblastiach priemyslu - hlavne strojárenského.

1 TEORETICKÁ ČASŤ

1.1 Základné pojmy z teórie adhézie a lepenia

Adhézia ako jav sa až do obdobia posledných štyroch desaťročí posudzovala hlavne z materiálového hľadiska a len sporadicky sa objavovali pokusy o hodnotenie z hľadiska fenomenologického. Terminológia v oblasti adhézie vzhľadom na zložitosť tohto javu a rôznorodosť poznatkov nie je doposiaľ presne stanovená.

V r. 1969 bola v bývalej ČSSR po prvý raz vypracovaná a 11. 2. 1970 schválená norma, ktorá upravuje základné názvoslovie a symboly v oblasti lepenia (ČSN 66 8501).

Terminológia v tejto oblasti je však natoľko široká, že daná norma ju nemôže zahrnúť a navyše bežná prax a odborné publikácie denne prinášajú nové termíny a pojmy.

Najdôležitejšie termíny:

Adherend – časť lepeného spoja, resp. materiál, na ktorý sa nanáša adhezívum a ktorý vytvára s iným alebo rovnakým materiálom spoj pôsobením adhézie. Nazýva sa aj substrát, ale podľa ČSN 66 8501 je to menej vhodné.

Adhézia – ČSN definuje tento jav ako vzájomné priťahovanie dvoch povrchov adhezívnymi silami. Tento pojem sa v jednotlivých technológiách a odvetviach používa odlišne.

Autoadhézia - prípad adhézie, keď adhezívum a adherend majú rovnakú chemickú a molekulovú štruktúru. Vyskytuje sa aj v tvare autohézia.

Adhezívum – materiál, ktorý je schopný držať pri sebe povrchy tuhých látok adhezívnymi a kohezívnymi silami, tiež lepidlo.

- súčasť náterových, zalievacích a ďalších zmesí a hmôt, ktorým udeľuje adhezívne vlastnosti.

Abhezívum – materiál, ktorý odoláva adhézii, resp. odpudzuje lepidlo. Nazýva sa aj separátor. Používa sa k tvorbe vrstiev s cieľom zabrániť zlepeniu, zvareniu a pod.

Adhezívny spoj – spoj dvoch povrchov silami adhézie. Nazýva sa tiež pravý spoj. Jeho teoretická pevnosť vypočítaná na základe veľkosti medzimolekulových síl je väčšia ako pevnosť reálneho spoja.

Adhezívny základ – polymérna filmotvorná zložka (alebo viac zložiek) lepidla, ktorá je nositeľom adhézie a kohézie lepidla – charakterizuje jeho vlastnosti a chemické zloženie.

Kohézia – označuje sa aj ako vnútorná adhézia a je to stav, v ktorom častice látky pôsobením medzimolekulových síl držia pokope. Veľkosť kohézie udáva kohézna energia (energia potrebná k oddeleniu častice od ostatných).

Lepená plocha – plocha obidvoch adherendov, ktorá je určená k zlepeniu.

Lepenie – proces spájania adherendov prostredníctvom adhezív (lepidiel), pri ktorom sa využívajú adhezívne sily medzi adherendom a lepidlom a kohézia lepidla.

Lepený spoj – sústava dvoch adherendov spojených adhezívom. Adhezívnu vrstvu môže tvoriť viacvrstvový systém jedného alebo viacerých adhezív.

Lepidlo - prostriedok na adhezívne spojenie, zlepenie dvoch adherendov. Môže byť jednozložkové aj viaczložkové, ale vždy obsahuje adhezívny základ a často aj rozličné rozpúšťadla a prísady.

- je to materiál schopný držať pri sebe povrchy tuhých látok adhezívnymi a kohezívnymi silami (VZLÚ, ČSN 66 8501).

Montážna doba – časový interval medzi nanesením lepidla na adherend a zostavením spoja z určených dielov do vytvrdzovacieho prípravku. Začína sa v okamihu začatia nanášania a končí sa uzavretím prípravku (1, 4, 5).

1.2 Teória adhézie

Existuje niekoľko teórii adhézie, ale žiadna z nich nie je univerzálna. Charakter adhezívnych síl a pevnosť lepeného spoja nejde vysvetliť jedným typom väzby. Na fázovom rozhraní sa uplatňuje niekoľko druhov interakcií. Je treba konštatovať, že pri adhézii ide vždy o medzimolekulové interakcie, ktoré majú charakter heterogénnej reakcie na medzimolekulovom rozhraní. Podľa charakteru interagujúcich zložiek sa uplatňujú všetky známe väzbové sily, nekovalentné aj kovalentné väzby.

Medzi staršie teórie patria mechanická, chemická, polarizačná, difúzna a elektrostatická. Najnovšou teóriou adhézie je termodynamická, ktorá vysvetľuje adhéziu z hľadiska termodynamiky.

Molekuly tvoriace povrch majú určitú voľnú energiu, ktorá podmieňuje medzimolekulové interakcie na fázovom rozhraní a nazýva sa povrchová energia. Celková povrchová energia sa skladá z voľnej povrchovej energie a teploty tvorby povrchu. Pri prechode molekuly z objemu na povrch je potrebné prekonať súdržnosť molekúl (kohéziu), teda vykonať prácu.

Adhéziou lepidiel rozumieme vzájomné pôsobenie kvapalnej a tuhej fázy na ich fázovom rozhraní. Veľkosť vzájomného pôsobenia môžeme určiť pomocou sily, ktorá je potrebná na odtrhnutie kvapaliny z tuhého povrchu.

Ak má kvapalina pevnú látku zmáčať, čo je jednou zo základných podmienok adhézie, musí byť jej povrchové napätie menšie ako povrchové napätie podkladu.

Stupeň zmáčania závisí na pomere povrchových napätí v systéme rozhraní, Výsledný uhol zmáčania je rovný:

$$\cos\Theta = (\gamma_s - \gamma_{ls}) / \gamma_l \quad (1)$$

Výraz $\gamma_s - \gamma_{ls}$ označujeme ako zmáčaciu prácu a je číselne rovný práci potrebnej k jednotkovej zmene plochy fázového rozhrania (4).

1.3 Základné delenie lepidiel

Klasifikácia lepidiel je veľmi zložitá, pretože existuje veľmi veľa spôsobov ich delenia. Žiadny z nich však nie je dostatočný. Väčšina z nich sa obmedzuje na jedno alebo dve základné kritéria, takže nové typy lepidiel sa ťažko zaraďujú.

Najznámejšie klasifikačné systémy lepidiel:

- podľa chemického zloženia
- podľa druhu väzby
- podľa nosného média
- podľa formy a fyzikálneho stavu
- podľa tekutosti
- podľa spôsobu vytvrdzovania, tvorby väzby
- podľa lepivosti, odolnosti, reaktívnosti
- podľa použitia, atď.

Najpoužívanším rozdelením je delenie podľa chemického zloženia a to na prírodné a syntetické. Syntetické sa ďalej delia na plastoméne, duroméne a elastoméne. Druhým veľmi rozšíreným spôsobom delenia je delenie podľa spôsobu tvorby väzby.

Jedným zo spôsobov je rozdelenie podľa spôsobu vytvárania lepeného spoja. Roztokové alebo disperzné lepidlá vytvárajú spoj vsiaknutím alebo odparením rozpúšťadla. U lepidiel citlivých na tlak (napr. lepiace pásy) vzniká spoj po pritlačení. Po zatuhnutí lepidla vzniká spoj u tavných lepidiel. Pre strojárenskú prax sú najdôležitejšie lepidlá vytvrdzujúce chemickou reakciou.

Podľa teploty vytvrdzujúcej reakcie sa používa delenie na lepidlá studené (vytvrdzujú do 20 °C), teplé (vytvrdzujú v rozmedzí 21 až 144 °C) a horúce (vytvrdzujú nad teplotou 145 °C).

Podľa tlaku vytvrdzujúcich reakcií rozlišujeme lepidlá beztlakové, ktoré vytvrdzujú do pretlaku 0,3 MPa a tlakové lepidlá vytvrdzujúce pri tlaku nad 0,3 MPa.

Podľa počtu zložiek rozlišujeme lepidlá jednozložkové, dvojzložkové a viaczložkové. Technologicky veľmi výhodné sú jednozložkové. Používajú sa vo forme pasty, roztoku, prášku, tyčinky alebo lepiacej fólie. Najrozšírenejšou skupinou sú ale dvojzložkové a viaczložkové lepidlá (1, 2, 5, 6).

1.4 Technologické zásady pre lepené spoje

Lepený spoj dosiahne optimálne vlastnosti pri dodržaní nasledujúcich zásad:

- lepený spoj musí byť navrhnutý tak, aby nebol namáhaný odlupovaním
- pred použitím lepidla je potrebné preštudovať návod

- u viaczložkových lepidiel je potrebné dodržiavať predpísaný zmiešavací pomer a poradie vmiešavania jednotlivých zložiek; predávkovanie tvrdidlom pevnosť spoja zhoršuje
- je nutné dodržiavať parametre vytvrdzovania, tj. teplotu, tlak a čas
- venovať zvýšenú pozornosť úprave lepených plôch – závisí na tom 90% pevnosti spoja
- výber lepidla sa riadi hlavne druhom lepeného materiálu a podľa požadovanej pevnosti spoja
- porušenie lepeného spoja svedčí o nedokonalnej úprave povrchu pred lepením, kohézna porucha môže byť vyvolaná aj nevhodným výberom lepidla, zlým vytvrdením, nevhodnou konštrukciou a pod.
- bez náležitého vybavenia prevádzky lepenia nejde dosiahnuť maxima pevnostných a ekonomických výhod lepenia

1.5 Lepenie kovov

Lepením kovov sa môžu odľahčiť konštrukčné zostavy, keďže v podstate minimálna hrúbka dielcov nie je limitovaná. Lepenie kovov umožnilo aj výrobu nových konštrukčných materiálov, napr. sendvičových vrstvených konštrukcií, ktoré majú obrovský význam v odvetviach, kde sa vyžaduje nízka hmotnosť a vysoké hodnoty pevnosti pri statickom aj dynamickom namáhaní (kozmetický, letecký priemysel, atď.). Lepenie kovov umožnilo aj výrobu plošných viacvrstvých spojov, ktoré sú dôležitým prvkom prístrojovej miniaturizácie v slaboprúdovej technike. Veľkou prednosťou technológie lepenia je, že vylučuje vznik elektrolytickej korózie medzi dvoma rôznymi kovmi a súčasne tlmí chvenie konštrukcie. Technológia lepenia obvykle výrazne znižuje náklady času potrebného k vytvoreniu spoja a často je lepenie aj ekonomickejšie.

K nevýhodám patrí náročná úprava stykových plôch, náchylnosť spoja k tečeniu (krípu) pri dlhodobom namáhaní pri zvýšenej teplote a použiteľnosť obmedzená na dielce, ktoré majú rovnaké stykové plochy.

Lepením by sa mali riešiť hlavne tie prípady, ktoré sa nedajú riešiť inými spôsobmi spojovania. Za určitých podmienok je ale tiež možné nahradiť lepením doposiaľ používané tradičné spôsoby spájania kovov, ako sú zaváranie, spájkovanie alebo nitovanie. Tieto nahradenia samozrejme nemôžeme aplikovať vždy, ale je potrebné s touto možnosťou počítať.

Pri spojovaní dvoch kovových dielcov ide o súbor dvoch úplne nepriepustných plôch. Preto môžeme použiť len také lepidlá a metódy lepenia, ktoré zaručujú, že sa v priebehu tuhnutia lepidla v spoji neuvoľní žiadne alebo len celkom nevýznamné množstvo rozpúšťadiel a vedľajších splodín (1, 6, 7).

Výhody lepených konštrukcií:

- kontinuálne a rovnomerné prenášanie napätia
- zosilnenie konštrukcie v mieste spoja (nitovanie a zváranie spôsobuje zoslabenie)
- veľká tesnosť spoja
- zvýšená odolnosť voči korózií (netvorí galvanické články ani iné podmienky korózie)
- možnosť spájať rôzne materiály (aj také, ktoré sa nedajú zväzať alebo nitovať)
- možnosť spájať veľmi tenké materiály (možnosť miniaturizácie)
- možnosť lepenia veľkých plôch
- hladké vonkajšie plochy
- tlmenie vibrácií a chvenia
- zníženie hmotnosti konštrukcie
- spravidla ekonomickejší proces
- možnosť použitia v teréne bez nárokov na energiu

Nevýhody lepenia:

- citlivosť na nárazy, vysoké teploty a niektoré vplyvy prostredia
- malá odolnosť proti odlupovaniu (porušovanie spoja od okraja lepenia)
- lepený spoj nedáva ďalšiu možnosť úpravy
- vo väčšine prípadov nutnosť úpravy plôch pred lepením
- časté použitie drahých vytvrdzovacích prípravkov a dlhé doby vytvrdzovania
- náchylnosť ku krípu
- citlivosť na dodržanie technologických postupov (1, 2, 5)

Pri používaní moderných lepidiel sa radu týchto nedostatkov už podarilo úspešne eliminovať.

1.6 Příprava materiálů na lepení

Přípravné práce spojené s lepením kovů můžeme rozdělit na konstrukčné uspořádání spojovaného místa a na vlastní povrchovou úpravu.

1.6.1 Konstrukčné uspořádanie spoja

Skúsenosti získané z praxe tradičných kovových konštrukcií nemôžu byť vždy jednoznačne prenesené na technológiu lepenia kovov. Rozdiel spočíva v tom, že lepený spoj musí byť vždy usporiadaný ako plošný. Je potrebné rešpektovať predovšetkým rovnomerné namáhanie spojovaných dielov a vylúčenie síl namáhajúcich spoj pri odlupovaní. Ak tomuto vplyvu nie je možné zamedziť, je potrebné spoj proti odlupovaniu zaistiť, napr. kombináciou klasických postupov, tj. skrutkovaním, nitovaním alebo zváraním, s lepením (7).

1.6.2 Predbežné úpravy povrchu

Pevnosť lepeného spoja závisí od adhézných pomerov na rozhraní povrchov substrát – lepidlo. Rozhodujúcim faktorom je tu zmáčanlivosť substrátu lepidlom. Cieľom úpravy povrchu pred lepením je dosiahnutie maximálnej možnej zmáčanlivosti vybraným lepidlom. Tým sa utvárajú čo najlepšie podmienky pre dotyk lepidla s povrchom adherendu a vznikajú predpoklady pre vznik adhezívnych väzieb. Čím väčšia časť plochy lepeného spoja sa zúčastňuje na vytváraní týchto väzieb a čím väčší je počet väzieb, tým vyššia je pevnosť spoja.

Povrchová úprava kovov je teda z hľadiska výsledkov lepenia nevyhnutná. Je dôležité aby na povrchu nezostali žiadne látky, vrstvy a nerovnosti, ktoré by zhoršovali priľnutie lepiacej vrstvy. Okrem toho sa majú získať vhodné fyzikálno-chemické vlastnosti povrchu, čo sa v praxi dosahuje fyzikálnymi a chemickými operáciami:

1. Fyzikálne operácie:

- a) mechanické (brúsenie, frézovanie, šmirgľovanie, obrábanie, a pod.)
- b) iné fyzikálne operácie (ožarovanie, ultrazvukové čistenie, polarizácia oxidačným plameňom, vysušenie)

2. Chemické operácie:

- odmasťovanie (v parách, v kúpeli, a pod.)

- morenie
- fosfatizácia, a pod.

Odmasťovanie nasleduje vždy po mechanických úpravách povrchu. K tomu sa používajú organické rozpúšťadla, hlavne acetón, trichloretylén alebo tetrachlormetán.

Na rozdiel od chemického čistenia nastávajú pri morení hmotnostné a rozmerové zmeny a zmeny mikroskopickej štruktúry povrchu. Pri morení sa zvyšuje voľná povrchová energia, a to vytvorením vrstvy, ktorej zloženie je výsledkom reakcie adherendu s moridlom. Morenie je teda najdôležitejším spôsobom úpravy povrchu z hľadiska zvýšenia adhézie. Výsledkom morenia sú tri efekty:

1. Odstránenie zvyšku mastnôt, ktoré mohli priľnúť na povrchu.
2. Odstránenie vrstvy oxidov, ktoré vznikli oxidáciou a vytvorenie aktívnych centier s vysoko polárnymi koncovými skupinami.
3. Veľmi jemné a rovnomerné zdrsnenie povrchu, ktoré vzniká leptacím účinkom moridla.

Princípom fosfátovania je vytvorenie jemnej pórovitej vrstvičky nerozpustných fosfátov na povrchu kovov pôsobením chemických prostriedkov obsahujúcich $\text{Zn}(\text{H}_2\text{SO}_4)_2$ a kyselinu fosforečnú. Jej význam spočíva najmä v predĺžení životnosti spoja, ktorý je oveľa odolnejší proti korózii (1, 2).

1.6.3 Nanášanie lepidiel

Nanášaním treba dosiahnuť súvislú a rovnomernú vrstvu lepidla určitej hrúbky. Vo väčšine prípadov sa lepidlo nanáša na obidve lepené časti. Výnimku tvoria vysokotekuté lepidlá, ktoré sa nanášajú len na jednu z lepených častí.

Spôsoby nanášania možno rozdeliť na štyri hlavné skupiny:

- a) *ručné nanášanie* (štetec, tyčinka, špachtľa, ...)
- b) *nanášanie pomocou prípravkov* (injekčné striekačky, vytlačovacie pištole, mechanické alebo automatické dávkovače, ...)

- c) *nanášanie pomocou výkonných zariadení* (polievacie zariadenia, valcovacie zariadenia s natieracím nožom, so vzduchovým nožom, s natieracím valcom, striekanie vzduchovými pištoľami, ...), používajú sa pri nanášaní lepidiel na veľké plochy
- d) *nanášanie pomocou tepelných procesov* (natavovanie, žiarové striekanie, vytlačovanie taveniny pomocou vytlačovacieho stroja, ...). (1)

1.6.4 Vznik spoja

Konečná fáza lepenia sa spravidla rozdeľuje na dva druhy operácií:

- 1) operácie na vytvorenie mechanických podmienok pre vznik pevného spoja
- vyvolanie predpísaného tlaku – musí pôsobiť rovnomerne - tým sa dosiahne určitá hrúbka vrstvy lepidla a jej dokonalé priľnutie k lepeným povrchom, súčasne sa zabezpečí preniknutie lepidla do nerovností a povrchových pórov.
- 2) operácie vytvárajúce vhodné podmienky pre vznik väzieb v spoji
- základné podmienky pre vznik adhezívnych väzieb sa tvoria už pri výbere lepidla a úprave povrchu.

Podmienky vzniku spoja:

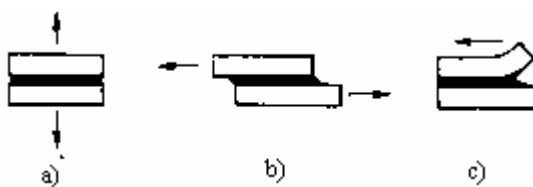
- treba dodržať technologické postupy lepenia predpísané výrobcom
- lepidlo musí byť rovnomerne nanesené
- styčné plochy musia byť dokonalé zmáčané
- lepidlo musí preniknúť do mikroskopických pórov a vytvoriť aktívny film
- lepidlo musí prejsť z tekutej do tuhej fázy!!! (1, 8)

1.7 Pevnosť lepených spojov

Ako som už spomínal v úvode, lepenie sa v minulosti používalo hlavne v oblastiach, kde neboli kladené vysoké nároky na pevnosť spoja (lepenie papiera, dreva textilu a pod). V súčasnej dobe, sa ale zvyšuje počet aplikácií lepenia aj u spojov, ktoré musia prenášať značné zaťaženie. Týka sa to aj lepenia kovov, napriek tomu, že pevnosť vrstvy lepidla dosahuje len 10 – 20 % pevnosti lepeného kovu.

1.7.1 Faktory ovplyvňujúce pevnosť lepeného spoja

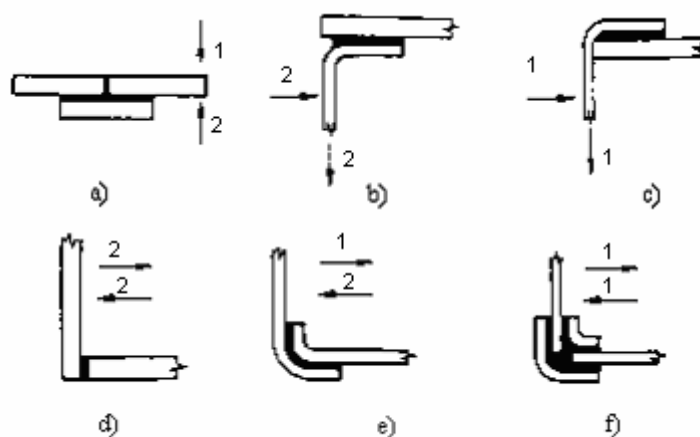
1. *Vlastnosti zvoleného lepidla.* Okrem dobrej adhézie k materiálu je dôležitá kohézna pevnosť a pružnosť lepidla, jeho súčiniteľ tepelnej rozťažnosti, pokles pevnosti v závislosti na teplote, odolnosť proti vode a hodnota zmršťovania.
2. *Hrúbka vrstvy lepidla.* So zväčšujúcou sa hrúbkou vrstvy klesá pevnosť v šmyku a v ťahu a rastie pravdepodobnosť porézności. Požadovaná hrúbka sa dá dosiahnuť vhodným tlakom, plnivami s veľkosťou zrna odpovedajúcou požadovanej hrúbke vrstvy alebo vkladáním drôtika medzi lepené plochy.
3. *Povrchová úprava adherendov* má zaistiť maximálnu možnú zmáčanlivosť povrchov zvoleným lepidlom a vytvorenie adhézných väzieb (viď. 1.5.2 Predbežné úpravy povrchu).
4. *Fyzikálno-mechanické vlastnosti lepeného materiálu.* Vo všeobecnosti platí, že materiál s vyššou pevnosťou môže dosahovať vyššiu absolútnu pevnosť spoja pri lepení materiálov s rozdielnymi modulmi pružnosti a pre súčinitele tepelnej rozťažnosti treba voliť lepidla, ktoré tieto rozdiely znižujú.
5. *Konštrukčný tvar spoja* rieši vzájomnú polohu lepených častí tak, aby bola získaná určitá styková plocha. Plochu a tým aj pevnosť spoja môžeme zväčšovať celkovou orientáciou spojovaných súčiastok proti smeru namáhania (napr. zamenením tupého spoja za uhlový), alebo príložkami, ktoré pôsobia aj svojou mechanickou pevnosťou.
6. *Spôsob namáhania.* Lepené spoje môžu byť namáhané ťahom, šmykom a odlupovaním (obr. 1), staticky alebo dynamicky. Najväčšiu pevnosť majú spoje namáhané šmykom, malú ťahom a najmenšiu namáhané odlupovaním. Lepený spoj sa preto konštruje tak, aby rozhodujúce namáhanie bolo šmykové, popr. tlakové.



Obr. 1. Namáhanie lepených spojov (5)

a) ťah, b) smyk, c) odlupovanie

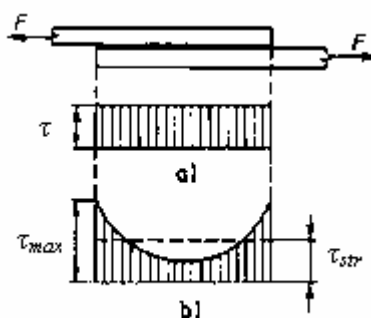
Vhodnosť alebo nevhodnosť smeru pôsobenia zaťaženia u rôznych konštrukčných riešení lepených spojov je na obr. 2.



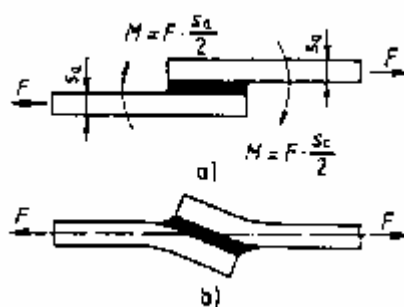
Obr. 2. Zaťaženie lepených spojov (5)

1 – vhodné, 2 – nevhodné; a) vhodné pre smer zaťaženia 1, b) nevhodne zaťažený uhlový spoj, c) vhodné riešenie pre smery zaťaženia, d) nevhodné riešenie, e) vhodné riešenie, f) najvhodnejšie (možnosť zaťažiť v ľubovoľnom smere)

7. *Vplyv geometrických parametrov.* Absolútna pevnosť spoja danej šírky rastie s dĺžkou prekrytia l_u len do určitého maxima, kedy nemá význam prekrytie zvyšovať. Je to ovplyvnené pevnosťou a hrúbkou adherendu. Špecifická pevnosť v šmyku s rastúcou dĺžkou l_u klesá. Dôvodom je nerovnomerné rozdelenie napätia vo vrstve lepidla, spôsobené pružnosťou a deformáciou adherendov (obr. 3). Koncentrácia napätia na okrajoch lepeného spoja sa zvyšuje pôsobením momentu silovej dvojice (obr. 4). Táto dvojica vyvoláva ťahové napätie, ktorého maximum je na okrajoch spoja a je príčinou odlupovania.



Obr. 3. Rozdelenie šmykového napätia vo vrstve lepidla po dĺžke preplatovania (5); a) tuhý adherend, b) elastický adherend



Obr. 4. Deformácia spojov v dôsledku ohybového momentu (5)
a) tuhých adherendov, b) elastických adherendov

Napätie pri odlupovaní je možné znížiť zväčšovaním pevnosti a hrúbky adherendu, ale aj rôznymi konštrukčnými úpravami (1, 2, 5).

1.8 Výpočet lepených spojov

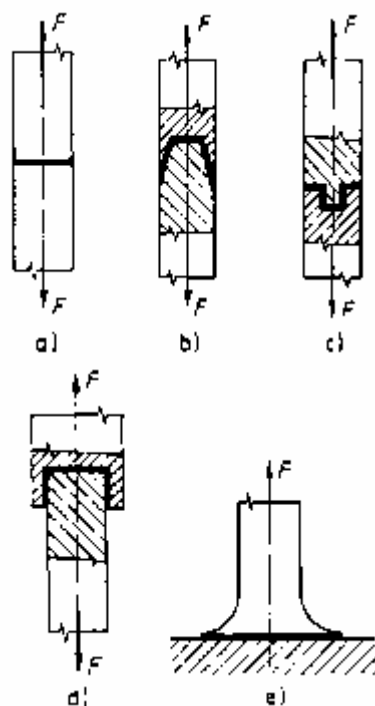
1.8.1 Ťahové namáhanie

Pre namáhanie v ťahu platí:

$$\sigma = F/A \leq \sigma_D = R_m/k, \quad (2)$$

kde k je bezpečnosť spoja; $k \approx 3$

Pretože únosnosť lepiacej vrstvy je nižšia ako únosnosť spojovaných materiálov, zväčšuje sa spojovacia plocha (obr. 5).



Obr. 5. Spojovanie tyčí lepením (5)
 a) nevhodné riešenie; b), c), d) zväčšenie plochy kombinovaným spojom;
 e) zväčšenie plochy tupého spoja

1.8.2 Šmykové namáhanie

Pri navrhovaní preplatovaného spoja (obr.6) sa určuje stredné šmykové napätie, pre ktoré platí:

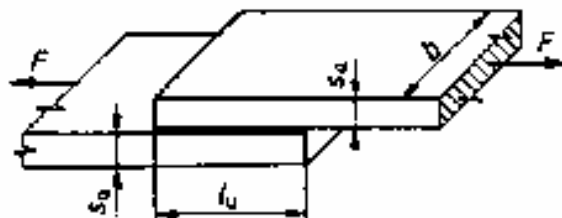
$$\tau = F/(b \cdot l_u) \leq \tau_d = R_{ms}/k, \quad (3)$$

kde k je bezpečnosť spoja; $k \approx 3$

$$l_{opt} = R_e \cdot s_a / k' \cdot R_{ms}, \quad (4)$$

kde k' je bezpečnosť spoja; $k' \approx 1,5$

$$b = F / (l_{opt} \cdot \tau_d) \quad (5)$$



Obr. 6. Preplatovaný spoj (5)

1.9 Skúšky lepených spojov

Pretože pevnosť lepeného spoja sa výrazne líši podľa hrúbky lepiacej vrstvy (vid'. obr.1), technológie lepeného spoja a druhu spojovaného materiálu, doporučuje sa pevnosť overiť na v skutočnosti prevedenom spoji za podmienok, ktoré odpovedajú prevádzkovým podmienkam. Tieto skúšky sa prevádzajú podľa ČSN.

Po zhotovení spoja sa skúša hlavne pevnosť a ostatné mechanické vlastnosti. Tieto vlastnosti závisia od konštrukcie a tvaru spoja, taktiež od materiálov, z ktorých sa spoj skladá, od smeru, spôsobu a veľkosti namáhania (1, 5).

1.9.1 Skúšky lepených spojov pre materiálové listy

Pevnosť v šmyku podľa ČSN 66 8510

Podstatou tejto skúšky je namáhanie skúšobného spoja v šmyku statickým ťahom v smere pozdĺž osy až do porušenia skúšobného telesa. Tvar, počet a rozmery skúšobných telies sú dané normou. Pevnosť v šmyku sa udáva v MPa. Doplnok ČSN 66 8510 popisuje skúšky vplyvu skúšobných kvapalín na lepené spoje.

Skúška lámavosti podľa ČSN 66851

Skúška lámavosti spočíva v namáhaní skúšobného spoja do zlomenia statickým ohybom. Lámavosť (zaťaženie pri zlomení) sa udáva v N/vzorku. Tvar, počet a rozmery skúšobných telies sú dané normou.

Pevnosť v odlupovaní podľa Wintera podľa ČSN 66 8516

Podstatou tejto skúšky je namáhanie skúšobného spoja odlupovaním statickým ťahom v smere kolmom na lepenú plochu. Pevnosťou v odlupovaní rozumieme silu v N/mm šírky vzorky, ktorá je potrebná k oddeleniu dvoch zlepených spojov.

Rázová pevnosť podľa ČSN 66 8512

Podstatou skúšky je namáhanie skúšobného spoja v šmyku razovým tlakom v smere pozdĺž osy až do porušenia vzorky. Razová pevnosť sa udáva v J/cm.

Pevnosť v šmyku pri dlhodobom staticky pôsobiacom namáhaní

Podstatou krípovej skúšky je meranie dĺžky vzájomného posunutia oboch polovic lepenej vzorky a súčasné zistenie medze tečenia. Tvar, počet a rozmery skúšobných telies sú dané normou. Je to maximálne napätie v šmyku, pri ktorom sa žiadna vzorka zo série piatich kusov neporuší v priebehu definovanej doby.

Skúška na únavu lepených spojov podľa ČSN 66 8513

Únavová pevnosť v šmyku ťahom pri pulzujúcom zaťažovaní je hodnota maximálneho šmykového napätia, pri ktorom sa žiadny zo série piatich kusov neporuší behom definovaného počtu zaťaženia. Tvar, počet a rozmery skúšobných telies sú dané normou. Väčšinou sa používa kmitočet 43,3 Hz.

Skúška urýchleného starnutia lepených spojov vlhkým teplom

Podstatou skúšky je zistenie vplyvu modelového prostredia (95 až 100% relatívna vlhkosť vzduchu, teplota 70 °C) na pevnosť v šmyku lepených spojov. Spomínaný režim má nahradiť vplyv pôsobenia poveternosti na lepené spoje. Metóda bola najprv overovaná zmenami pevnosti v šmyku a pevnosti v odlupovaní podľa Wintera, výsledky skúšky však ukázali, že dané prostredie má vplyv len na pevnosť v šmyku.

Skúška urýchleného starnutia lepených spojov podľa P-VW 12.05

Podstatou skúšky je zistenie vplyvu modelového prostredia s rôznymi podmienkami na pevnosť v šmyku lepených spojov. Spomínaný režim má nahradiť vplyv pôsobenia

poveternosti behom životnosti na lepené spoje. Metóda stanovuje po vytvrdnutí vzorky spôsob ich vystavenia rôznym podmienkam:

- a) meranie pre laboratórnej teploty
- b) meranie pri +80 °C (po 24 hodinovom odležaní v sušiarňi)
- c) meranie pri -35 °C (po 24 hodinovom odležaní v klimatizovanej komore)
- d) meranie pri laboratórnej teploty po 10 cykloch uloženia v klimatizovanej kondenzačnej komore

Testovanie teda prebieha vždy za rovnakých podmienok, ale vzorky za sebou majú rôznu tepelnú históriu (2, 6).

1.10 Zváranie

Metódy zvárania sa delia do dvoch základných skupín, a to zváranie tavné a zváranie s použitím tlaku. Prvá skupina zahrňuje technológie vytvárajúce metalurgické spojenie. Jeho podstatou je kúpeľ roztaveného kovu, tj. zliatiny tvorenej základným a prídavným materiálom (ak je použitý). Do druhej skupiny patria metódy odporového zvárania, kondenzátorového zvárania, zvárania trením, difúzne a výbuchom.

Podľa stupňa mechanizácie sa zváranie delí na:

- ručné - zvárací nástroj je vedený rukou zvárača a aj ostatné úkony sa prevádzajú ručne
- mechanizované – zvárací nástroj je vedený ručne, ale jednotlivé pracovné úkony (napr. podávanie prídavného materiálu do miesta zvaru) zaist'uje stroj (8)

Vhodnosť materiálu pre zváranie je vyjadrovaný pojmom zvariteľnosť, ktorá sa hodnotí u kovov podľa ČSN 05 1309.

1.11 Metódy zvárania s použitím tlaku

1.11.1 Odporové zváranie

Odporové zváranie patrí k procesom, pri ktorých sa využíva Joulové teplo, ktoré vzniká v dôsledku odporu materiálu pri prechode elektrického prúdu o vysokej intenzite (až 150 kA) a nízkom napätí (max. 15 V). Vzniknuté teplo

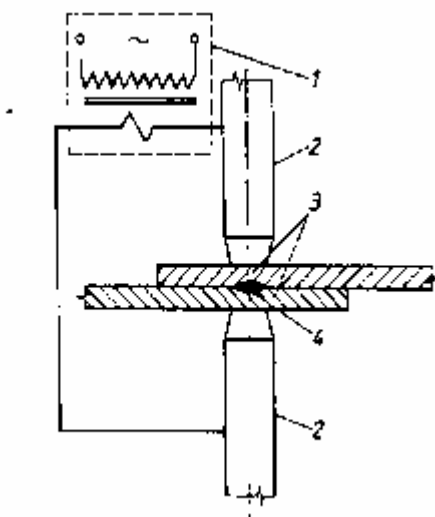
$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (6)$$

Na tvorbu zvaru sa využije len asi 60 %, zvyšok tvoria straty tepla do okolia, do materiálu atď. Celkový odpor R zváraného spoja je súčtom prechodových odporov (medzi elektródami a zváranými materiálmi a medzi materiálmi navzájom) a odporov zvarovaných materiálov.

Teplu Q potrebné pre zváranie je možné regulovať dvoma parametrami: zváracím prúdom a dobou zvárania. Ak je pre vznik potrebného tepla použitá nízka intenzita prúdu a dlhý čas zvárania, ide o mäkký zvárací režim, opačne o tvrdý zvárací režim.

Zmena zváracieho prúdu a prítlačnej sily v priebehu zvárania sa uskutočňuje v tzv. zváracom cykle. Patrí sem bodové, švové, výstupkové a stykové zváranie.

Bodové zváranie – najviac používaná metóda (obr. 7). Zvárané materiály (plech alebo ploché profily) sa vložia medzi tyčové elektródy z medenej zliatiny (zvnútra chladené vodou), ktoré okrem prívodu prúdu pre odporový ohrev zabezpečujú tiež prenos prítlačnej sily. Stlačením zváraných častí sa uzatvorí sekundárny obvod zväračky. Vplyvom elektrického odporu sa v mieste budúceho zvaru vyvinie v pomerne krátkom čase také teplo, že materiály na stykovej ploche sa začnú taviť. Po vypnutí prúdu vznikne z roztaveného kovu typická zvarová šošovka. Počas celého zváracieho cyklu musí byť zabezpečený trvalý prítlak elektród až do nestuhnutia roztaveného kovu v zvarovej šošovke.



Obr. 7. Princíp bodového zvárania (8)

1 - zvárací transformátor, 2 – elektróda, 3 – zvárané materiály, 4 – zvarová šošovka

Povrch zváraných plechov musí byť pred zváraním zbavený hrdz, mastnoty a iných nečistôt, preto sa mechanicky alebo chemicky čistí. S čistotou plechov súvisí aj životnosť elektród.

Elektródy určujú geometriu zvaru veľkosťou a tvarom dosadacej plochy, majú kruhový prierez. Priemer dosadacej plochy elektródy sa volí podľa tab.1.

Tab. 1. Príklad hodnôt parametrov pri bodovom zváraní (11)

Materiál	Hrúbka plechu h (mm)	Sila F (kN)	Prúd I (A)	Čas t (per.)	Priemer elektr. d (mm)	Šírka preplát l (mm)	Min Ø zvaru d _z (mm)
Nízkouhlikové ocele	0,5	1,5	7	3	4	11	3,5
	1,0	2,5	9	6	6	13	5,0
	2,0	5,0	14	15	7	18	6,5
Nehrdzavejúce ocele	0,5	1,8	4	4	4	11	3,5
	1,0	4,0	8	7	5	13	5,0
	2,0	9,0	14	13	7	18	6,5
Vytvrditeľné Al-zliatiny	0,5	2/4	30	2		11	3,5
	1,0	4/8	45	4		13	5,0
	2,0	8/18	65	9		18	6,5
		Pozn. 1			Pozn. 2		

Pozn. 1: Pri vytvrditeľných Al-zliatinách ide o silu zváraciu a silu kovaciu

Pozn. 2: Používajú sa sférické pracovné plochy (R = 100 až 200 mm)

Zvárací tlak sa volí s ohľadom na rovnosť a čistotu zváraných plechov tak, aby sa pri menších nerovnostiach zabezpečilo ich dosadnutie a dokonalý prechod zváracieho prúdu v mieste zvaru. Pri malom zváracom tlaku sa zväčšuje prechodový odpor medzi zváraným materiálom a elektródou. Materiál sa v týchto miestach viac zahrieva, čo vedie k hlbším vtlačeniam, opaľovaniu a „lepeniu“ elektród. Neúmerne vysoký tlak je zasa príčinou rýchlej deformácie koncov elektród, a tým aj zlej kvality zvaru.

Zvárací prúd závisí predovšetkým na hrúbke zváraných materiálov, na ich elektrickom odpore, na čistote povrchu, zváracom tlaku a zvolenom režime.

Pre dosiahnutie kvalitných zvarov je nutné dodržiavať určitú vzdialenosť zvarov, aby v priebehu zvárania nedochádzalo k odbočovaniu prúdu cez susedný zvar. Zvary tiež nesmú byť umiestnené príliš blízko okraja plechu. Minimálna vzdialenosť:

$$L = 2s + 4 \text{ mm} \quad (7)$$

Tab. II. Doporučené minimálne vzdialenosti bodových zvarov (8)

Hrúbka zváraných plechov s (mm)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,3	3,0	4,0	5,0
Vzdialenosť zvarov t (mm)	11	17	24	30	36	43	48	60

K bodovému zváraniu sa používajú stabilné alebo závesné prenosné bodové zváracíky. Závesné sa používajú tam, kde kvôli veľkosti zváranej konštrukcie nejde použiť stabilných zváracíkov, napr. pri výrobe karosérii.

Bodovo sa dajú zvärať aj plechy menších hrúbok. Obmedzenia sú dané iba možnosťami danými technológiou valcovania. Bodové zváranie sa uplatňuje hlavne pri spracúvaní mäkkších oceľových plechov do hrúbok 2 až 3 mm. Je to najmä výroba karosérii osobných a nákladných áut, výroba železničných vagónov. Pri výrobe doskových radiátorov, plášťov pračiek a chladničiek, ďalej pri výrobe kuchynského riadu, v zbrojárskom, elektrotechnickom a hračkárstvom priemysle.

Pri spracovaní plechov z ľahkých zliatin, titánu atď. má táto technológia uplatnenie aj v leteckom a kozmickom priemysle.

Švové zváranie – prítlačná sila je vyvodzovaná dvoma proti sebe sa otáčajúcimi kotúčovými elektródami. Používa sa k zváraniu nelegovaných aj legovaných ocelí, hliníka, medi, niklu a iných zliatin. Hrúbky zváraných materiálov sú obvykle 1 až 10 mm, ale môžu byť aj menšie.

Výstupkové zváranie – jedná so zváraných súčiastok musí byť opatrená vylisovaným výstupkom. Je určené k zváraniu nelegovaných aj legovaných ocelí, hliníku, medi, niklu a iných zliatin.

Stykové zváranie – rozlišujeme:

- Stykové zváranie stlačením – zvárané časti sa upnú v čeľusti zváracíky, zvarové plochy sa k sebe pritlačia a zapne sa prúd. Po dosiahnutí zvaracej teploty je materiál v plastickom stave a oba diely sa pôsobením tlaku spoja. Tento spôsob je veľmi nákladný.
- Stykové zváranie odtavením – prúd prechádza pri veľmi nedokonalom kontakte zváraných plôch. Materiál sa nataví a odstrekne, takže sa medzi zváranými plochami tvorí medzera. Plochy sa znova priblížia, dotknú a proces sa opakuje. Keď je materiál prehriaty do dostačujúcej hĺbky, plochy sa k sebe rýchlo pritlačia a vypne sa prúd. Táto

metóda sa používa k zváraniu polotovarov rôzneho tvaru (tyče, trubky, profily a pod.) (8, 9).

1.11.2 Trecie zváranie

Pri tomto type zvárania sa zvárané plochy zahrievajú teplom, ktoré vzniká ich vzájomným trením. Trenie je spravidla vyvolané otáčaním jednej zo zváraných častí za súčasného pôsobenia axiálneho tlaku. Preto sa táto metóda obmedzuje hlavne na zváranie kruhových profilov (trubiek a tyčí). Po zahriatí zváraných plôch na potrebnú teplotu sa otáčajúca časť prudko zabrzdí a zvárané súčiastky sa k sebe pritlačia. Súčasným vytlačením splastifikovaného materiálu sa vytvorí výronok. Takto sa dá zvariť súčasne aj niekoľko súčiastok. Pretože všetky nečistoty z miesta zvaru behom zahrievania odstreknú a zváranie prebieha bez prístupu kyslíka, je kvalita spoja veľmi dobrá.

Týmto spôsobom sa zvára oceľ, hliník, meď, titan, nikel, ale aj ich vzájomné kombinácie (8, 10).

1.11.3 Difúzne zváranie

Uskutočňuje sa vzájomnou difúziou atómov dotýkajúcich sa zváraných povrchov pri relatívne dlhom pôsobení (1/2 až 100 h) zvýšenej teploty (0,3 až 0,7 násobok taviacej teploty kovu alebo zliatiny s nižšou teplotou tavenia) a malej plastickej deformácii. Spoj sa vytvorí difúziou atómov v mieste dotyku v tuhom stave, tj. väzbou atómov v mieste ich dotyku. Tento proces prebieha v špeciálnych zariadeniach (komorách), ktoré musia pri zváraní zabezpečiť v okolí zvaru vákuum alebo ochrannú atmosféru, ohrev zváraných plôch a pritlačnú silu.

Tento spôsob zvárania umožňuje spájať výrobky z bežných kovov a zliatin, z ťažko taviteľných kovov (molybdén, volfrám, tantal, niob, a pod.), ale aj nekovových materiálov (8, 10).

1.11.4 Zváranie explóziou

Táto metóda umožňuje spájať rovnaké kovy, ale aj kovy s veľmi odlišnými fyzikálne – chemickými vlastnosťami. Môžeme ním obmedziť tvorbu intermetallickej krehkej fázy, alebo zabrániť zhoršeniu koróznej odolnosti materiálu v okolí zvaru. Ako výbušnina sa používa SEMTEX.

V súčasnej dobe ma najväčší význam pri výrobe bimetalických plechov platovaním v širokej kombinácii rôznych materiálových kombinácii a plochách až niekoľko desiatok m². Platovanie prináša nielen úspory deficitných kovov, ale zlepšuje aj ich fyzikálne a antikoročné vlastnosti. Výbuchové zváranie sa ďalej uplatňuje aj mnohých ďalších aplikáciách, napr. pri výrobe kompozitných materiálov. Hlavnou nevýhodou je hlučnosť tohto procesu, náročnosť na kvalifikáciu pracovníkov a bezpečnostné riziká (8, 10).

1.12 Metódy tavného zvárania

Zváranie plameňom - zváranie plynovým plameňom bez alebo s prídavným materiálom (ručné zváranie). Využíva sa v oblasti trubiek, tenkých plechov s pri opravárenskom zváraní liatiny.

Ručné oblúkové zváranie – zváranie s otvoreným oblúkom medzi prídavným a základným materiálom. Je použiteľné univerzálne pre zvarové spoje a návary.

Oblúkové zváranie pod tavidlom – zváranie so zakrytým oblúkom pod vrstvou tavidla medzi plynulé privádzaným prídavným materiálom a základným materiálom. Je to čiastočne automatizované zváranie používané pri dlhých zvaroch stredne hrubých plechov, pri navarovaní veľkých plôch a veľkých objemov.

Elektrotroskové zváranie – elektrotroskový proces je založený na využití tepla vznikajúceho pri prechode zvaracieho prúdu vrstvou roztavenej trosky. Materiál elektród sa pritom odtavuje do roztaveného kúpeľa a postupne vyplňuje zvarovú medzeru, pričom súčasne natavuje hrany zváraných materiálov. Zvarový kov sa nútené formuje príložkami. Používa sa pri zváraní hrubých plechov, navarovaní veľkých plôch a veľkých objemov.

Zváranie oblúkové – zváranie odkrytým oblúkom v ochranných atmosférach:

- a) Netaviacou sa volfrámovou alebo volfram-thoriovou elektródou v inertnom plyne (WIG, TIG). Oblúk je medzi netaviacou sa volfrámovou elektródou a základným materiálom. Prídavný materiál je oddelene pridávaný v argóne. Ide o ručné alebo čiastočne automatizované zváranie, ktoré má využitie vo všetkých výrobných odvetviach.
- b) Taviacou sa elektródou v inertnom plyne (MIG). Oblúk je medzi natavovaným, plynulé privádzaným prídavným materiálom a základným materiálom v argóne. Ide o mechanizované a čiastočne automatizované zváranie, ktoré má využitie vo všetkých výrobných odvetviach.

- c) Taviacou sa elektródou v aktívnom plyne CO_2 (MAG). Oblúk je medzi natavovaným, plynulé privádzaným prídavným materiálom a základným materiálom v oxide uhličitom. Ide o mechanizované a čiastočne automatizované zváranie, ktoré má univerzálne využitie.

Plazmové zváranie – zváranie plazmovým oblúkom, bez alebo s prídavným materiálom. Je to čiastočne automatizovaný proces, ktorý umožňuje spojovacie zvary hrúbok 0,01 až 15 mm a tiež navarovanie.

Elektrónové zváranie – zváranie elektronovým lúčom vo vákuu bez prídavného materiálu. Elektronový lúč je generovaný v elektrónovom dele. Je to čiastočne automatizovaný alebo automatizovaný spôsob zvárania, ktorý má univerzálne použitie.

Aluminotermické zváranie – zváranie pomocou aluminotermického reakčného tepla s použitím tlaku. Ide o tavné zváranie s použitím prídavného materiálu. Táto metóda sa využíva pri zváraní koľajníc, pre spojovacie zvary ocelí do betónu a veľké telesá vo výrobe.

Laserové zváranie – zváranie, ktoré využíva veľkú energiu zdroja (laser), ktorú sústreďuje do malej plochy. Táto metóda je univerzálne použiteľná (8, 10).

1.13 Metalurgické reakcie pri zváraní

1.13.1 Reakcie roztaveného kovu s kyslíkom

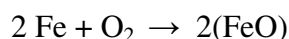
Pri zváraní kovov a kovových zliatin majú osobitný význam reakcie medzi roztaveným kovom a kyslíkom. Oxidovanie pri zváracích procesoch závisí od príbuznosti prvkov ku kyslíku. Zdrojmi oxidácie kovu v procese zvárania sú:

- voľný kyslík v plynnej fáze,
- oxidy nachádzajúce sa v roztavených povrchoch,
- chemicky aktívne trosky, ktoré kyslík odovzdávajú pri zváraní roztavenému kovu.

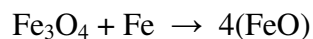
Kyslík pôsobí na zliatiny železa negatívne (pri obsahu okolo 23 % je oceľ krehká). Rozpustnosť kyslíka v železe závisí na teplote. Zo zvyšujúcou sa teplotou sa rozpustnosť zvyšuje, rozpustnosť v tekutej fáze je väčšia ako rozpustnosť v tuhej fáze. Kyslík so železom môže tvoriť nasledujúce oxidy FeO_3 , Fe_2O_3 , FeO a Fe_3O_4 .

Oxidácia v procese zvárania môže prebiehať rôzne:

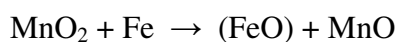
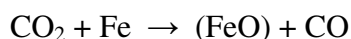
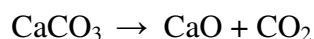
1. Vzájomným pôsobením kovu s kyslíkom vo vzduchu pri nedostatočnej ochrane roztaveného alebo vyhriateho kovu pri zváraní



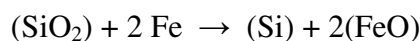
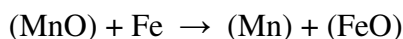
2. Prítomnosťou oxidových blán



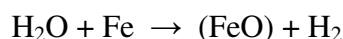
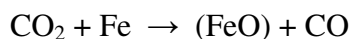
3. Vzájomným pôsobením komponentov nachádzajúcich sa v obaloch elektród pri tavení obalu



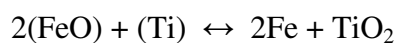
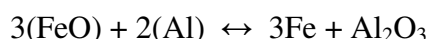
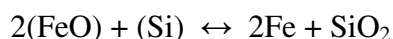
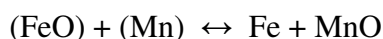
4. Oxidáciou na hranici kov – troska



5. Vzájomným pôsobením roztaveného kovu s atmosférou

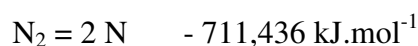


Nahromadenie kyslíka vo zvarovom kove a vytvorenie oxidov znižuje mechanické vlastnosti zvarových spojov. Preto sa používajú rôzne spôsoby odoxidovania tavidlami, troskami alebo oxidačnými prvkami (mangánom, kremíkom, hliníkom alebo titánom).

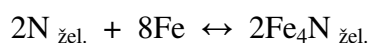
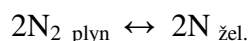
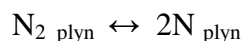


1.13.2 Reakcie roztaveného kovu s dusíkom

Molekulový dusík pri vysokých teplotách disociuje na atómy



Rozpustnosť dusíka v tuhom a tekutom železe sa zvyšuje s rastúcou teplotou. Schematicky možno toto rozpúšťanie znázorniť



čiže disociácia dusíka v plynnej fáze je štádiom, ktoré prechádza absorpciou dusíka železom. Obsah rozpusteného dusíka je úmerný obsahu atómového dusíka v plynnej fáze.

1.13.3 Reakcie roztaveného kovu s vodíkom

Vodík pri zváraní je vždy v plynnej fáze, ktorá pôsobí navzájom s roztaveným kovom. Pre rôzne kovy je toto vzájomné pôsobenie odlišné. Niektoré z nich (titán, vanád, tantal a pod.) tvoria hybridy, ktoré sa však pri vysokých teplotách rozpadajú, a tým sa môže vodík z kovu vydeliť. Ďalšia skupina kovov (železo, nikel, kobalt, meď) hybridy nevytvárajú. Tieto kovy vodík absorbujú (11).

1.14 Vady zvarov

Vady zvarov popisuje a jednoznačne vysvetľuje ČSN. Môžu byť spôsobené nevhodnou voľbou základného prídavného materiálu, zlou prípravou zvárania a nevhodným postupom alebo parametrami zvárania.

U tavných zvarov sa vady delia na vonkajšie a vnútorné. Z vonkajších sú to najčastejšie nesprávne napojenie zvaru pri výmene prídavného materiálu, nadmerne prevýšený a prehĺbený zvar, vruby, nesymetrický tvar, vonkajšie trhliny. Z vnútorných potom plynové dutiny, studené spoje, vnútorné trhliny a štruktúrne vady.

Pri zváraní s použitím tlaku sú častými vonkajšími vadami hlavne vady tvaru a rozmerov zvaru a vady povrch zvaru. Z vnútorných sú to plynové dutiny, vady natavenia a trhliny (8).

1.15 Skúšky zvarov

Pre vyhodnocovanie mechanických vlastností a akosti zváraných spojov sa používajú skúšky s porušením spoja – deštruktívne alebo s neporušením spoja – nedeštruktívne.

Pri bodových, švových a výstupkových zvaroch sa vyhodnocuje hlavne, či je šošovka prevarená a jej tavný, resp. difúzny charakter. Na tento účel sa používa dielenská skúška, zvar sa rozlupuje pomocou sekáča alebo nástrojom podobným kľúčom na otváranie konzerv. Postupy a nástroje, ktoré sa používajú na skúšanie odporových bodových, výstupkových

a švových zvarov pomocou odlupovacích a sekáčových skúšok definuje medzinárodná norma ČSN EN ISO 14270.

Bez ohľadu na použitý spôsob odporového zvarovania sa hodnotí vzhľad povrchu, rozmery a hĺbka odtlačku pod elektródami, rozmery zvaru, čistota spoja a výskyt prasklín (povrchovými i metalografickými skúškami). Mechanickými skúškami sa zisťuje pevnosť zvaru najmä pri požadovanom spôsobe namáhania.

1.16 Ďalšie typy spojov

Existuje množstvo druhov spojenia, a preto je ťažké stanoviť všeobecne platné pravidlá pre výber určitého spoja pre konkrétnu úlohu. Výber vhodného typu spoja závisí na zaťažení, veľkosti súčiastky a materiáloch spojovaných súčiastok, na prevádzkových podmienkach, požadovanej bezpečnosti a v neposlednom rade aj na vzhľade.

1.16.1 Pájkované spoje

Pájkovanie je metóda spájania kovových dielov v nerozoberateľný a nehybný spoj roztavenou pájkou. Nedochádza pri ňom k nataveniu materiálu ako u tavného zvarovania. To je spôsobené tým, že tento proces prebieha pri teplotách nižších ako je teplota tavenia spojovaného materiálu.

Pájky definujeme ako prídavné materiály pri pájkovaní. Rozlišujeme mäkké a tvrdé pájky. Mäkké sa vyznačujú hlavne nízkou teplotou tavenia. Sú to zliatiny kovov, ktorých základom je Sn a Pb. Vyrábajú sa v tvare tyčiniek, trubičiek s tavidlom, pásikov a drôtov. Tvrdé pájky sa používajú u spojov, ktoré sú vystavené väčšiemu mechanickému namáhaniu. Vyrábajú sa vo forme drôtov, pásikov, fólii, tyčiniek obalených tavidlom a práškov. Najčastejšie sa používa meď, mosadz a striebro. Tavidlo rozpúšťa oxidy na povrchu pájkovaného materiálu a bráni ich ďalšiemu vzniku.

Výhody pájkovania spočívajú v tom, že môžeme spájať rôzne kovové materiály, tenkostenné aj zložité súčiastky. Pri tomto procese je menšia spotreba energie ako pri zvaraní. Nevýhodou je menšia pevnosť spoja ako napr. zvarného a vysoká závislosť pevnosti spoja na technologických parametroch pájkovania (napr. na druhu pájky, šírke medzery spoja a pod.) (5).

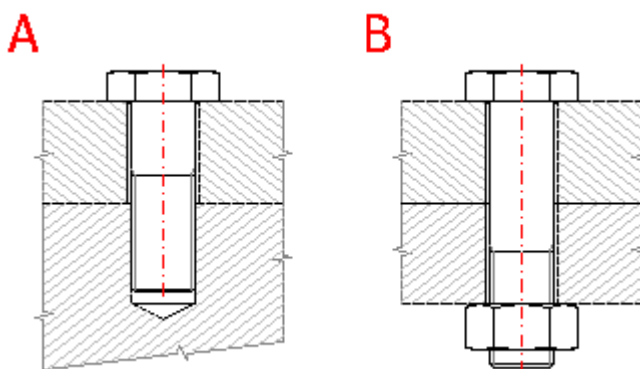
1.16.2 Nitované spoje

Nitovaný spoj vzniká deformáciou jednej zo spojovaných súčiastok vlozenej do diery v druhej súčiastke – priame nitovanie, alebo deformáciou koncov nitov vložených do priechodzích dier v spojovaných súčiastiach – nepriame nitovanie.

Tieto spoje sa v súčasnosti využívajú len výnimočne, hlavne k spojovaniu ťažko zvárateľných materiálov, pri spojovaní plechov a profilov z ľahkých kovov a na rôznych montážach, kde nie je prívod elektrického prúdu (5).

1.16.3 Skrutkované spoje

Skrutkové spoje patria k dobre rozoberateľným typom spojenia. Z konštrukčného hľadiska rozlišujeme dva základné spôsoby prevedenia skrutkového spoja (obr. 8).



Obr. 8. Skrutkový spoj(13)

A. skrutkový spoj so závrtnou skrutkou

B. skrutkový spoj s priechodzou skrutkou

Dĺžka u priechodzích skrutiek musí byť taká, aby po utiahnutí presahovala skrutka z matice najmenej dvoma závitmi. Maximálne možné utiahnutie skrutkovaného spoja je dané veľkosťou a materiálom skrutky alebo matice.

Tento typ spoja je schopný prenášať všetky druhy zaťaženia, je ľahko zostrojiteľný a jeho rozoberateľnosť je taktiež nenáročná, takže sa dá hovoriť o nulových prevádzkových nákladoch (13).

1.16.4 Spoje kolíky a čapmi

Z hľadiska pevnosti sú kolíkové spoje v porovnaní s inými spojmi pomerne málo pevné. Pevnosť kolíkového spoja môžeme zvýšiť vtedy, ak ho spojíme na pokos, pričom sa zvýši pevnosť približne dvakrát. Takmer rovnakú pevnosť ako kolíkový spoj má čap (14).

1.17 Žiarové pozinkovanie

Žiarové pozinkovanie zaisťuje spoľahlivo dlhodobú protikoróznú ochranu oceľových výrobkov. Oceľové súčiastky očistené od hrdze a nečistôt sa ponárajú do roztaveného zinku (teplota 440 °C), kde sa na nich vytvára povlak zliatiny železa a zinku s vrchnou vrstvou čistého zinku. Výsledkom je strieborno šedý povrch, ktorý chráni kov proti korózii. Technológia pozinkovania je stručne vysvetlená na obr. 9.



Obr. 9. Technológia pozinkovania (16)

Diely určené k žiarovému pozinkovaniu sa pripravujú, zbavujú sa olejov a tukov, následne morením aj hrdze a nečistôt. Cez kúpeľ s tavidlom sa takto očistené diely dostávajú do sušiackej pece, kde sa vysušia a suché sa konečne dostanú do zinkovacieho kúpeľa. Nasleduje ochladenie, očistenie a kontrola. Tento proces zaručuje stálu kvalitu.

Zinok ponúka výbornú protikoróznú ochranu vzhľadom na dvojité funkcie povlaku: bariérový účinok a katodickú ochranu. Bariérová funkcia Zn povlakov je určená jeho pasívnymi schopnosťami. Zinok a jeho zliatiny sa na vzduchu pokrývajú vrstvou oxidu ZnO, resp. hydroxidu Zn(OH)_2 a zásaditého uhličitanu $4\text{Zn(OH)}_2 \cdot \text{CO}_2$, ktorý sa iba nepatrne rozpúšťa vo vode a poskytuje dobrú prirodzenú ochranu pred oxidáciou. Katodická ochrana Zn povlaku vyplýva z rozdielnych elektrochemických vlastností

Fe a Zn: – pre zinok M^{2+} $M = -0,763 \text{ V}$,
 – pre železo M^{2+} $M = -0,440 \text{ V}$.

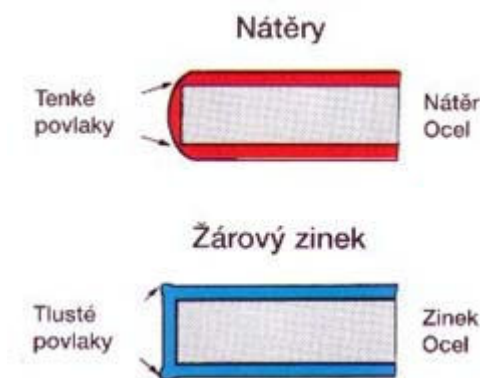
Nižší štandardný potenciál Zn v porovnaní so železom znamená, že v podmienkach elektrochemickej korózie sa Zn voči Fe správa ako menej ušľachtilý.

Za týchto podmienok neušľachtilý Zn takmer vždy vytvára anódu korózneho elektrického článku, z ktorého sú ako korózne produkty vylučované ióny Zn. Vedľajší oceľový plech vytvára katódu, voči ktorej je účinok vzdušného kyslíka a OH – iónov intaktný.

Materiály určené k žiarovému pozinkovaniu musia odpovedať požiadavkám podľa normy ČSN EN ISO 1461 pre navrhovanie konštrukcií pre žiarové pozinkovanie (13, 15, 16).

1.17.1 Výhody žiarového pozinkovania

- dlhá životnosť zinkových povlakov (stálosť voči poveternostným vplyvom)
- vynikajúce priľnutie ochranej vrstvy vďaka vytvoreniu zliatiny Fe-Zn v zinkovom kúpeli; táto vrstva je rovnomerná vo vnútri aj na povrchu oceľových konštrukcií
- predĺženie životnosti oceľových konštrukcií (30 – 50 rokov)
- umožnenie následného použitia ďalších náterových hmôt
- po znehodnotení povrchu možnosť opätovného pozinkovania
- na ostrých hranách a rohoch vzniká rovnako hrubý povlak než na rovnom povrchu (viď. obr. 10)



Obr. 10. Rozdiel hrúbky povlaku u náteru a žiarového zinku (16)

- v prípade drobného porušenia povlaku chráni zinkový povlak oceľ proti korózii katodicky (vytvorí sa elektrochemický článok, zinok v okolí poškodenia oxiduje, oxidačné produkty sa vylúčia na povrchu oceli a chránia ju - oceľ v kontakte so zinkovým povlakom je katódou)
- nepoškodzuje životné prostredie

- nízka cena a nízke udržiavacie náklady

1.17.2 Nevýhody žiarového pozinkovania

- v prípade preplátovaných povrchov je nutné dodržať doporučená týkajúce sa odvodušnenia
- pri pozinkovaní výrobkov, ktoré sú veľmi pevné len v jednej ose alebo u rozmerných nevystužených plochách z tenkého plechu dochádza k ich deformácií
- povrch zinkovaného materiálu nesmie byť znečistený farbou a dechtovými nátermi znížená možnosť zvarovania (12, 16)

1.17.3 Zváranie pozinkovaných plechov

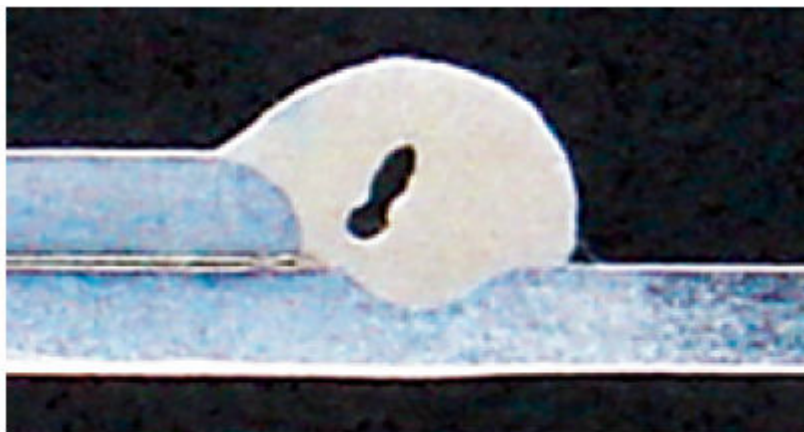
Podmienky zvarovania pozinkovaných plechov elektrickým oblúkom v ochrane plynov MIG/MAG sú výrazne ovplyvnené existenciou kovového povlaku. Zinok v porovnaní s oceľovým materiálom má výrazne nižšiu teplotu tavenia ($T_{Zn} = 906\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{Fe} = 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Aj teplota odparovania Zn je o viac ako $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ nižšia ako teplota tavenia nízkouhlíkovej ocele. Oblúkové zváranie pozinkovaných plechov tak bude sprevádzané intenzívnym odparovaním Zn povlaku z povrchu materiálu.

Odparovanie Zn v procese zvarovania pozinkovaných plechov bude všeobecne spôsobovať:

1) Nestabilitu procesu, tj. nestabilné horenie oblúka, poruchy v prúde ochranného plynu a prenose kovu z elektródy do zvarového kúpeľa. Uvedené vplyvy budú zapríčiňovať najmä zvýšený rozstrek do okolia zvaru. Pre elimináciu nežiadúceho účinku odparujúceho sa Zn na stabilitu horenia oblúka sa odporúča použiť ľavosmerný pohyb horáka, kedy k odpareniu Zn povlaku dochádza vo väčšej vzdialenosti od zóny prenosu kovu z elektródy do zvarového kúpeľa.

2) Odparujúci sa Zn okrem procesu zvarovania negatívne ovplyvňuje aj štruktúru spoja. Často sa pri nedostatočnom odplynení vyskytujú vo zvarovom kove póry, ktoré výrazne znižujú mechanické vlastnosti zvarového spoja (obr. 11). Je zrejmé, že uvedené negatívne vplyvy sa budú s pribúdajúcim množstvom zinkových pár, ktoré vznikajú v procese zvarovania, ešte zväčšovať. Preto sa často ako rozhodujúce kritérium zvariteľnosti pozinkovaných plechov uvádza hrúbka zinkovej vrstvy. Tá by pri plechoch určených na

zváranie oblúkovými technológiami nemala presiahnuť 15 až 20 μm . Veľkou nevýhodou oblúkového MAG zvarovania pri použití ocelového drôtu napr. typu G2Si1 (SG 2) je strata odolnosti korózie v mieste zvaru. Dodatočná ochrana zinkovými sprejmi síce rieši otázku ochrany spoja a tepelne ovplyvnenej oblasti, kvalita ochrany je však nižšia a spôsobuje aj dodatočné náklady na výrobu (15).



Obr. 11. Priečny rez, preplatovaný zvarový spoj: žiarovo pozinkovaný ocelový plech hrúbky 1,5 mm, zvarací drôt SG2, priemer 1 mm, ochranný plyn Ar + 18 %CO₂ (15)

2 STANOVENIE CIEĽOV DIPLOMOVEJ PRÁCE

Na základe výsledkov teoretickej časti je možné spájanie pozinkovaných častí riešiť niekoľkými spôsobmi.

Cieľom tejto diplomovej práce je pokúsiť sa zistiť, či je vôbec možné nahradiť bodové zvary medzi dvoma pozinkovanými časťami lepením a to hlavne z hľadiska mechanického zaťažovania. Vo zvarových spojoch vzniká napätie, ktoré je závislé na spôsobe zaťažovania zvaru a na použitej metóde zvarovania. Ďalším nepriaznivým vplyvom je chemická korózia. Ide o koróziu plechu, kedy sa na jeho povrchu poruší vrstva zinku, čo sa v dôsledku vysokej teploty pri zvarení stáva ($T_{Zn} = 906\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{Fe} = 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tomu by sa dalo pri lepení vyhnúť, ale samozrejme nesmie byť použité lepidlo, ktoré by sa správalo voči spájanému materiálu agresívne, tj. nesmie obsahovať látky, resp. jeho zloženie musí byť také, aby neviedlo k reakcii so zinkom. Môže sa stať, že tam nastane chemická reakcia, ale pozitívna, tj. „sila“ spoju sa zvýši. Všetky tieto možnosti sa budeme snažiť zohľadniť a otestovať silu spojov v jednotlivých prípadoch (trhačka a ďalšie dostupné metódy).

Použitím lepenia namiesto zvarovania v praxi by sa dalo dopracovať k dostatočne pevným spojom, alebo k spojom, ktoré by nepodliehali korózii, tj. by vydržali dlhšie a pre danú aplikáciu by boli postačujúce alebo aj vhodnejšie. V neposlednom rade je možné uvažovať o nahradení zvarovania lepením aj z ekonomického hľadiska, tj. či by to nebolo finančne menej náročné. Samozrejme musí byť použité lepidlo, ktoré by to dovoľovalo po zohľadnení kvality spoja, tj. hlavne jeho pevnosti, aby nenastala situácia, že použitím lacného lepidla sa zníži kvalita daného spoja a tým jeho životnosť.

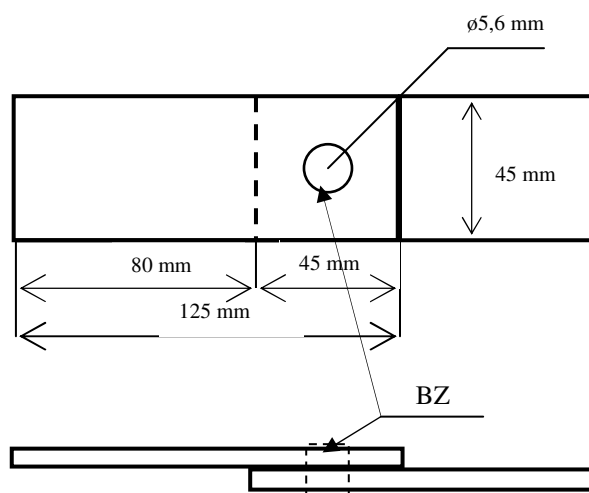
Po zohľadnení všetkých týchto faktorov, by sa malo dospieť k záverom, z ktorých by malo byť zrejmé, použitie ktorej zo spomínaných dvoch spôsobov spájania pozinkovaných častí by bolo pre výrobcu výhodnejšie z hľadiska ekonomického, technologického, atď.

3 EXPERIMENTÁLNÁ ČASŤ

V experimentálnej časti boli prevedené zaťažovacie skúšky na vzorkách žiarovo pozinkovaných plechov s bodovými zvarmi podľa požiadavky zákazníka. Pre zrovnanie boli pripravené rozmerovo rovnaké vzorky, ktoré boli spojené lepenými spojmi. Zaťažovacie skúšky v oboch prípadoch boli uskutočňované na testovacom zariadení ZWICK 1456. Postupy skúšok ako lepených, tak aj zváraných spojov sú uvedené v nasledujúcich kapitolách.

3.1 Skúšky bodových zvarov

Postupovali sme podľa normy ČSN EN ISO 14270, ktorá určuje rozmery vzorky a postup pre mechanizované odlupovacie skúšanie odporových bodových zvarov u preplatovaných plechov z akýchkoľvek kovových materiálov za účelom stanovenia sily pre odlúpnutie, ktorú môže skúšobná vzorka vydržať. Vzorky bodových zvarov boli dodané zákazníkom a mali nasledujúce rozmery, vid'. obr.12, kde bodový zvar je označený ako BZ.



Obr. 12. Základné rozmery bodovo zváraných vzoriek

3.2 Skúšky lepených spojov

Pre nasledujúce skúšky boli použité lepidlá na základe doporučenia špecializovanej firmy HANÁK - Lepidlá & Tmely (www.uh.cz/phanak).

3.2.1 Použité lepidlá

Pri výrobe vzorkou boli k dispozícii tri prípravky od firmy Teroson. Ide o prípravky, ktoré sa úspešne používajú pri spájaní plechov a iných súčiastok v automobilovom priemysle alebo ako náhrada iných spojov v strojárstve. Svojimi vlastnosťami by mali zaistiť taký spoj, ktorý by mal v dostatočnej miere nahradiť bodové zváranie. Použité prípravky spĺňajú základné požiadavky pre aplikáciu v tomto priemyselnom odvetví. Musíme zdôrazniť ich schopnosť dokonale priľnúť aj k neodmastenému povrchu plechu.

Lepidlo Terostat-9120

Adhézna tesniaca hmota so širokým spektrom priľnavosti na kov, lakované povrchy a na plasty.

Termostat-9220 je založený na MS polyméru a preto má nasledujúce výhody:

- neobsahuje isokyanáty a rozpúšťadlá
- vynikajúca znášanlivosť s lakmi
- rýchle vytváranie filmu
- nezmršťuje sa
- dobrá odolnosť voči UV žiareniu
- bez zápachu
- možno bodovo zvarovať

Technické údaje:	Základ	- MS polymér
	Farba	- biela, šedá, čierna
	Čistenie	- čistič + riedidlo FL

Lepidlo Terostat-9220

Ide o pevnostné lepidlo pre vytváranie „zváraných“ spojov. Používa sa tam, kde sa vyžaduje bezpečný a trvanlivý spoj alebo vysoko kvalitné utesnenie, napríklad pri výrobe automobilových a iných karosérii, kabín, palivových nádrží a pod.

Toto jednozložkové lepidlo a tesniaca hmota má vynikajúce vlastnosti:

- tvrdo elastické
- vysoká počiatočná pevnosť a rýchle vytvrdzovanie

- vysoko odolné proti starnutiu, poveternostným vplyvom, UV žiareniu a slanej vode

Termostat-9220 je založený na MS polyméru a preto má nasledujúce výhody – neobsahuje silikon, rozpúšťadla ani isokyanáty.

Technické údaje:	Základ	- MS polymér
	Farba	- čierna
	Čistenie	- čistič + riedidlo FL

Lepidlo Terostat-8596

Jedná sa o jednokomponentové polyuretánové lepidlo, ktoré je určené pre priame zasklievanie automobilových skiel do karosérie. Vytvrdzuje pomocou vzdušnej vlhkosti na gumovo-elastický materiál.

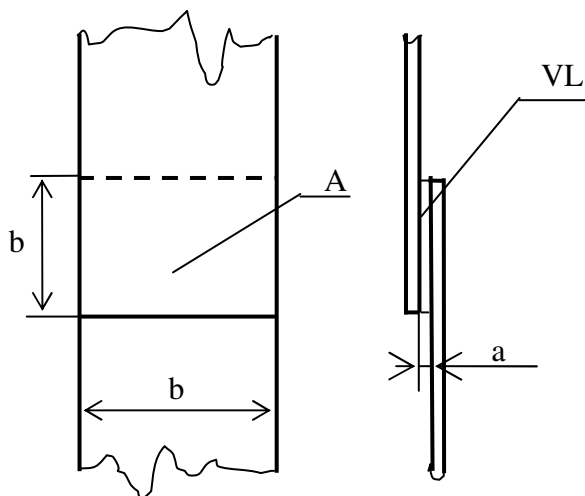
Obsahuje difenylmethan-4,4'-diisokyanát.

Technické údaje:	Základ	- MS polymér
	Farba	- biela
	Čistenie	- čistič + riedidlo FL (17)

3.3 Popis metodiky

Keďže cieľom diplomovej práce nebolo zistenie adhézných vlastností, do úvahy prichádza ťahová šmyková skúška. Možné skúšky lepených spojov sú uvedené v kapitole 1.9.1. Vychádzali sme zo šmykové ťahové skúšky podľa P-VW 12.05 – 57 581.

Jedná sa o predpis slúžiaci na zistenie pevnosti v šmyku na preplatovanom lepenom spoji z namáhania ťahovou silou. Základne rozmery lepeného spoja, ktoré boli konštruované z rovnakých vzoriek plechov (rozmery, materiál) ako dodané vzorky bodových zvarov (na žiadosť zadávateľa), sú viditeľné na obr. 13. VL označuje vrstvu lepidla, ktorá má hrúbku a.



Obr. 13. Základné rozmery lepeného spoja

$$a = 0,5 \text{ mm}, b = 45 \text{ mm}$$

3.4 Popis zhotovenia vzoriek

Ako som už spomínal, vzorky plechov, ktoré boli lepené boli dodané zákazníkom, takže mali ním požadované rozmery (viď obr. 12).

Postup:

1. Vyznačenie veľkosti styčnej plochy (viď obr. 13).
2. Odmastenie acetónom a označenie vzoriek.
3. Nanesenie lepidla na vyznačenú plochu a vloženie distančného drôtu o priemere 0,5 mm.
4. Priloženie druhého plechu.
5. Zafixovanie vzorky.
6. Vzorky je možné trhať podľa doporučenia už po 6 hodinách, trhanie bolo prevádzkané až po 24 hodinách.

3.5 Popis šmykovej ťahovej skúšky

Pri tejto skúške sa vychádzalo z normy P-VW 12.05 – 57 581. Podmienky však boli prispôsobené požiadavkám zákazníka. Hotové vzorky sa upevnili do trhacieho stroja ZWICK 1456, ktorý je ovládaný počítačom a bola zahájená zaťažovacia skúška.

Vzdialenosť čelustí bola prispôsobená rozmerom vzoriek. Zaznamenávaná bola maximálna sila potrebná pre ich roztrhnutie. Skúšky boli uskutočňované za konštantných podmienok, tj. pri laboratórnej teplote v rozsahu $20 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (klimatizovaná miestnosť) a rýchlosti posunu čelustí 10 mm.min^{-1} .

V priebehu skúšky je možné pozorovať spôsob deformácie lepeného preplatovaného spoja. V stave bez pôsobenia ide o rovnobežne zlepené plechy, na ktorých s rastúcim zaťažením spoja dochádza v mieste zlepenia k ich deformácii. Šmykové namáhanie sa v tomto mieste nakoniec mení až na namáhanie v odlupovaní, ktoré dosahuje najvyšších hodnôt na koncoch preplatovaného spoja. K overeniu tohto tvrdenia bola prevedená analýza lepeného spoja pomocou MKP (viď. kapitolu 3.9).

3.6 Spôsob vyhodnotenia šmykovej ťahovej skúšky

Cieľom merania bolo zistiť, aké veľké šmykové napätie je potrebné k porušeniu ako zváraného, tak aj lepeného spoja. K výpočtu plôch, šmykových napätí, aritmetických priemerov šmykových napätí a stredných smerodajných odchýliek boli použité nasledujúce vzťahy:

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}}{S} \quad (\text{N.mm}^{-2} = \text{MPa}) \quad (8)$$

$$S = \frac{\pi \cdot r^2}{4} \quad (\text{mm}^2) \quad (9)$$

$$S = b \cdot b = b^2 \quad (\text{mm}^2) \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{\max i}}{n} \quad (\text{MPa}) \quad (11)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_{\max i} - \tau)^2}{n - 1}} \quad (12)$$

3.7 Namerané hodnoty

Získané namerané hodnoty ťahových skúšok sú uvedené v tabuľkách III. – XII.

Tab. III. Bodový zvar namáhaný šmykom

Nr	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\tau_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	$F_{\max}$ (N)	A (mm ²)	$\tau_{\max}$ (Mpa)	$\Delta\tau \pm s$ (Mpa)
1	1	0,8	5,6	3,63	3,59	6799,03	24,63	276,05	252,67 ± 16,95
2	1	0,8	5,6	3,92	3,92	6498,62	24,63	263,85	
3*	1	0,8	5,6	13,98	14,00	6119,14	24,63	248,44	
4	1	0,8	5,6	4,56	4,57	5846,29	24,63	237,36	
5	1	0,8	5,6	3,91	3,95	5853,53	24,63	237,66	

Pozn.: * - hodnota vylúčená z celkového grafického porovnania – chyba pri meraní

Tab. IV. Bodový zvar namáhaný šmykom – štatistické hodnoty

n = 3	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\tau_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (%)
priemer	1	0,8	5,6	4,13	4,15	2,58
smer. odch.	0	0	0	0,37	0,37	0,23
var. koef.	0	0	0	8,89	8,82	8,89

Tab. V. Bodový zvar namáhaný ťahom

Nr	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\sigma_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	$F_{\max}$ (N)	A (mm ²)	$\sigma_{\max}$ (Mpa)	$\Delta\sigma \pm s$ (Mpa)
1	1	0,8	5,6	40,04	40,11	785,55	24,63	31,89	32,14 ± 0,90
2	1	0,8	5,6	39,90	39,96	786,68	24,63	31,94	
3	1	0,8	5,6	37,61	37,68	771,07	24,63	31,31	
4	1	0,8	5,6	44,75	44,82	823,21	24,63	33,42	

Tab. VI. Bodový zvar namáhaný ťahom – štatistické hodnoty

n = 4	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\sigma_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (%)
priemer	1	0,8	5,6	40,58	40,64	33,81
smer. odch.	0	0	0	3	3	2,5
var. koef.	0	0	0	7,39	7,38	7,39

Tab. VII. Lepený spoj namáhaný šmykom – lepidlo Terostat-9220

Nr	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\tau_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	$F_{\max}$ (N)	A (mm ²)	$\tau_{\max}$ (Mpa)	$\Delta\tau \pm s$ (Mpa)
1*	1	0,5	45	18,43	18,45	1484,90	2025,00	0,73	1,295 $\pm$ 0,068
2	1	0,5	45	10,37	10,39	2800,16	2025,00	1,38	
3	1	0,5	45	3,45	3,50	2461,29	2025,00	1,22	
4	1	0,5	45	12,19	12,27	2581,55	2025,00	1,27	
5	1	0,5	45	2,96	3,04	2649,57	2025,00	1,31	

* - hodnota vylúčená z celkového porovnania – odlišný čas vytvrdzovania lepidla

Tab. IIX. Lepený spoj namáhaný šmykom – štatistické hodnoty (Terostat-9220)

n = 5	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\tau_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (%)
priemer	1	0,5	45,0	9,48	9,53	6,32
smer. odch.	0	0	0,4472	6,46	6,45	4,31
var. koef.	0	0	1	68,19	67,67	68,19

Tab. IX. Lepený spoj namáhaný šmykom – lepidlo Terostat-8596

Nr	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\tau_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	$F_{\max}$ (N)	A (mm ²)	$\tau_{\max}$ (Mpa)	$\Delta\tau \pm s$ (Mpa)
1	1	0,5	45	2,01	2,06	733,14	2025,00	0,36	0,35 $\pm$ 0,017
2	1	0,5	45	1,10	1,18	673,80	2025,00	0,33	
3	1	0,5	45	1,13	1,22	660,56	2025,00	0,33	
4	1	0,5	45	1,23	1,28	718,56	2025,00	0,35	
5	1	0,5	45	1,11	1,18	709,27	2025,00	0,35	

Tab. X. Lepený spoj namáhaný šmykom – štatistické hodnoty (Terostat-8596)

n = 5	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\tau_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (%)
priemer	1	0,5	45,0	1,31	1,38	0,88
smer. odch.	0	0	0	0,39	0,38	0,26
var. koef.	0	0	1	29,85	27,33	29,85

Tab. XI. Lepený spoj namáhaný šmykom – lepidlo Terostat-9120

Nr	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\tau_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	$F_{\max}$ (N)	A (mm ²)	$\tau_{\max}$ (Mpa)	$\Delta\tau \pm s$ (Mpa)
1	1	0,5	45	1,78	1,84	983,75	2025,00	0,49	0,58 ± 0,14
2	1	0,5	45	8,08	8,12	864,00	2025,00	0,43	
3	1	0,5	45	2,11	2,21	1529,74	2025,00	0,76	
4	1	0,5	45	2,50	2,55	1076,61	2025,00	0,53	
5	1	0,5	45	2,45	2,51	1408,62	2025,00	0,70	

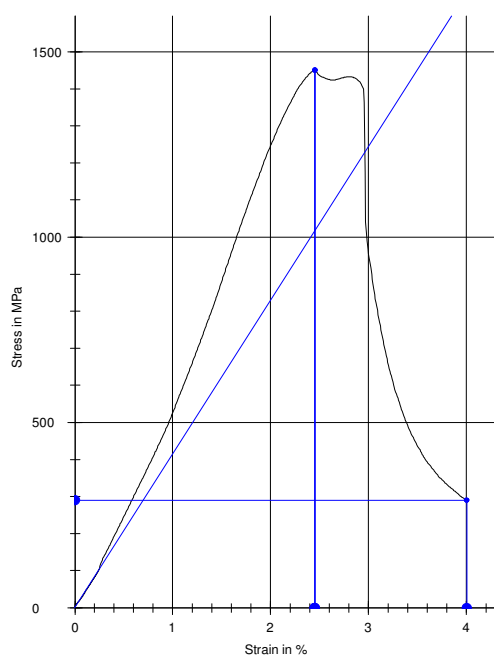
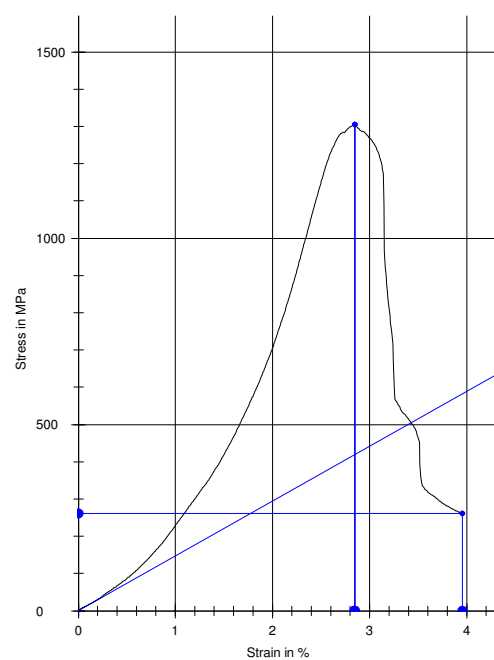
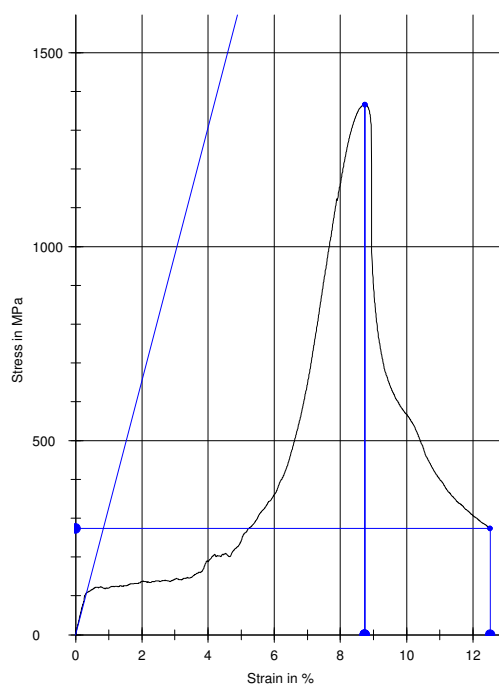
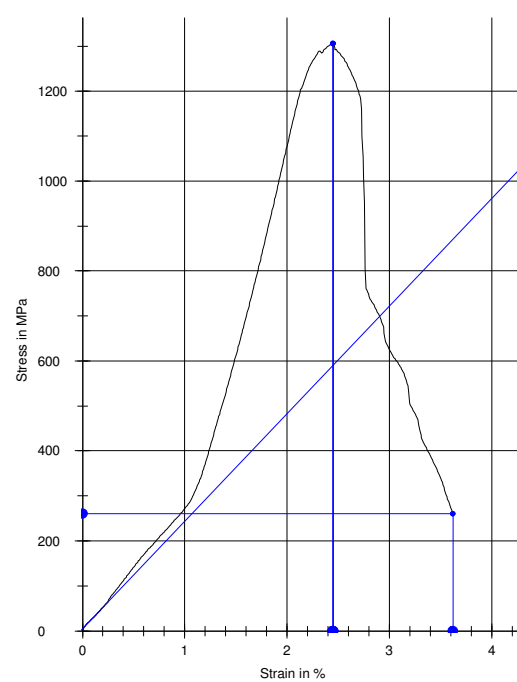
Tab. XII. Lepený spoj namáhaný šmykom – štatistické hodnoty (Terostat-9120)

n = 5	Rýchlosť (mm/min)	a (mm)	b (mm)	ε $\tau_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (mm)	ε $F_{\max}$ (%)
priemer	1	0,5	45,0	3,38	3,45	2,26
smer. odch.	0	0	0	2,64	2,63	1,76
var. koef.	0	0	1	78,05	76,29	78,05

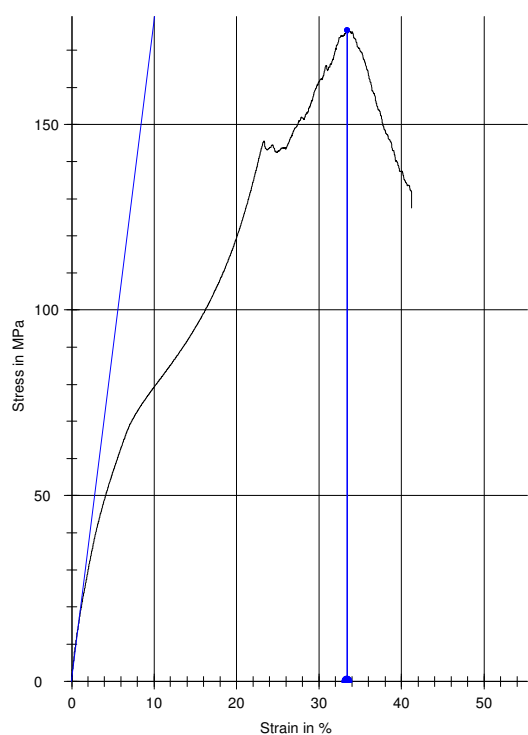
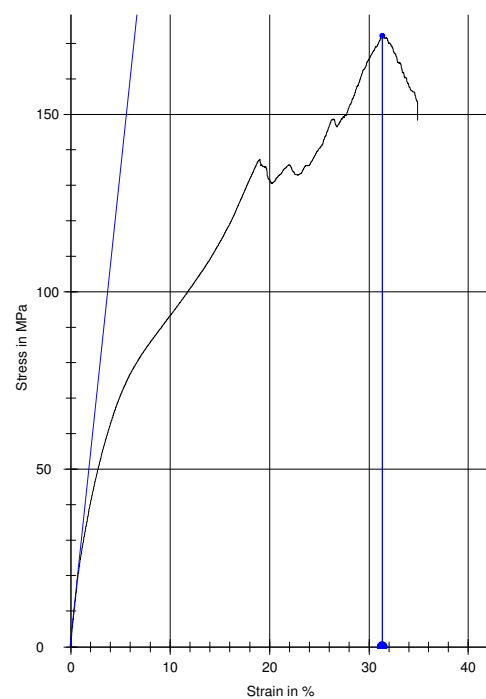
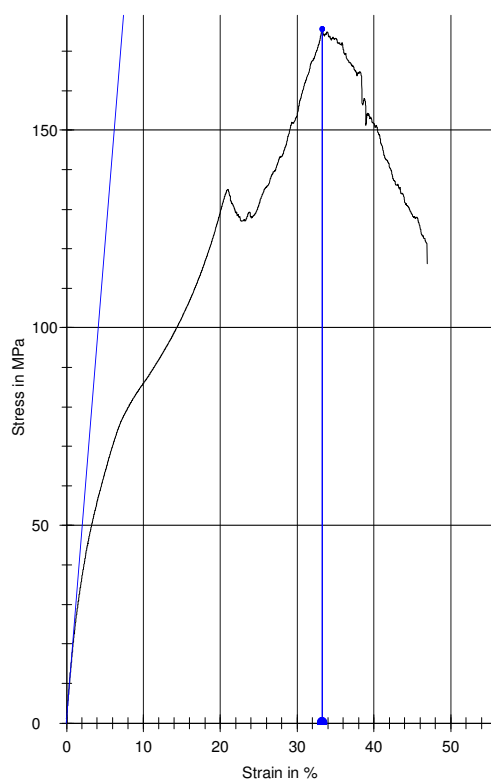
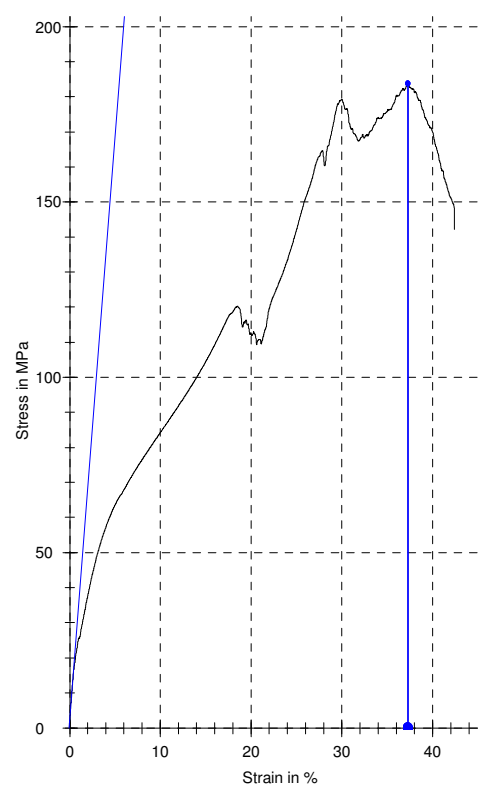
3.8 Trhacie krivky jednotlivých spojov

Na nasledujúcich grafoch je znázornený priebeh trhacích skúšok jednotlivých spojov.

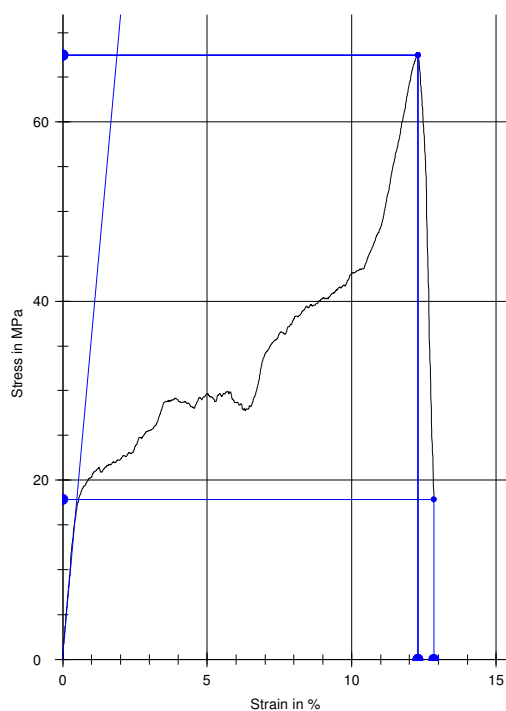
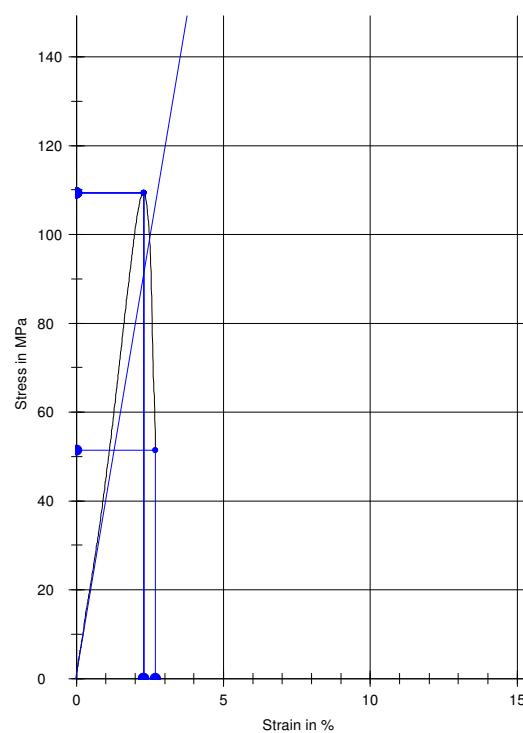
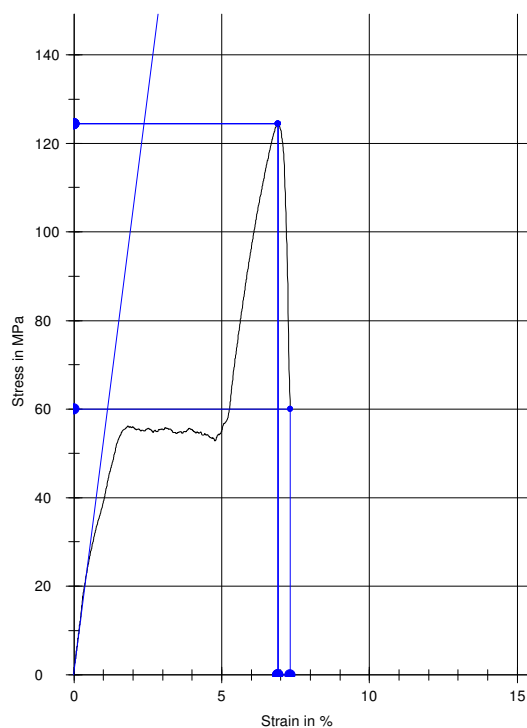
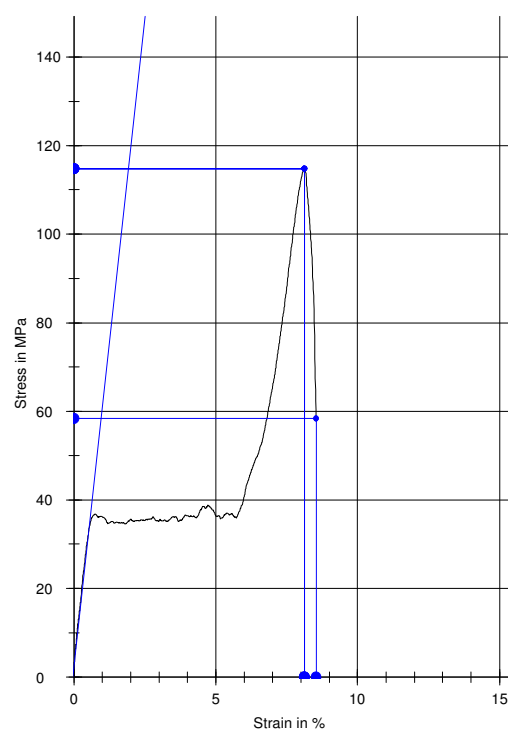
Obr. 14. – Obr. 17. Krivky bodových zvarov namáhaných v šmyku

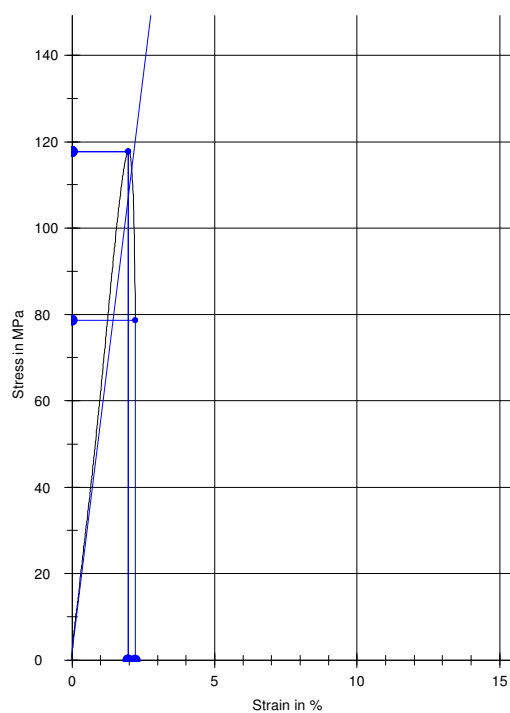
Obr. 14. σ - ε krivka pre šmyk BZ č.1Obr. 16. σ - ε krivka pre šmyk BZ č.2Obr. 15. σ - ε krivka pre šmyk BZ č.3Obr. 17. σ - ε krivka pre šmyk BZ č.4

Obr. 18. – Obr. 21. Krivky bodových zvarov namáhaných ťahom a ohybom

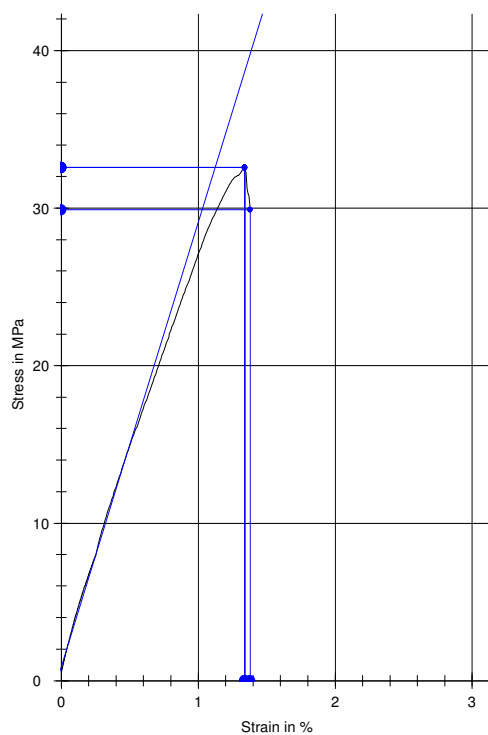
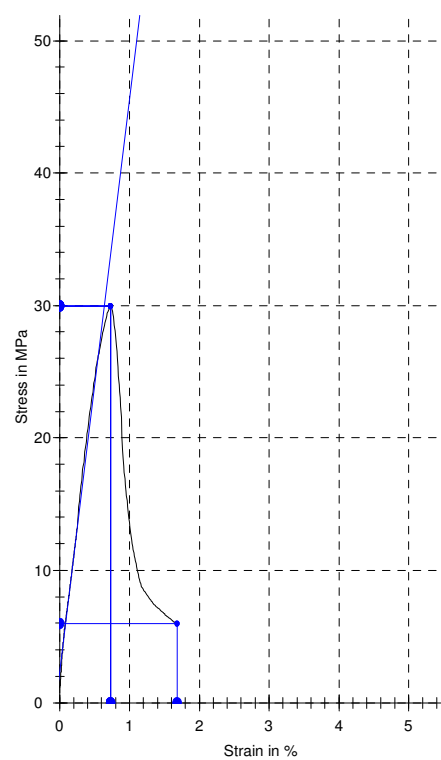
Obr. 18. σ - ϵ krivka pre ťah BZ č.1Obr. 20. σ - ϵ krivka pre ťah BZ č.3Obr. 19. σ - ϵ krivka pre ťah BZ č.2Obr. 21. σ - ϵ krivka pre ťah BZ č.4

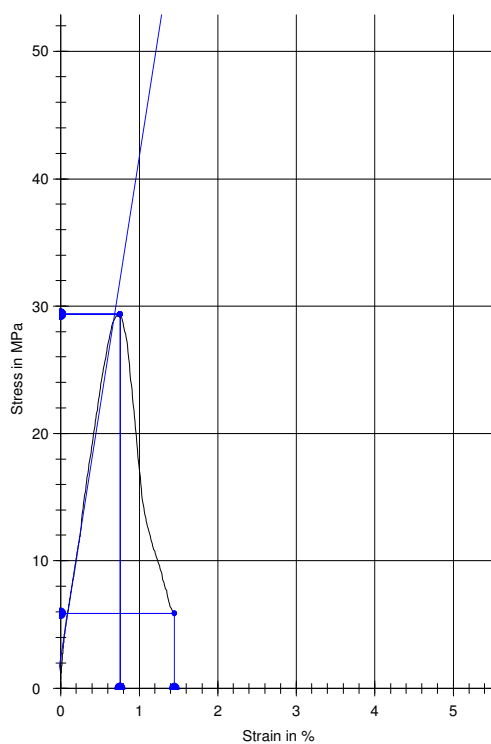
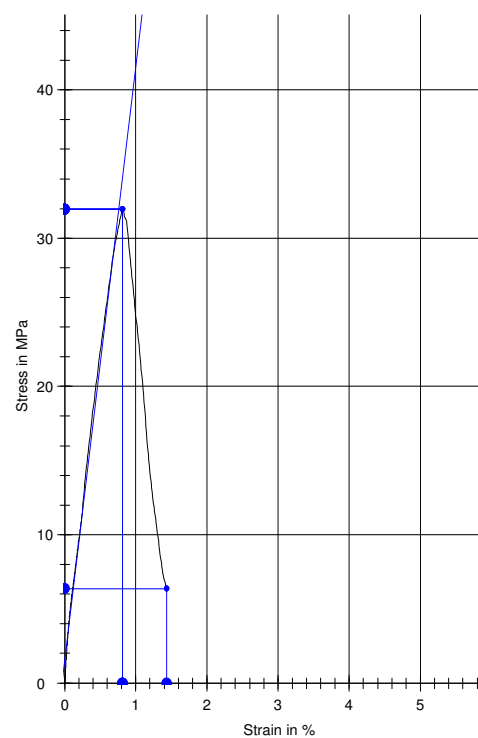
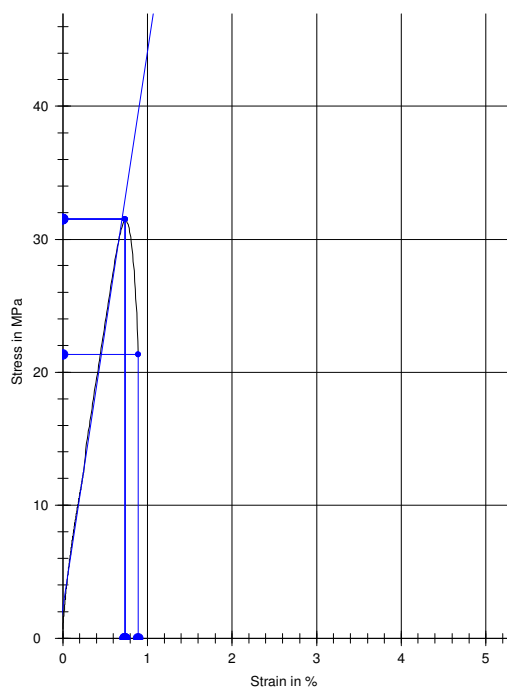
Obr. 22. – Obr. 26. Krivky lepených spojov - Lepidlo Terostat-9220

Obr. 22. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.1Obr. 24. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.3Obr. 23. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.2Obr. 25. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.4

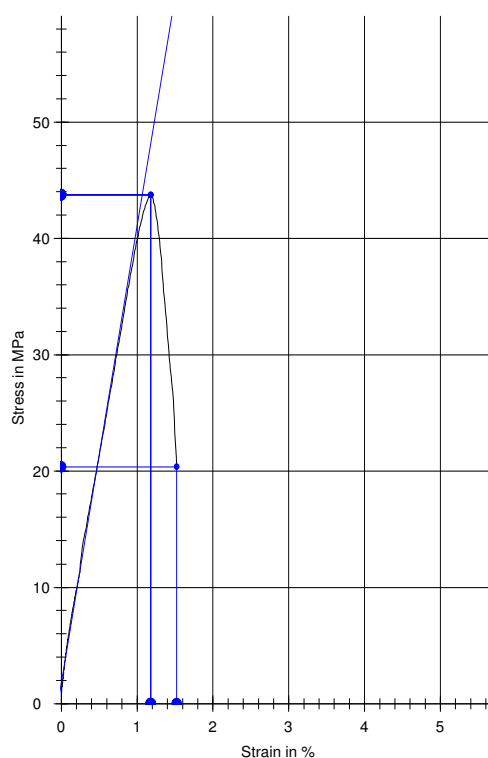
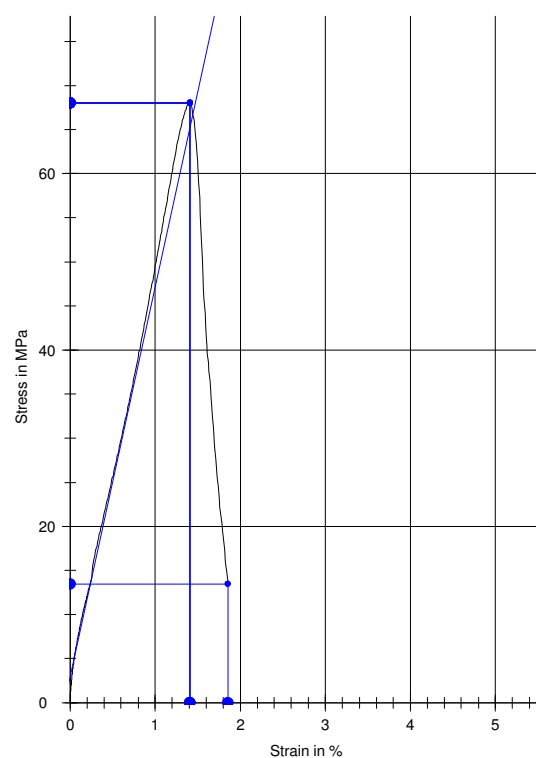
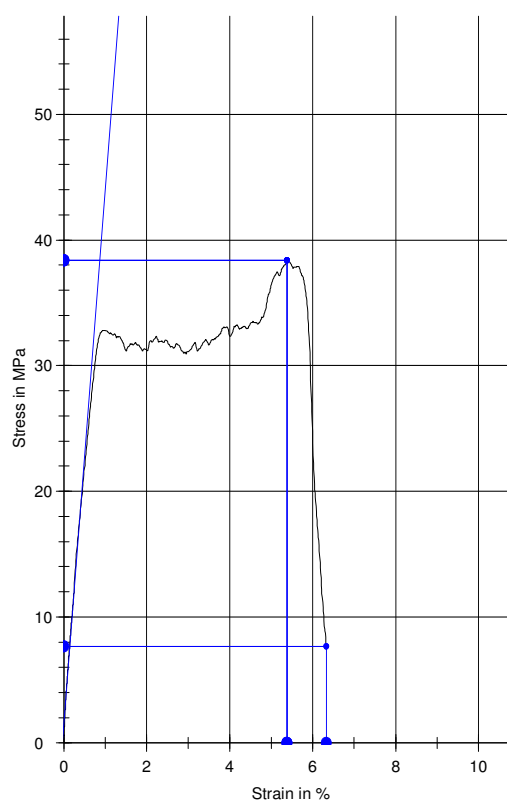
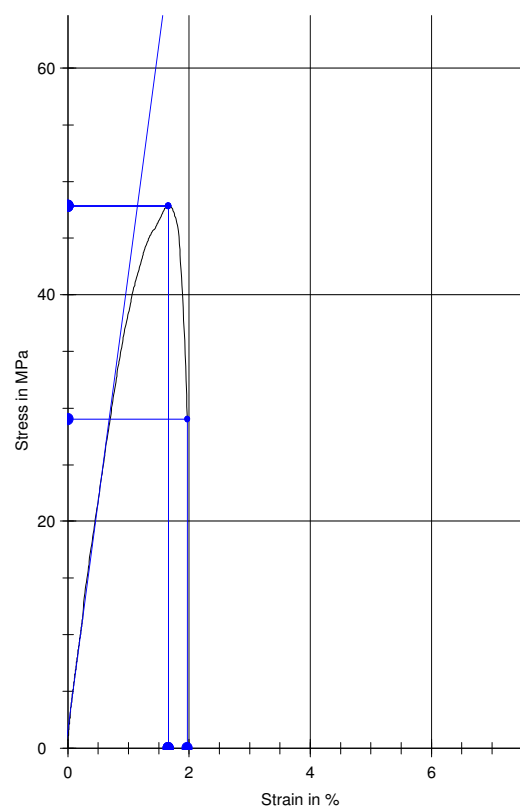
Obr. 26. σ - ε krivka pre šmyk LS č.5

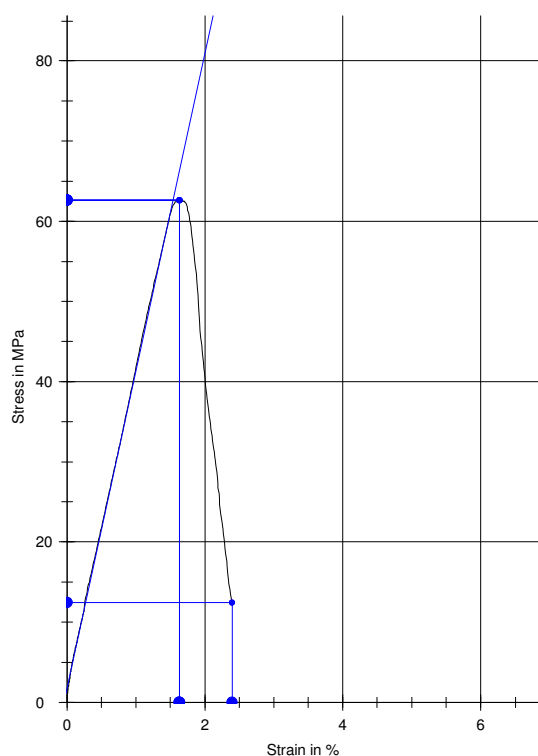
Obr. 27. – Obr. 31. Krivky lepených spojov - Lepidlo Terostat-8596

Obr. 27. σ - ε krivka pre šmyk LS č.1Obr. 29. σ - ε krivka pre šmyk LS č.2

Obr. 28. σ - ε krivka pre šmyk LS č.3Obr. 30. σ - ε krivka pre šmyk LS č.4Obr. 31. σ - ε krivka pre šmyk LS č.5

Obr. 32. – Obr. 36. Krivky lepených spojov - Lepidlo Terostat-9120

Obr. 32. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.1Obr. 34. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.3Obr. 33. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.2Obr. 35. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.4



Obr. 36. σ - ε krivka pre šmyk LS č.5

3.9 Aplikácia metódy konečných prvkov (MKP) pre riešenie napätosti lepeného spoja

3.9.1 Teoretický úvod

Metoda konečných prvkov (MKP) je numerická metóda, ktorej matematickým základom je diskretizácia úlohy. Tá spočíva v rozdelení skúmanej spojitej oblasti na konečný počet podoblastí, stručne nazývané konečnými prvkami. Jednotlivé konečné prvky sú spolu spojené v uzlových bodoch. V súčasnej dobe je to najrozšírenejší a najpoužívanější metóda pre riešenie úloh mechaniky kontinua.

Jej najrozšírenejšou variantou je deformačná metóda používajúca tzv. Lagrangeovské konečné prvky. Táto varianta vychádza z Lagrangeovho variačného princípu minima celkovej potenciálnej energie sústavy (teleso + jeho zaťaženie), resp. jeho vonkajších a vnútorných síl. Matematicky je princíp formulovaný rovnicou

$$\Pi = \Pi_i + \Pi_z = \min \quad (13)$$

kde

Π = celková potenciálna energia

Π_i = deformačná energia vnútorných síl telesa

Π_z = práca vonkajších síl

Tento princíp znamená, že zo všetkých kinematicky prípustných stavov pružného telesa nastáva taký stav, pre ktorý nadobúda potenciálna energia systému minimálnu hodnotu.

Stav napätosti v bode telesa je definovaný šiestimi zložkami tenzora napätia, ktoré je možné vyjadriť v tvare

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \tau_{xy} \ \tau_{xz} \ \tau_{yz}\} \quad (14)$$

celkový tenzor deformácie je možné vyjadriť

$$\{e\} = \{\varepsilon\} + \{\varepsilon_T\} \quad (15)$$

kde elastické pretvorenie

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{yz}\} \quad (16)$$

a pretvorenie od teploty

$$\{\varepsilon_T\} = \{\alpha\Delta T \ \alpha\Delta T \ \alpha\Delta T \ 0 \ 0 \ 0\} \quad (17)$$

Zobecnený Hookov zákon je možné vyjadriť rovnicou

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_T\}) \quad (18)$$

kde matice fyzikálnych konštánt

$$[D] = \frac{E}{1+\mu} \begin{bmatrix} a & b & b & & \\ b & a & a & & 0 \\ b & b & a & & \\ & & & c & \\ 0 & & & & c \\ & & & & & c \end{bmatrix} \quad (19)$$

kde

$$a = \frac{1-\nu}{1-2\nu} \quad b = \frac{\nu}{1-2\nu} \quad c = \frac{1}{2} \quad (20)$$

a ν - je Poissonova konštanta.

Zložky posuvov v každom bode sú funkciou troch súradníc, tzn.

$$u = f(x, y, z) \quad v = g(x, y, z) \quad w = h(x, y, z) \quad (21)$$

Pole posunutia každého elementu o r uzloch je možné vyjadriť v tvare

$$\left\{ \tilde{d} \right\}^e = \left\{ \begin{matrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \sum_{i=1}^r N_i(x, y, z) u_i \\ \sum_{i=1}^r N_i(x, y, z) v_i \\ \sum_{i=1}^r N_i(x, y, z) w_i \end{matrix} \right\} = [N] \{d\}^e \quad (22)$$

$$\text{kde} \quad {}^T \{d\}^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \dots \dots \ u_r \ v_r \ w_r] \quad (23)$$

a matica $[N]$ obsahuje interpolačné funkcie.

Zložky celkového tenzoru deformácie je možné vyjadriť ako

$$\begin{aligned}
e_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & e_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & e_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}
\end{aligned} \tag{24}$$

čo je možné zapísať maticovo

$$\{e\} = [B] \{d\}^e \tag{25}$$

kde $[B]$ je maticou diferenciálnych operátorov.

Dosadením rovnice (24) do (25) je možné vyjadriť veľkosť napätia v závislosti na posuvoch

$$\{\sigma\}^e = [D] ([B] \{d\}^e - \{\varepsilon_T\}) \tag{26}$$

Deformačná energia, matica tuhosti, vektor zaťaženia.

Celkovú potenciálnu energiu elementu pre spojité trojdimenzionálne teleso rozdelené do m elementov sa dá vyjadriť vzt'ahom

$$\Pi^e = \sum_{e=1}^m \Pi^e - \{d\}^T \{P\} \tag{27}$$

kde

$$\Pi^e = \Lambda^e - W_0^e - W_P^e \tag{28}$$

V rovnici (27) súčin $\{d\}^T \{P\}$ predstavuje prácu vykonanú sústredenými vonkajšími silami.

V maticovom tvare sa dá energetický funkcionál zapísať v tvare

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} [d]^e \left(\int_V [B]^T [D] [B] dV \right)^e \{d\}^e - \\ & - [d]^e \left(\int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_T\} dV + \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{Bmatrix} dV + \int_\Gamma [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\Gamma \right)^e \end{aligned} \quad (29)$$

V rovnici prvý a druhý integrál predstavujú potenciálnu energiu pretvorenia, tretí integrál predstavuje prácu vykonanú objemovými silami a posledný integrál prácu vykonanú rovnomerným zaťažením na povrchu oblasti Γ .

Pre rovnováhu systému nadobúda potenciálna energia minimum, tzn. že prvá variácia energetického potenciálu

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (30)$$

kde

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \left(\frac{\partial \Pi^e}{\partial u_i} \delta u_i + \frac{\partial \Pi^e}{\partial v_i} \delta v_i + \frac{\partial \Pi^e}{\partial w_i} \delta w_i \right) = 0 \quad (31)$$

Pretože jednotlivé variácie sú vzájomne nezávislé, musí pre každý element e oblasti platiť

$$\frac{\partial \Pi^e}{\partial u_i} = \frac{\partial \Pi^e}{\partial v_i} \delta = \frac{\partial \Pi^e}{\partial w_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (32)$$

Rovnica (32) vyjadruje podmienky pre zostavenie rovníc pre element. Maticová rovnica popisujúca uzol q sa skladá z troch rovníc, ktoré uvažujú vzájomný vzťah medzi posunmi u_i, v_i, w_i pro $i = 1, 2, \dots, r$ a tromi zložkami síl v uzle q .

Vztah sa dá zapísať maticovo

$$\begin{bmatrix} [k]^{q1} & [k]^{q2} & \dots & [k]^{qp} & \dots & [k]^{qr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_q \\ v_q \\ w_q \\ \vdots \\ u_r \\ v_r \\ w_r \end{Bmatrix} = \{f\}^q \quad (33)$$

kde $q = 1, 2, \dots, r$ $p = 1, 2, \dots, r$

Submatica $[k]^{qp}$ vyjadruje tuhostný vzťah medzi uzlami q a p a $\{f\}^q$ je výsledný vektor zaťaženia v uzle q . Tieto matice vypočítame dosadením (29) do (32) a dostávame

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \Pi^e}{\partial u_q} \\ \frac{\partial \Pi^e}{\partial v_q} \\ \frac{\partial \Pi^e}{\partial w_q} \end{Bmatrix} = 0 = \left(\int_V [B]_q^T [D] [B]_p \{d\}^e dV \right)^e - \left(\int_V [B]_q^T [D] [\varepsilon_T]_q dV \right)^e -$$

$$- \left(\int_V [N]_q^T \begin{Bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{Bmatrix} dV \right)^e - \left(\int_V [N]_q^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\Gamma \right)^e \quad (34)$$

Pre uzol q je možné rovnicu prepísať do tvaru

$$[k]^{qp} \{d\}^q = \{f_T\}^q + \{f_V\}^q + \{f_P\}^q = \{f\}^q \quad (35)$$

kde matica tuhosti pre uzol q

$$[k]^{qp} = \left(\int_V [B]_q^T [D] [B]_p dV \right)^e \quad (36)$$

a vektor zatáženia v uzle q je daný zvyšnými členmi rovnice (34). Pre element s r uzlami je celková tuhostná matica rádu $3r \times 3r$ a dá sa zapísať v tvare

$$[k]^e = \begin{bmatrix} [k]^{11} & \dots & [k]^{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ [k]^{r1} & \dots & [k]^{rr} \end{bmatrix} \quad (37)$$

alebo v maticovom tvare

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (38)$$

Po prevedení úprav dostávame štandardný tvar rovnice statickej analýzy pre element

$$[k]^e \{d\}^e = \{f\}^e \quad (39)$$

kde vektor zovšeobecnených posuvov

$$^T [d]^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \ u_r \ v_r \ w_r] \quad (40)$$

a vektor zatáženia v uzloch je

$$^T \{f\}^e = [\{f\}^1 \ \{f\}^2 \ \dots \ \{f\}^r] \quad (41)$$

kde r je počet uzlov na elemente.

Rovnice celého systému pre diskretizované teleso s m uzlami musí zahrňovať rovnice všetkých uzlov a má tvar

$$\begin{bmatrix} M \times M \\ K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M \times 1 \\ d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M \times 1 \\ f \end{Bmatrix} \quad (42)$$

kde

$M = 3m$ – pre 3-D úlohu

$M = 2m$ – pre 2-D úlohu

$[K]$ = matica tuhosti pre celý systém

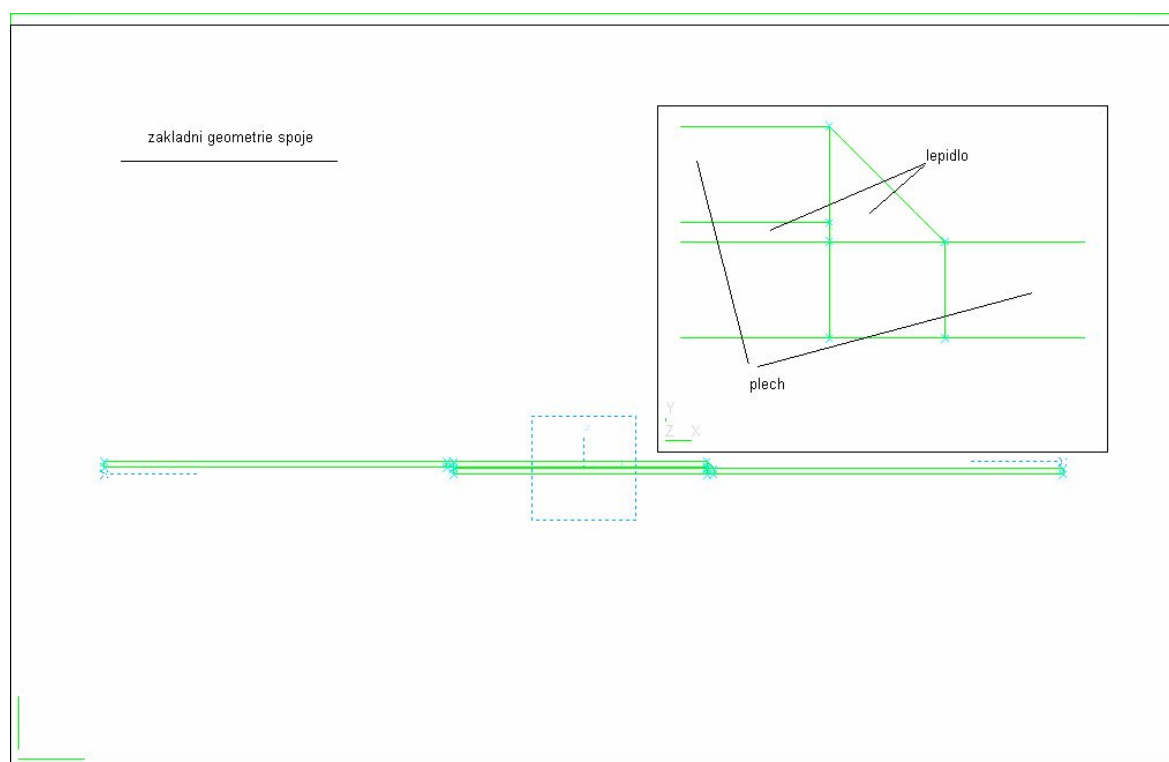
$\{d\}$ = vektor uzlových posunutí pre celý systém

$\{f\}$ = vektor výsledných síl v uzloch

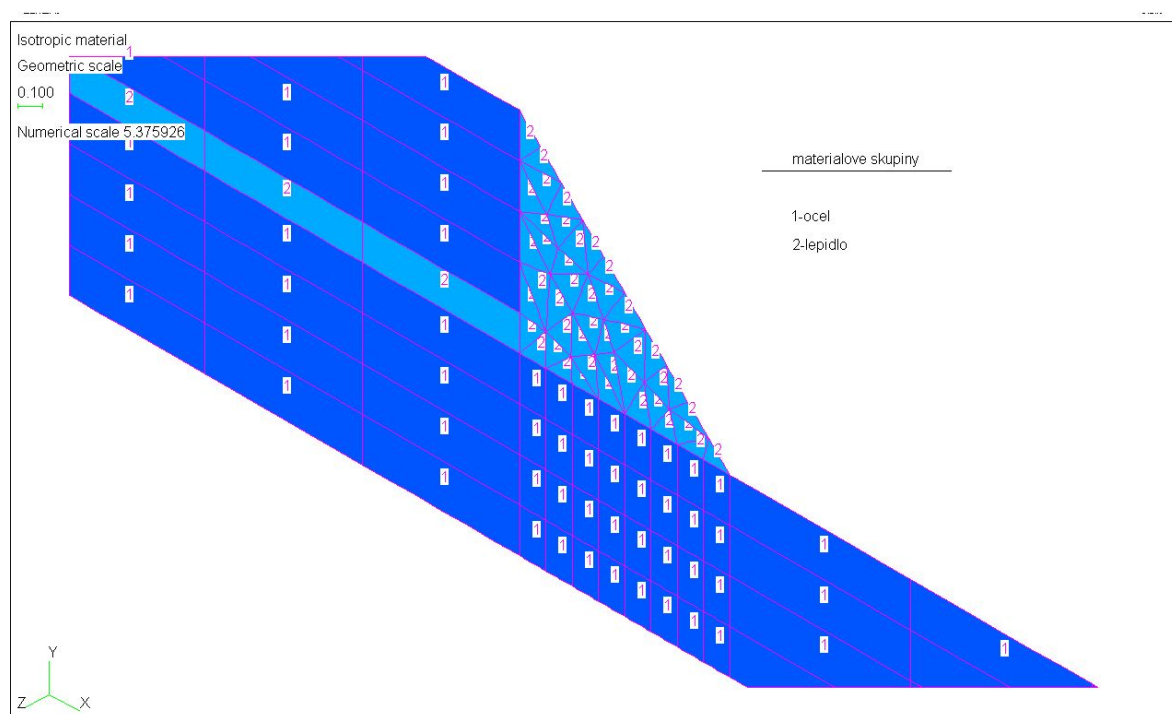
Výslednú rovnicu pre výpočet tenzoru napätia v závislosti na posuvoch a počiatočných pretvoreniach môžeme zapísať ako

$$\{\sigma\}^e = [C]^e [B]^e \{\delta\}^e - [C]^e \{\epsilon_0^*\}^e \quad (43)$$

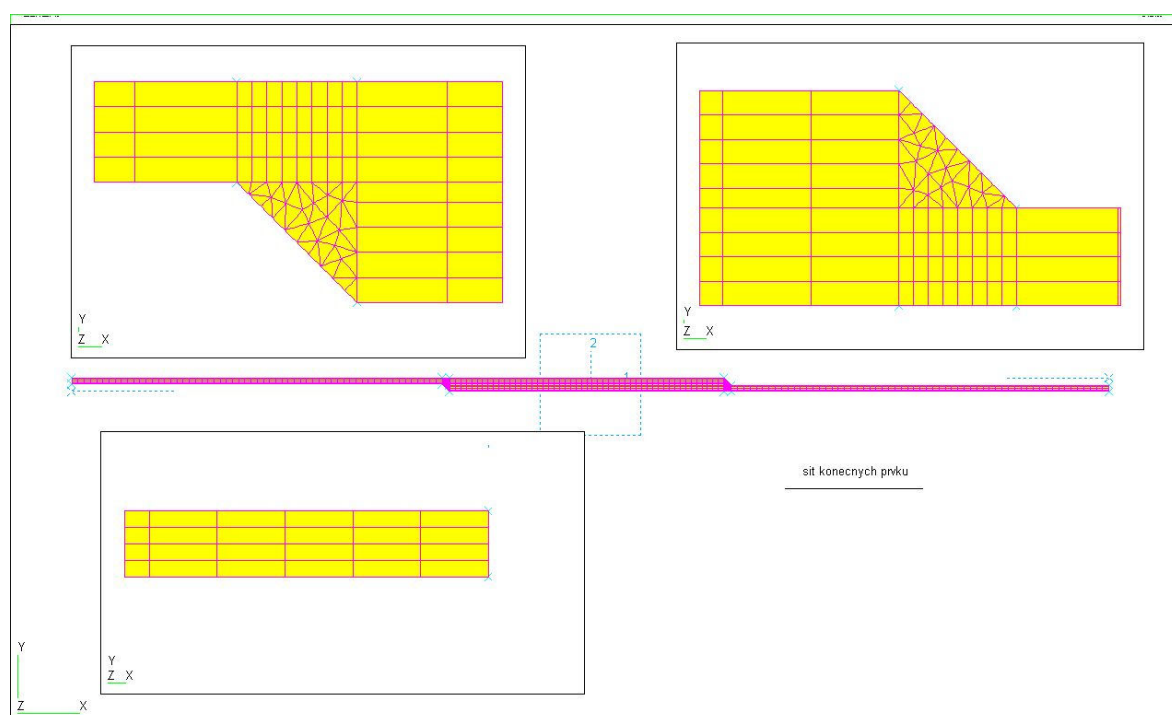
V prípade, že existujú počiatočné napätia, je nutné ich superponovať (19, 20, 21, 22).



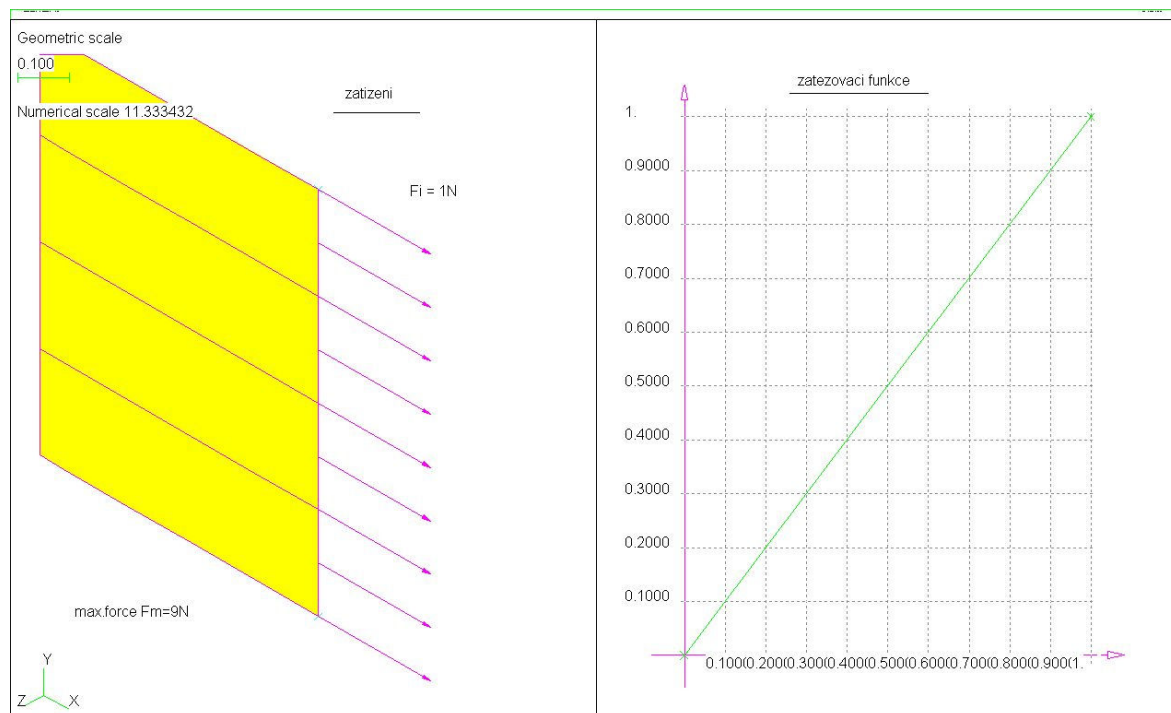
Obr. 37. Základná geometria lepeného spoja



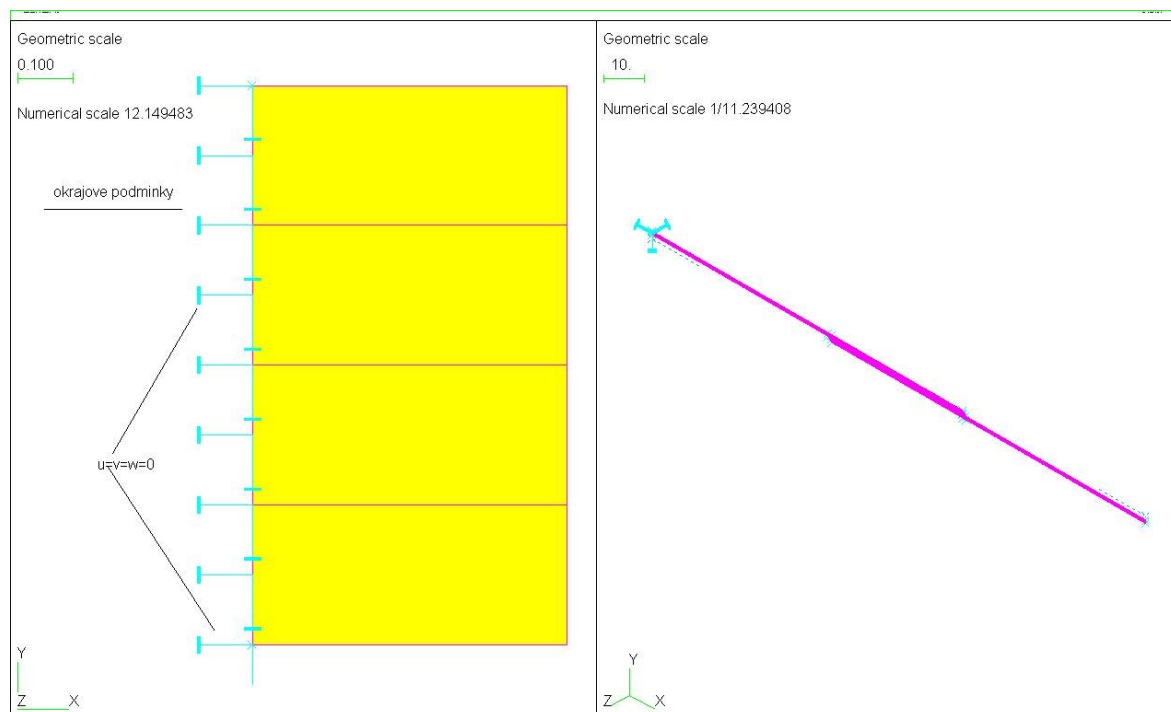
Obr. 38. Lepený spoj - materiály



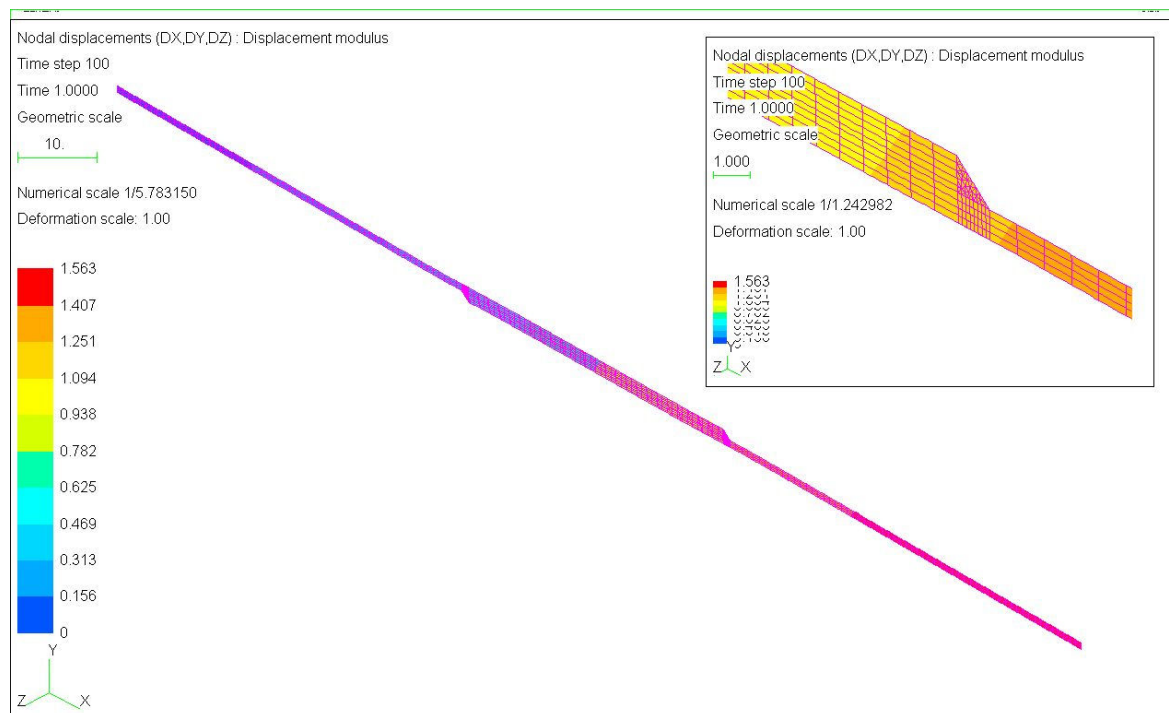
Obr. 39. Sít konečných prvků



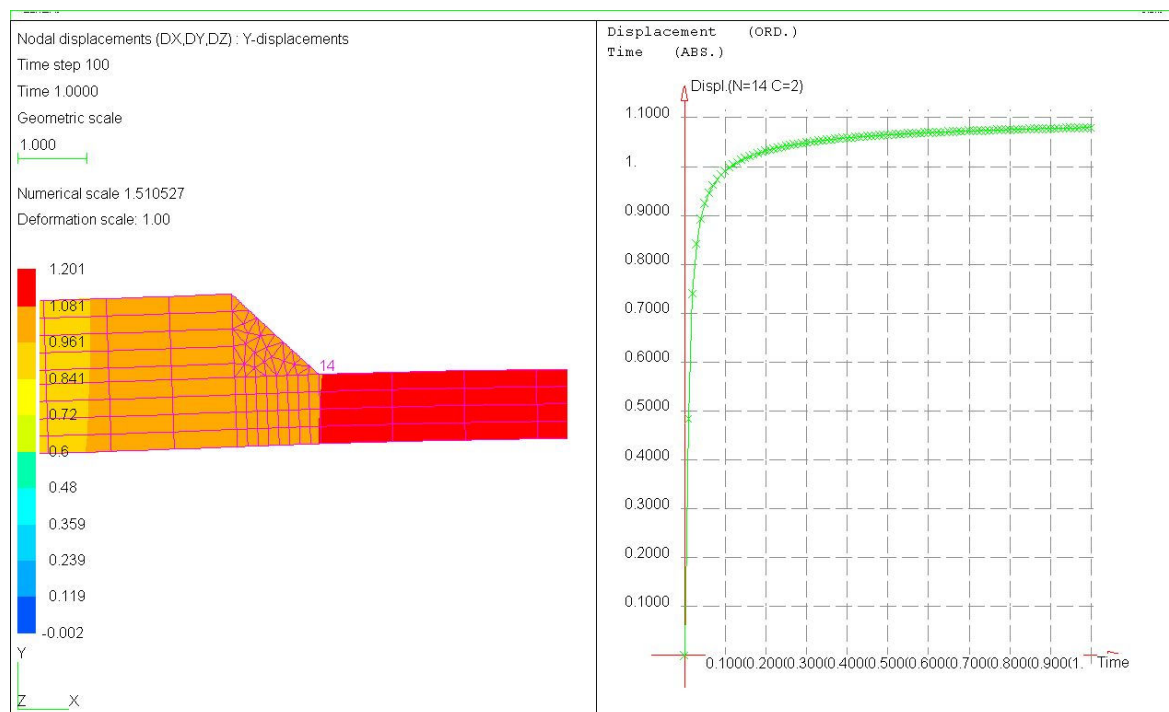
Obr. 40. Aplikácia zaťaženia na konce vzorky



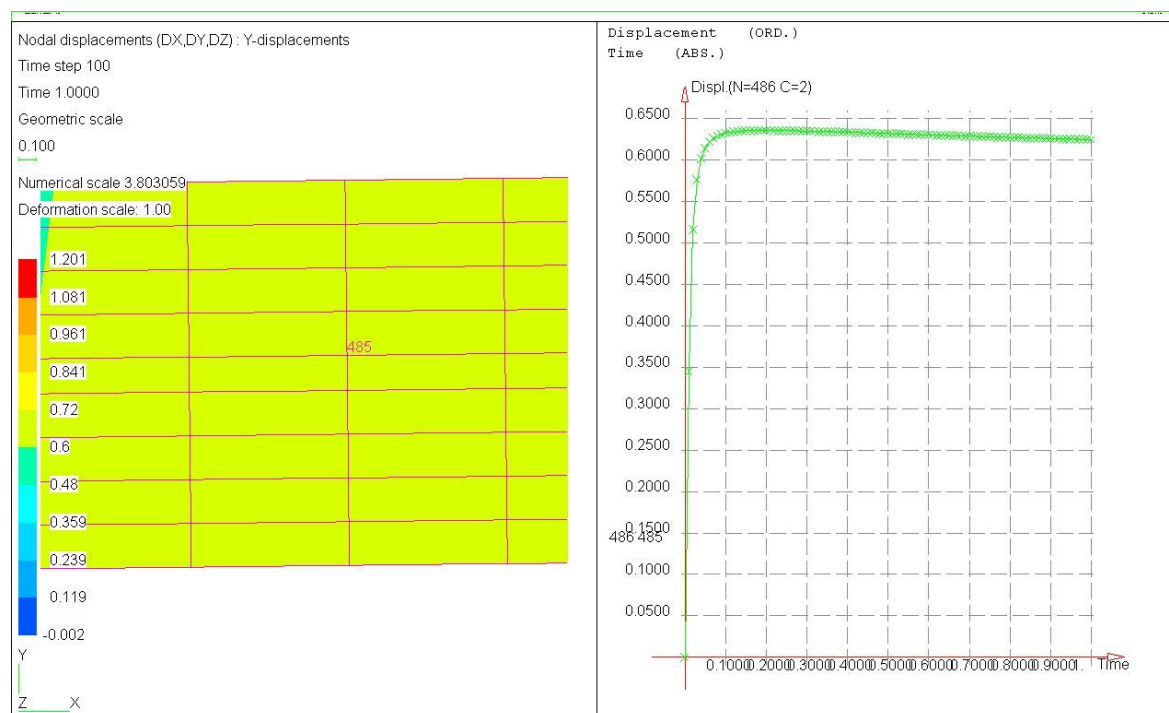
Obr. 41. Okrajové podmienky



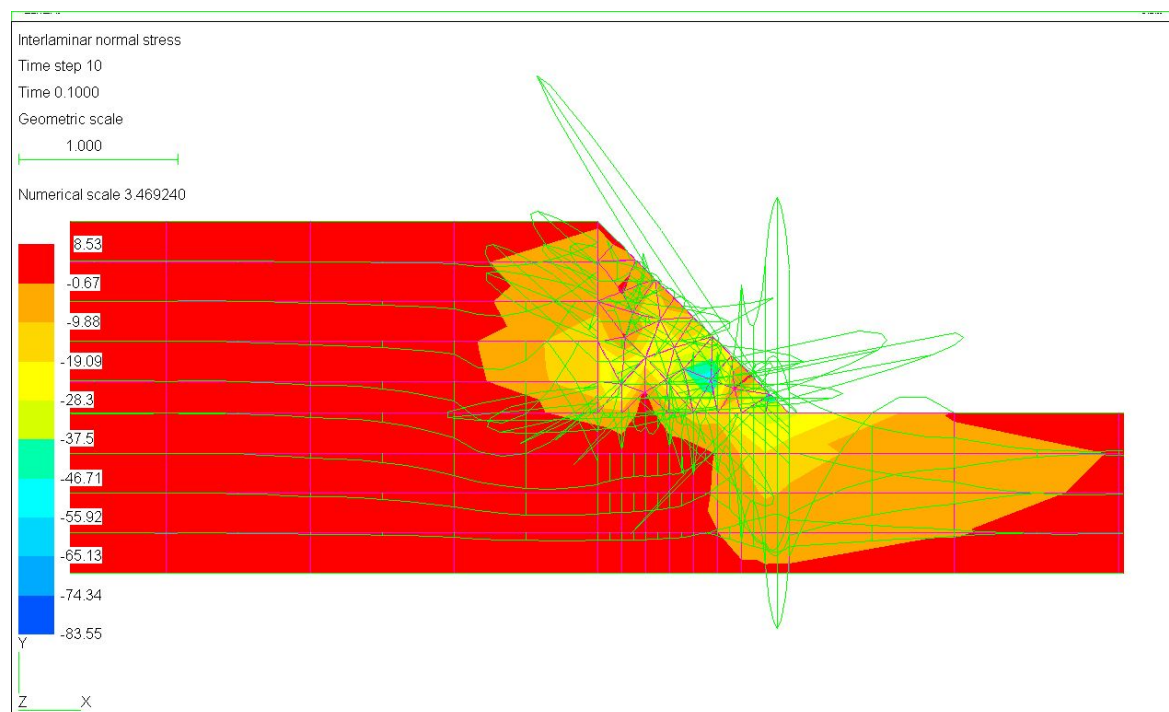
Obr. 42. Deformovaná vzorka



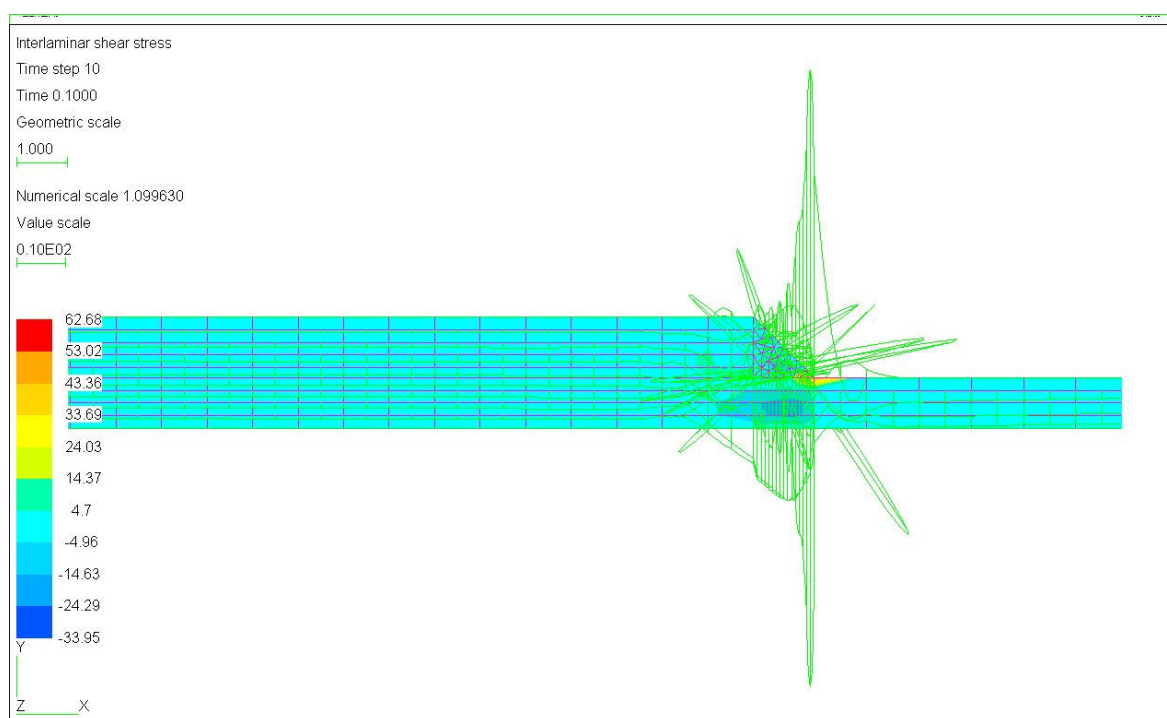
Obr. 43. Priebeh y – deformácie – uzel 14



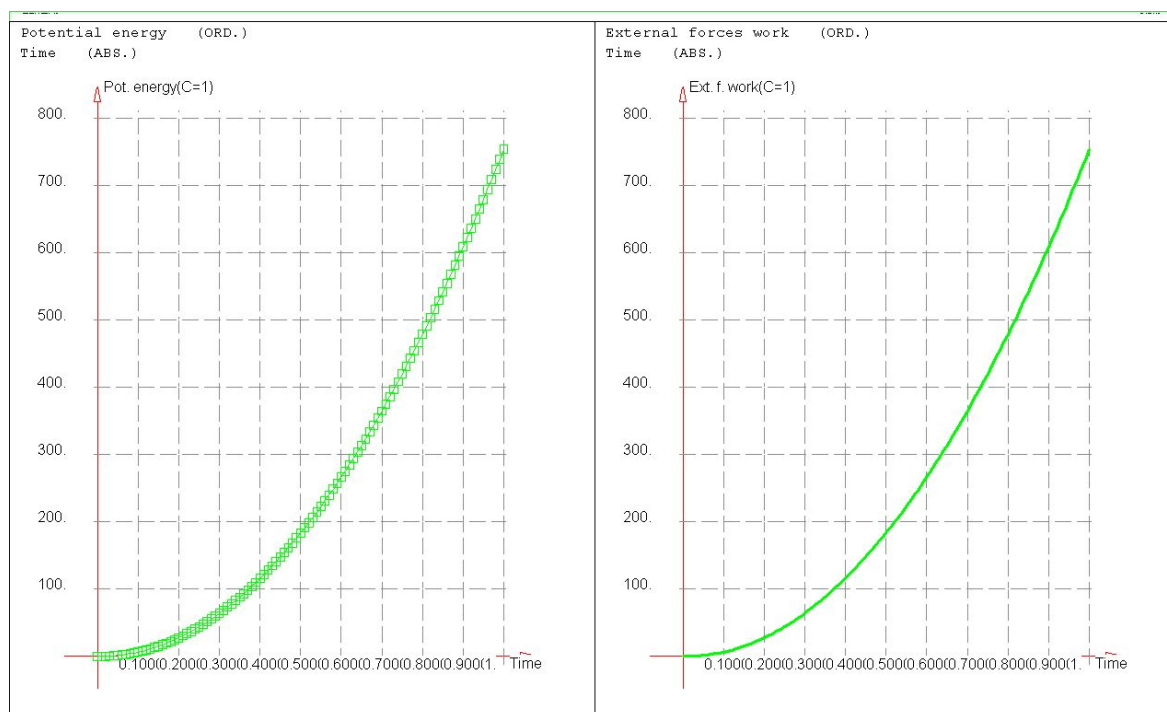
Obr. 44. Priebeh y – deformácie – uzel 485



Obr. 45. Interlaminárne normálové napätie



Obr. 46. Interlaminárne šmykové napätie



Obr. 47. Potenciálna energia – práca vonkajších síl

4 DISKUSIA VÝSLEDKOV

Úlohou tejto diplomovej práce bolo porovnať dva typy spájania konštrukčných materiálov. Konkrétne šlo o bodový zvar a lepený spoj, na ktoré boli aplikované zaťažovacie skúšky. Základným parametrom pre našu analýzu spoja bolo zistiť maximálnu silu $F_{\max}$ a tomu odpovedajúce napätie, ktoré daný spoj ešte vydržal a po prekonaní ktorého nasledovala deštrukcia spoja. Všetky testované vzorky s bodovými zvarmi dodala firma Avex spol. s r.o.. Lepené spoje sme zhotovili sami z rovnakých vzoriek, ako boli použité pri výrobe zváraných spojov, a tým boli zabezpečené rovnaké podmienky skúšky. Tieto vzorky nám taktiež dodala spomínaná firma. Lepidla dodala firma Hanák – Lepidlá & Tmely Uherské Hradište.

Najprv bol testovaný bodový zvar namáhaný šmykom. Grafické výsledky týchto skúšok sú zobrazené v obr. 14 až obr. 17 a numerické v tabuľkách č. III., IV. Namerané výsledky týchto vzorkou boli porovnateľné, ale vzorka č.3 (obr. 15) vykazovala pri počiatku zaťažovania odlišné hodnoty oproti ostatným vzorkám z tejto série. Vzhľadom k tomu, že maximálna hodnota napätia pri pretrhnutí odpovedá ostatným vzorkám predpokladáme, že pri začatí ťahovej skúšky došlo k posunu plechu v upínacích čelustiach. Inak v tejto sérii meraní boli numerické aj grafické výsledky jednotlivých vzoriek porovnateľné.

Následne bol testovaný bodový zvar namáhaný kombináciou ťahu a ohybu. Grafické výsledky týchto skúšok sú zobrazené v obr. 18 až obr. 21 a numerické v tabuľkách č. V., VI. Aj v tejto sérii boli výsledky jednotlivých skúšok vzájomne zrovnateľné, no v konečnom dôsledku tu boli dosahované radovo nižšie hodnoty maxím napätí v porovnaní s bodovým zvarom namáhaným vo šmyku. To bolo spôsobené práve prídavným ohybovým momentom. Práve to nás viedlo k tomu, že pri skúškach lepených spojov sme už skúšku v ťahu neuvažovali, pretože sa dalo predpokladať, že hodnoty pevnosti budú opäť nižšie.

V oboch skúškach bodových zvarov, či už uvažujeme šmyk alebo kombinovaný ťah a ohyb, nedochádzalo k porušeniu bodového zvaru, ale k porušeniu materiálu, čiže plechu okolo, z čoho sme usúdili, že pevnosť bodového zvaru je porovnateľná s pevnosťou plechu.

Lepený spoj u jednotlivých vzoriek zhotovený použitím lepidla Terostat-9220 vykazoval zrovnateľné hodnoty, u vzorky č. 1 boli hodnoty napätia nižšie. To bolo spôsobené tým, že sme túto vzorku podrobili šmykovej skúške po 12 hod., tj. v čase, keď

ešte dané lepidlo nebolo úplne vytvrdené. Skúšky ostatných vzoriek už boli prevádzané po 24 hodinách vytvrdzovania, čomu odpovedajú, ako som už spomínal, zrovnateľné výsledky nameraných hodnôt. Grafické výsledky týchto skúšok sú zobrazené v obr. 22 až 26 a numerické v tabuľkách č. VII., VIII.

U lepeného spoja zhotoveného použitím lepidla Terostat-8596 boli taktiež namerané porovnateľné výsledky v danej sérii, tj. u tohto typu lepidla. Grafické výsledky týchto skúšok sú zobrazené v obr. 27 až obr. 31 a numerické v tabuľkách č. IX., X. Hodnoty pevnosti tohto lepidla, boli v porovnaní s lepidlom Terostat-9220 približne štvornásobne menšie, čo sa ale dalo očakávať podľa katalógových údajov o tomto lepidle. Odporúčaná aplikácia tohto typu lepidla (viď. kapitolu 3.2.1) totiž nevyžaduje také vysoké pevnosti.

V sérii skúšok u lepidla Terostat-9120 boli tiež namerané porovnateľné výsledky. Len v grafický priebeh u vzorky číslo dva vykazuje rozdiely oproti ostatným vzorkám tejto série (viď. obr. 33). Vzhľadom k tomu, že hodnota maxima napätia odpovedá hodnotám maxím ostatných vzoriek tejto série predpokladáme, že daný rozdiel bol spôsobený posunom vzorky v upínacích čelustiach trhacieho zariadenia. Grafické výsledky týchto skúšok sú zobrazené v obr. 32 až obr. 36 a numerické v tabuľkách č. XI., XII. V celkovom porovnaní všetkých troch testovaných typov lepidla to boli hodnoty o približne polovicu nižšie ako u lepidla Terostat-9220 a skoro dvakrát vyššie ako u lepidla Terostat-8596.

Celkové porovnanie priemerných trhacích kriviek pre jednotlivé typy spojov a lepidiel je zrejmé z obr. 51. Viditeľný je rozdiel hlavne medzi pevnosťou bodového zvaru namáhaného šmykom a ostatnými vzorkami.

U vzoriek nalepených lepidlami Terostat-9220 a Terostat-8596 došlo ku kohéznemu porušeniu, čo znamená, že k porušeniu lepeného spoja došlo len vo vrstve lepidla, z čoho sa dá usudzovať, že tieto lepidlá majú veľmi dobrú adhéziu pri mechanickom namáhaní (viď obr. 48 a obr. 49).

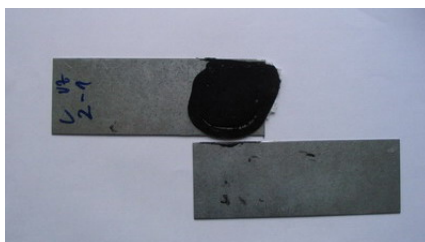


Obr. 48. Spôsob porušenia lepidla Terostat-9220

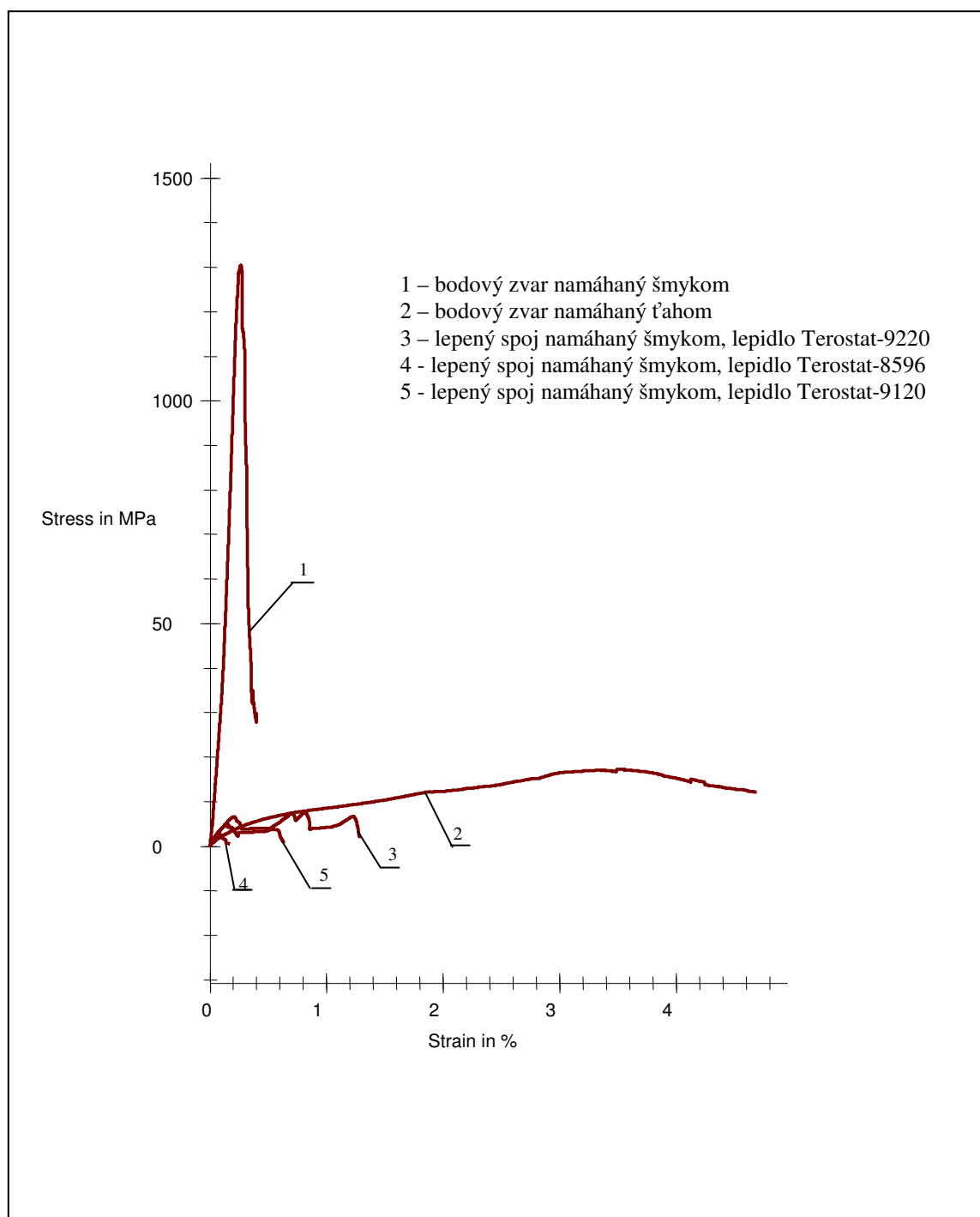


Obr. 49. Spôsob porušenia lepidla Terostat-8596

Na rozdiel od predchádzajúcich typov lepidiel, u lepidla Terostat-9120 došlo k adhéznemu typu porušenia, čo znamená, že k porušeniu lepeného spoja nedošlo vo vrstve lepidla, z čoho sa dá usudzovať, že tieto lepidlá majú veľmi zlú adhéziu pri mechanickom namáhaní (viď obr. 50).



Obr. 50. Spôsob porušenia lepidla Terostat-9120



Obr. 51. Porovnanie trhacích kriviek jednotlivých spojov.

Pozn.: hodnoty v grafe sú skreslené – neodpovedajú skutočnosti, pretože sme nemohli použiť extensiometer (neumožňovala to konštrukcia vzoriek). Hodnoty slúžia len pre vzájomná porovnanie jednotlivých vzoriek.

K analýze napätosti lepeného spoja sme využili výpočtový program Samcef, takže sme vlastne na daný problém aplikovali metódu konečných prvkov.

Zaujímali nás prejavy interlaminárnych síl v lepenom spoji. Použili sme model pre rovinné pretvorenie a riešili sme to ako nelineárnu úlohu. Výsledky analýzy sú na obr. 38 až 47. Analýzou bolo dokázané, že napätie nieje v spoji rozložené rovnomerne. Špičky napätia sú v miestach tvarových diskontinuit, tj. v miestach preplatovania, konkrétne na koncoch preplatovania. Priebehy interlaminárnych šmykových a normálových napätí sú na obr. 45 a na obr. 46.

Aplikáciou metódy konečných prvkov na túto problematiku bol dokázaný teoretický predpoklad (viď. kapitola 3.5).

ZÁVER

V úvode sme si stanovili za cieľ zistiť, či je možné nahradiť bodové zvary pozinkovaných častí lepenými spojmi. Môžeme konštatovať, že áno, ale záleží od praktickej aplikácie danej súčiastky (daného spoja) a na nárokoch, ktoré sú v danej aplikácii na tento spoj kladené.

V aplikáciách, kde sa často nevyžaduje pevnosť bodových zvarov, no napriek tomu sú tam použité, je výhodnejšie použiť spoj lepený. Ďalšou vhodnou oblasťou pre použitie lepeného spoja sú aplikácie, ktoré vyžadujú primeranú pevnosť a súčasne aj tesniaci spoj alebo spoj, ktorý by nepodliehal korózii. Lepidlo, samozrejme záleží od druhu, takýto typ spoja môže zabezpečiť, nenarúša totiž povrch lepených materiálov. Napríklad u našich vzoriek pozinkovaných plechov, je to ideálne riešenie, pretože bodový zvar, ako už bolo spomínané, narušuje vrstvu zinku na povrchu plechu, a ten vplyvom vlhkosti podlieha korózii, čím sa znižuje životnosť spoja, a teda aj celej konštrukcie. Použitím vhodného lepidla sa tomu vyhneme a pri dôkladnom zohľadnení nárokov na daný spoj, tj. síl, ktoré naň budú pôsobiť, môžeme hovoriť o trvalom spoji. Pred aplikáciou určitého typu lepidla je ale potrebné spočítať a otestovať pevnosť daného lepeného spoja, aby nedošlo k jeho preťaženiu. Lepením sa znižujú energetické nároky, ale zvyšuje sa čas potrebný na zhotovenie spoja, aj keď na trhu sú už aj lepidlá s veľmi krátkou vytvrdzovacou dobou. Výhodou lepenia je aj to, že k tomu nepotrebujeme žiadne špeciálne nástroje a zariadenia, čo vedie k znižovaniu celkových nákladov.

Optimálne zvoliť najhospodárnejší spôsob spájania je úlohou konštruktéra. Pritom musí brať do úvahy základné kritéria a vyhodnotiť:

- čo sa rieši spojovaním častí
- očakávaný objem celkovej produkcie
- plánované a celkové investičné prostriedky
- výrobné a investičné náklady
- náklady na spojovací materiál a energiu
- možnosti zavedenia
- možnosti urýchlenia výroby

- možnosti pracoviště při ich súčasnom vybavení strojovým parkom a personálom

Obecne teda môžeme konštatovať, že použitie lepeného spoja závisí len od danej aplikácie a požiadaviek, ktoré musí spoj v tejto aplikácii splňovať. Táto požiadavka bola zadaná firmou Avex spol. s r.o.. Na základe nami získaných výsledkov môžeme konštatovať, že náhradu bodových zvarov lepením v produkcii tejto firmy je možné previesť:

- lepenie plechov na dná, bočnice a čela paliet (paletové hospodárstvo)
- lepenie plechov na bočnice vlečiek
- pri požiadavke zákazníka na spoj korózii odolný alebo tesniaci

Z hľadiska ekonomického by tento problém vyžadoval dôkladnú analýzu, z ktorej by bolo zrejmé, v akom vzťahu sú celkové cenové náklady lepenia v porovnaní so zvarovaním.

Domnievam sa, že táto problematika je veľmi rozsiahla a konečné rozhodnutie, či prevádzať náhrady bodových zvarov lepením je hlavne záležitosťou výrobcu, ktorý ale musí brať v úvahu želania zákazníkov.

Záverom je nutné podotknúť, že táto práca bola zameraná výhradne na žiarovo pozinkované plechy a výsledky nemusia platiť pre iné typy povlakov.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- (1) Kovačič, Ľ.: Lepenie kovov a plastov. Alfa, Bratislava, 1984.
- (2) Peterka, J.: Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. SNTL, Praha, 1980.
- (3) Komárek, Z.: Prehľad lepidiel. Alfa, Bratislava, 1987.
- (4) Záhorovská, H.: Optimalizace množství naneseného lepidla a viskozity při lepení disperzními akrylátovými lepidly. Diplomová práce, FT VUT, Zlín, 2000.
- (5) Strojírenská příručka. Zv. č. 8. Scientia s.r.o., Praha, 1998.
- (6) Kačer, P.: Hodnocení vlivu topografie povrchu plechu na pevnost lepeného spoja. Diplomová práce, FT VUT, Zlín, 2000.
- (7) Osten, M.: Práce s lepidly a tmely. SNTL, Praha, 1975.
- (8) Strojírenská příručka. Zv. č. 5. Scientia s.r.o., Praha, 1994.
- (9) Lipa, M.: Odporové zvarovanie. Weldtech, Bratislava, 1995. ISBN 80-88734-13-4.
- (10) Uher, V., Chorvát, C., Koseček, M. a Minárik, R.: Netradičné spôsoby zvarovania. Weldtech, Bratislava, 1998. ISBN 80-88734-14-2.
- (11) Blaščík, F., Pilárik, S., Žitňanský, M. a Polák, K.: Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarovania. Alfa, Bratislava, 1988.
- (12) Mechanical, Industrial and Technical Calculations, dostupné na Internetu: <http://www.mitcalc.com/>.
- (13) Žárové zinkování, firemná literatúra, Zinkovna Ostrava, dátum neznámy.
- (14) Lesnicko – drevařský server, dostupné na Internetu: <http://www.silvarium.cz/>.
- (15) Sejč, P. a Švec, P.: MIG/MAG zvarovanie a spájkovanie, Strojnícka fakulta STU, Bratislava, dostupné na Internetu: <http://www.tmvydavatelstvi.cz/>.
- (16) Zinkovna Roudnice N. L., s.r.o., dostupné na Internetu: <http://www.zinkovna.cz/>.
- (17) Opravy karosérii, Firemná literatúra, Teroson, LOCTITE, dátum neznámy.
- (18) Seznam českých technických norem, Český normalizační institut, Praha, 1998.
- (19) Kolář, V., Němec, I. a Kanický, V.: Principy a praxe metody konečných prvků, Praha, 1997.
- (20) Bittnar, Z. a Šejnoha, J.: Numerické metody mechaniky 1, ČVUT, Praha, 1992.
- (21) Bittnar, Z. a Šejnoha, J.: Numerické metody mechaniky 2, ČVUT, Praha, 1992.

- (22) Segerlind, L. J.: Applied Finite Element Analysis, John Willey, New York, 1984.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BZ	bodový zvar
ČSN	Česká státní norma
EN	Európska norma
LS	lepený spoj
MKP	Metóda konečných prvkov
A	nosná plocha (plocha spoja)
b	šírka spoja
F	zaťažujúca sila
I	Intenzita zvaracieho prúdu
k	bezpečnosť spoja
k^*	bezpečnosť
L	minimálny vzdialenosť dvoch zvarov
l_{opt}	dĺžka preplatovania
l_u	dĺžka prekrytia
M	moment
p	tlakové zaťaženie
p	Lagrangeov multiplikátor
p_x, p_y, p_z	zaťaženia rozložené na povrchu
Q	teplo
r	je počet uzlov na elemente
R	odpor (celkový odpor zváraného spoja)
R_e	medz klzu adherendu
R_m	pevnosť spoja
s	hrúbka zváraného plechu
S_a	hrúbka adherendu
t	čas zvarania (doba prechodu prúdu)
W	funkcia deformačnej energie
W_0^e	práca vykonaná objemovými silami
W_p^e	práca vykonaná rozloženým zaťažením
X^*, Y^*, Z^*	vyjádrenie objemových síl

γ	povrchové napätie
ν	je Poissonová konštanta
Π	celková potenciálna energia
Π_i	deformačná energia vnútorných síl telesa
Π_z	práca vonkajších síl
Π^e	celková potenciálna energia elementu
σ	ťahové napätie
σ_D	dovolené ťahové napätie
τ	šmykové napätie
τ_D	dovolené šmykové napätie
Θ	uhol zmäčania
$[B]$	maticou diferenciálnych operátorov
$[K]$	matica tuhosti pre celý systém
$[N]^T$	matica interpolačných funkcií
$\{d\}$	vektor uzlových posunutí pre celý systém
$\{f\}$	vektor výsledných síl v uzloch
${}^T\{f\}^e$	vektor zaťaženia v uzloch
$\{\varepsilon\}$	elastické pretvorenie
$\{\varepsilon_T\}$	elastické pretvorenie od teploty

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Namáhanie lepených spojov	18
Obr. 2. Zaťaženie lepených spojov	19
Obr. 3. Rozdelenie šmykového napätia vo vrstve lepidla po dĺžke	19
Obr. 4. Deformácia spojov v dôsledku ohybového momentu.....	20
Obr. 5. Spojovanie tyčí lepením	21
Obr. 6. Preplatovaný spoj.....	22
Obr. 7. Princíp bodového zvarovania	25
Obr. 8. Skrutkový spoj	34
Obr. 9. Technológia pozinkovania.....	35
Obr. 10. Rozdiel hrúbky povlaku u náteru a žiarového zinku	36
Obr. 11. Pričný rez, preplatovaný zvarový spoj	38
Obr. 12. Základné rozmery bodovo zváraných vzoriek	40
Obr. 13. Základné rozmery lepeného spoja	43
Obr. 14. σ - ϵ krivka pre šmyk BZ č.1	48
Obr. 15. σ - ϵ krivka pre šmyk BZ č.3	48
Obr. 16. σ - ϵ krivka pre šmyk BZ č.2	48
Obr. 17. σ - ϵ krivka pre šmyk BZ č.4	48
Obr. 18. σ - ϵ krivka pre ťah BZ č.1	49
Obr. 19. σ - ϵ krivka pre ťah BZ č.2	49
Obr. 20. σ - ϵ krivka pre ťah BZ č.3	49
Obr. 21. σ - ϵ krivka pre ťah BZ č.4	49
Obr. 22. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.1.....	50
Obr. 23. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.2.....	50
Obr. 24. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.3.....	50
Obr. 25. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.4.....	50
Obr. 26. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.5.....	51
Obr. 27. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.1.....	51
Obr. 29. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.2.....	51
Obr. 28. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.3.....	52
Obr. 30. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.4.....	52
Obr. 31. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.5.....	52
Obr. 32. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.1.....	53
Obr. 33. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.2.....	53
Obr. 34. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.3.....	53
Obr. 35. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.4.....	53
Obr. 36. σ - ϵ krivka pre šmyk LS č.5.....	54
Obr. 37. Základná geometria lepeného spoja.....	61
Obr. 38. Lepený spoj - materiály.....	62
Obr. 39. Sieť konečných prvkov	62
Obr. 40. Aplikácia zaťaženia na konce vzorky	63
Obr. 41. Okrajové podmienky	63
Obr. 42. Deformovaná vzorka	64
Obr. 43. Priebeh y – deformácie – uzol 14	64
Obr. 44. Priebeh y – deformácie – uzol 485	65
Obr. 45. Interlaminárne normálové napätie	65

Obr. 46. Interlaminárne šmykové napätie	66
Obr. 47. Potenciálna energia – práca vonkajších síl	66
Obr. 48. Spôsob porušenia lepidla Terostat-9220.....	68
Obr. 49. Spôsob porušenia lepidla Terostat-8596.....	69
Obr. 50. Spôsob porušenia lepidla Terostat-9120.....	69
Obr. 51. Porovnanie trhacích kriviek jednotlivých spojov.	70

SEZNAM TABULEK

Tab. I. Příklad hodnot parametrov pri bodovom zvaraní.....	26
Tab. II. Doporučené minimálne vzdialenosti bodových zvarov	27
Tab. III. Bodový zvar namáhaný šmykom	45
Tab. IV. Bodový zvar namáhaný šmykom – štatistické hodnoty.....	45
Tab. V. Bodový zvar namáhaný ťahom	45
Tab. VI. Bodový zvar namáhaný ťahom – štatistické hodnoty.....	45
Tab. VII. Lepený spoj namáhaný šmykom – lepidlo Terostat-9220	46
Tab. IIX. Lepený spoj namáhaný šmykom – štatistické hodnoty (Terostat-9220)	46
Tab. IX. Lepený spoj namáhaný šmykom – lepidlo Terostat-8596	46
Tab. X. Lepený spoj namáhaný šmykom – štatistické hodnoty (Terostat-8596).....	46
Tab. XI. Lepený spoj namáhaný šmykom – lepidlo Terostat-9120	47
Tab. XII. Lepený spoj namáhaný šmykom – štatistické hodnoty (Terostat-9120)	47