

prof. Ing. Robert Grega, PhD.

prof. Ing. Jozef Kuľka, PhD.

doc. Ing. Silvia Maláková, PhD.

Ing. Lucia Žul'ová

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Technická univerzita v Košiciach

2024

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pod'akovanie

Pod'akovanie patrí grantovej agentúre KEGA, ktorá prostredníctvom projektu: Vytvorenie interaktívneho nástroja pre zvýšenie zručností a kompetencií študentov v rámci výučby predmetov zameraných na tvorbu konštrukčnej dokumentácie, 037TUKÉ-4/2024, podporila vydanie tejto učebnice.

Lektori:

prof. Ing. Ján Viňaš, PhD.

doc. Ing. Milan Vaško, PhD.

© Robert Grega, 2024

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Obsah

Zoznam symbolov a skratiek	6
1 Úvod do konštruovania nerozoberateľných spojov	8
2 Zvarové spoje	12
2.1 Úvod k problematike zvárania	12
2.2 Príklady dobrej praxe	16
2.3 Výpočet zvarov	20
2.4 Tupé zvary	25
2.5 Kútový zvar	32
2.6 Zvarové spoje zaťažené rázom	54
2.7 Dierové a žliabkové zvary	55
2.8 Bodové zvary vyhotovené odporovým zváraním	56
2.9 Dynamicky namáhané zvary	58
2.9.1. Výpočet napätí zvaru od vonkajšieho zaťaženia	59
2.9.2 Charakteristika dynamického namáhania zvaru	60
2.9.3 Spôsob namáhania a Smithov diagram	61
2.9.4 Závislosť horného a stredného napätia	68
2.9.5 Závislosť amplitúdového a stredného napätia	74
2.9.6 Miera bezpečnosti zvarového spoja	76
2.9.7 Kontrola dynamicky namáhaného zvarového spoja v oblasti časovej pevnosti	79
2.9.8 Príklady dobrej praxe dynamicky namáhaného zvarového spoja	81
2.10 Konštruovanie zváraných tlakových zariadení	87
2.10.1 Prehľad predpisov a noriem pre navrhovanie tlakových zariadení	90
2.10.2 Materiál pre navrhovanie tlakových zariadení	93
2.10.3 Všeobecné požiadavky pre navrhovanie tlakových zariadení	98
2.10.4 Zaťaženie pôsobiace na konštrukciu tlakovej nádoby	99
2.10.5 Skúšanie tlakových nádob	101
2.10.6 Typy poškodenia tlakových nádob	102

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.10.7 Kategorizácia napätí tlakových nádob	104
2.10.8 Tlakové nádoby – pevnostný návrh podľa STN EN 13445	107
2.10.9 Inšpekcia a skúšanie tlakových nádob podľa STN EN 13445	118
2.11 Zvárané konštrukcie zo zliatin hliníka	121
2.11.1 Hliník a hliníkové zliatiny	122
2.11.2 Konštrukčné hliníkové zliatiny	129
2.11.3 Zváranie hliníkových zliatin	133
2.11.4 Zásady, pravidlá a metódy výpočtu a navrhovania konštrukcií zo zliatin hliníka	135
3 Nitované spoje	146
3.1 Rozdelenie nitovaných spojov	153
3.2 Konštruovanie nitovaných spojov	156
3.2.1 Navrhovanie nitov pre konštrukčné nitovanie	161
3.2.2 Navrhovanie nitov pre kotlové nitovanie	166
3.3 Účinnosť nitovaných spojov	171
3.4 Jednostranné nitované spoje	172
3.4.1 Pevnosť slepých nitov	178
3.5 Nitované spoje s nitmi so zápusťou hlavou	181
3.6 Nitovacie matice a skrutky	185
3.6.1 Lupeňové nitovacie matice	187
3.6.2 Výpočet nitovacích matic a nitovacích skrutiek	187
3.7 Lock Bolts	189
3.7.1 Jo-Bolts	193
3.7.2 Hi-Lok	195
3.7.3 Hi-Lite skrutky	196
3.7.4 HuckBolt skrutky	197
3.7.5 Taper-Lok skrutky	198
3.7.6 Hi-shear	199
3.8. Priame nitovanie	200

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

4 Lepené spoje	203
4.1 Úvod k problematike lepených spojov	203
4.2 Konštruovanie a výpočet lepených spojov	210
4.3 Príklady dobrej praxe	217
5 Spájkované spoje	220
5.1. Konštruovanie a výpočet spájkovaných spojov	224
6 Západkové spoje	232
6.1 Silové pomery v západkovom spoji	235
6.2 Napätie a deformácia západky	237
Použitá literatúra	246

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Zoznam symbolov a skratiek

k, n	koeficient/ súčiniteľ bezpečnosti	-
σ	normálové napätie	Pa, MPa
τ	šmykové napätie	Pa, MPa
p	napätie v tlaku	Pa, MPa
σ_{red}	redukované napätie	Pa, MPa
σ_c	medza únavy skúšobnej vzorky	Pa, MPa
σ_c^*	medza únavy skutočnej súčiastky	Pa, MPa
σ_N	nebezpečné napätie	Pa, MPa
σ_D	dovolené napätie	Pa, MPa
m	hmotnosť	kg
M_k	krútiaci moment	N.m
M_o	ohybový moment	N.m
M_T	trecí moment	N.m
E	modul pružnosti v ťahu	Pa, MPa
G	modul pružnosti v šmyku	Pa, MPa
d, D	priemer	m, mm
l, L	dĺžkový rozmer	m, mm
F	sila	N
F_Q	sila predpätia	N
ε	pomerne predĺženie	-
μ	Poissonova konštanta (číslo)	-
S	plocha, prierez	m ² , mm ²
W	prierezový modul	m ³ , mm ³
f	súčiniteľ trenia	-
N	počet cyklov	-
p	rozstup nitov	m, mm
$\gamma, \beta, \alpha, \varphi$	uhol	°

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

a, b, c, h	rozmer	m, mm
T, t	tolerancia	mm, μm
i	počet	-

Zoznam dolných indexov

N	normálová
T	tangenciálna
t	trecia
r	radiálna
A	axiálna
h	horná
n	dolná
m	stredná
a	amplitúda
1, 2, 3	poradové číslo
o	ohyb
k	krútenie
t	ťah
s	strih
D	dovolený

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

1 Úvod do konštruovania nerozoberateľných spojov

Konštruovanie nerozoberateľných spojov sa používa v takých typoch súčiastok a konštrukcií, kde sa predpokladá rovnaká životnosť všetkých spojovaných častí. Za nerozoberateľný spoj sa považuje taký konštrukčný spoj, ktorý je vytvorený bez možnosti demontáže spojených častí, vymeniteľnosti opotrebovaných častí a bez možnosti opätovnej montáže s použitím pôvodných súčiastok. Za nerozoberateľné spoje považujeme predovšetkým zvarané spoje, lepené spoje, spájkované spoje, nitované spoje a clipové, crimpové a hybridné spoje apod.

Z historického pohľadu patrilo nitovanie k prvým spôsobom spájania materiálov. Nitovanie bolo používané pri stavbe lodí, konštrukcií nosníkov, žeriavov a v iných oblastiach. Nitovanie sa používalo v stavebníctve v konštrukcii mostov, veží, stožiarov - Obr. 1.1a). V súčasnosti sa skôr nitované konštrukcie vyhotovujú len vo výrobných halách - Obr. 1.1b), menej priamo na mieste osadenia konštrukcií.

Veľká časť nitovania na mieste, kde sa uskutočňovalo, bola nahradená zvaraním alebo skrutkovaním.

Nitovanie je stále najrozšírenejším spôsobom spájania materiálov v leteckom priemysle - Obr. 1.2, kde sa využíva v celom ráme a krídlach lietadla, ktoré si zvyčajne vyžadujú stovky tisíc nitov.

Predovšetkým po skončení druhej svetovej vojny sa vo veľkej miere začali používať konštrukcie nerozoberateľných spojov vyhotovené pomocou zvarania. Zváranie, vďaka rýchlosti výroby, nahrádzalo nitovanie vo všetkých oblastiach priemyslu, dokonca sú známe prípady, keď zvarané konštrukcie nahradili aj výrobky odlievane alebo kované (odliatky prevodových skríň boli nahradené zvarencami). Zváranie má široké uplatnenie pri výrobe veľkorozmerových konštrukcií ale aj jednotlivých dielov o malých rozmeroch - Obr. 1.3.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



a) vyhotovené na mieste použitia



b) vyhotovené vo výrobných halách [8]

Obr. 1.1 Nitované spoje



Obr. 1.2 Nitované spoje lietadla

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



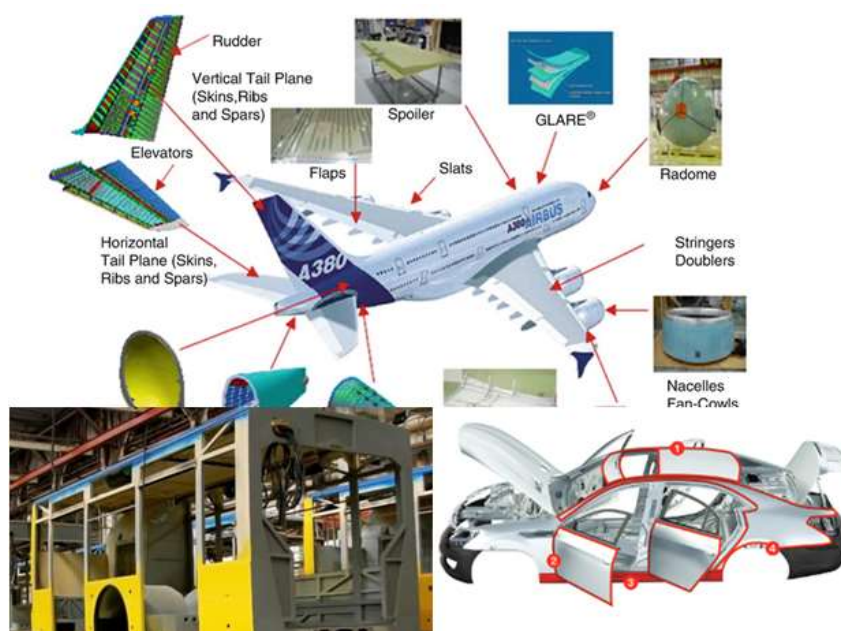
Obr. 1.3 Zvarové spoje

Najvýraznejšou nevýhodou zvarovania a nitovania, ako dvoch nosných technológií pre výrobu nerozoberateľných spojov, je veľká citlivosť na vrub. Vrubová citlivosť je hlavným dôvodom, prečo sú postupne zvarovanie a nitovanie nahrádzané ďalšími technológiami ako je spájkovanie a lepenie. V súčasnosti sa lepené spoje využívajú v čoraz širšom meradle aj v konštrukciách, ktoré sú dynamicky zaťažené. Lepené spoje je možné vo veľkom meradle nájsť v konštrukciách lodí, lietadiel automobilov – Obr. 1.4, ale aj v konštrukciách kozmických komponentov.

Veľmi dôležitým ukazovateľom, ktorý núti výskumníkov prichádzať s novými druhmi nerozoberateľných spojov, je emisný vplyv nerozoberateľných konštrukcií na oteplenie Zeme. Smerodajným je koeficient oteplenia (GWP – Global Warming Potential), ktorý sleduje vplyv výrobku na oteplenie Zeme, už od jeho výroby, cez aplikáciu až po recykláciu. Neporovnateľne vyššiu hodnotu bude mať koeficient GWP zvaranej konštrukcie ako koeficient GWP lepenej konštrukcie. Tento fakt je jedným

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

z dôvodov, prečo sa aj technológia nitovania opätovne aplikuje v podobe Lock Bolts, Jo Bolts, Hi Bolts, Rivnuts a pod. - Obr. 1.5.



Obr. 1.4 Lepené spoje [15, 16, 17]



Obr. 1.5 Lock Bolts

Aplikácia nových nekovových, kompozitných a sendvičových materiálov v nosných konštrukciách si vyžaduje kombináciu rôznych spôsobov pre ich spájanie. Stále väčšie uplatnenie v súčasnosti získavajú také nerozoberateľné spoje, ktoré sú schopné multiplikovať výhody jednotlivých spojov. Takto vyhotovené konštrukčné spoje sa nazývajú hybridné spoje.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2 Zvárané spoje

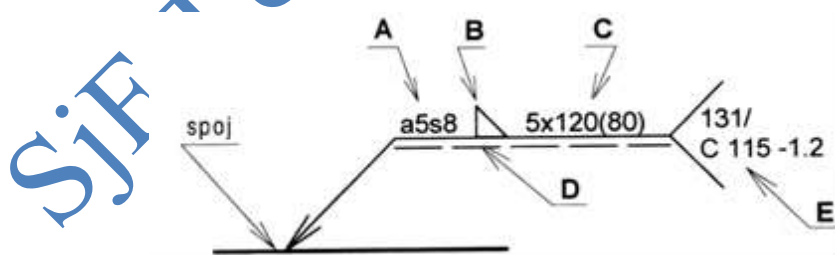
Zvárané spoje patria k najbežnejším a najrozšírenejším druhom nerozoberateľných spojov. Zváranými spojmi je možné vytvárať konštrukčné uzly, ktoré sú tvorené rúrami, tenkými plechmi alebo tvarovo zložitými súčiastkami. Zváranými spojmi sú vytvárané strojné celky s veľkými rozmermi, zložitými tvarmi a spoje pre použitie v extrémnych podmienkach a pod. Zváranie je vysoko progresívna metóda tvorby konštrukčných spojov. Zvárané konštrukcie sa vyznačujú vysokou tuhosťou, jednoduchosťou a spoľahlivosťou. K nevýhodám zváraných spojov patrí tepelné ovplyvňovanie spájaných komponentov, ktoré vedie k zmene štruktúry materiálu v blízkosti zvaru.

2.1 Úvod k problematike zvárania

Zváranie je spájanie kovových súčiastok do nerozoberateľného celku pri pôsobení tepla, tlaku alebo tepla a tlaku. Takto vzniknutý nerozoberateľný celok sa nazýva *zvarok* (zvarenec), resp. *zváraná konštrukcia*.

Zvary sa na výkresoch nevykresľujú, ale označujú sa značkami umiestnenými na odkazových čiarami spolu s ostatnými údajmi potrebnými na úplné predpísanie zvaru - Obr. 2.1.

Označovanie je podrobne vysvetlené v *STN EN 22553 (01 3155): (Zvárané a spájkované spoje. Označovanie na výkresoch.)*.



Obr. 2.1 Umiestnenie údajov o zvare na odkazovej čiare:

- A – miesto určené na uvedenie charakteristického rozmeru zvaru,
- B – miesto na umiestnenie značiek zvaru,
- C – miesto na zápis dĺžkových rozmerov zvaru,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

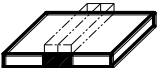
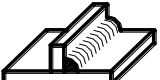
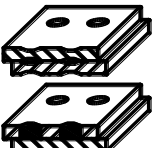
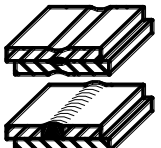
D – čiarkovaná čiara zástavky určujúca polohu zvaru,

E – vidlica odkazovej čiary na zápis ostatných údajov o zvaraní.

Podľa prierezu zvaru, polohy zváraných súčiastok a úpravy zvarovaných častí v mieste zvárania sa zvary rozdeľujú na lemové, tupé (I,V,1/2V,U..), kútové, dierové a žliabkové.

V Tab. 2.1 sú uvedené niektoré druhy najčastejšie používaných zvarov a základné značky, ktorými sa tieto zvary na výkresoch označujú.

Tab. 2.1. Označovanie zvarov

Názov zvaru	Zobrazenie	Značka	Názov zvaru	Zobrazenie	Značka
Lemový zvar *			Lemový zvar **		
V zvar			1/2V zvar		
Dvojstranný V zvar			Dvojstranný 1/2 V zvar		
I zvar			Y zvar		
U zvar			Dvojstranný Y zvar		
Dvojstranný U zvar			V zvar ***		
Kútový zvar			Dierový zvar		
Bodový zvar			Švový zvar		

* - Lemový zvar s úplne roztavenými lemami.

** - Lemový zvar s neúplne roztavenými lemami.

*** - V zvar so strmými zvarovými plochami.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pre úplné označenie zvaru je potrebné správne použiť základné a doplňujúce značky. *Základné značky* predpisujú daný typ zvaru. *Doplňujúce značky* predpisujú tvar vonkajšieho povrchu zvaru - Tab. 2.2. Ak sa tvar vonkajšieho povrchu zvaru nepredpisuje, doplňujúca značka sa neuvádza.

Tab. 2.2 Doplňujúce značky zvarov

Tvar zvaru alebo jeho povrchu	Značka	Tvar zvaru alebo jeho povrchu	Značka
Plochý		obrobené prechody zvaru	
Prevýšený		privarená podložka	
Preliačený		odstrániteľná podložka	

Zvary možno predpísať rozmermi, ktoré určujú priečny prierez zvaru. Tieto sa umiestňujú pred základnou značkou zvaru. Rozmery, ktoré určujú pozdĺžne rozmery zvaru, sa zapisujú za základnou značkou zvaru. Rozmery priečného rozmeru zvaru sú definované charakteristickým rozmerom zvaru. Pre tupé a lemové zvary je charakteristickým rozmerom zvaru vzdialenosť s od povrchu súčiastok zvaru po dno závaru, ktorá nemôže byť väčšia ako je hrúbka tenšieho prvku. Tupé zvary, pri ktorých nie je uvedený charakteristický rozmer zvaru, sú prevarené po celej hrúbke zvaru.

Pre kútové zvary môže byť charakteristickým rozmerom zvaru výška najväčšieho rovnostranného trojuholníka vpísaného do prierezu zvaru a alebo odvesna trojuholníka z , pričom platí $z = a \cdot \sqrt{2}$. Preto je potrebné pred číselnú hodnotu charakteristického rozmeru kútového zvaru napísať vždy aj označenie a , resp. z . U kútových zvarov možno ako ďalší rozmer zvaru určiť hĺbku prievaru s .

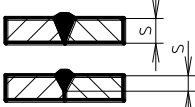
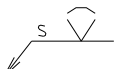
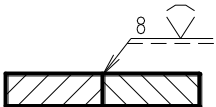
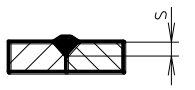
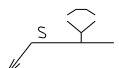
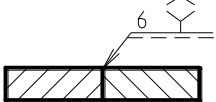
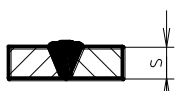
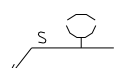
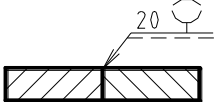
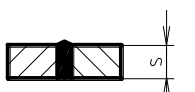
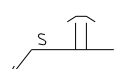
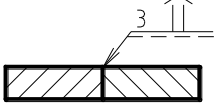
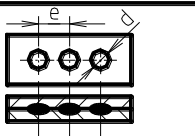
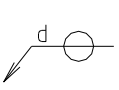
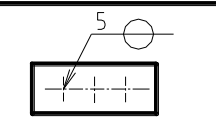
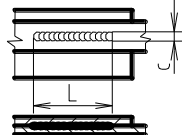
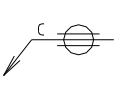
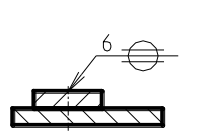
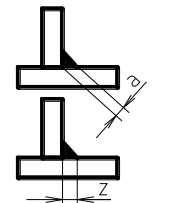
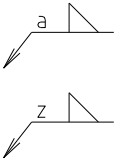
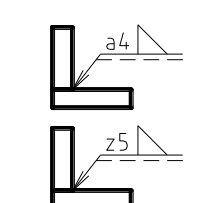
Pre bodové zvary je charakteristickým rozmerom priemer zvarovacej šošovky d a pri švových zvaroch šírka zvaru c .

Za značkou zvaru sa podľa potreby uvádzajú pozdĺžne rozmery zvaru, ktorými sú napríklad *dĺžka zvaru*, *počet zvarov*, *dĺžka prerušenia pri prerušovanom zvare* alebo *rozstup zvarov* (napr. u bodových zvarov).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Za dĺžku zvaru sa považuje „čistá“ dĺžka zvaru, t. j. dĺžka bez koncových kráterov. Ak za značkou zvaru nie je uvedený rozmer, znamená to, že zvar je vyhotovený po celej dĺžke súčiastky zvarku.

Tab. 2.3 Príklady predpisov charakteristických rozmerov zvarov

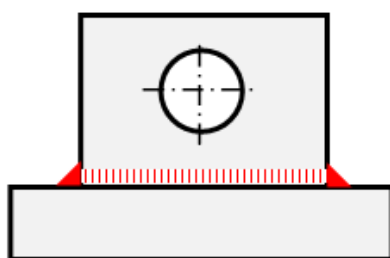
Názov zvaru	Zobrazenie	Označenie	Príklad predpisu na výkrese
Vzvar			pre $s = 8$ 
Yzvar			pre $s = 6$ 
Uzvar			pre $s = 20$ 
I			pre $s = 3$ 
Bodový zvar			pre $d = 5$ 
Švový zvar			pre $c = 6$ 
Kútový zvar			pre $a = 4$ pre $z = 5$ 

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

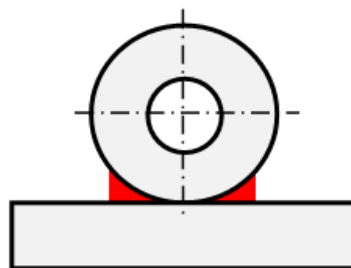
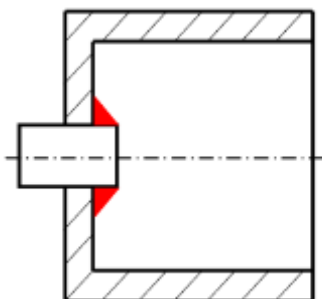
2.2 Príklady dobrej praxe

Na nasledujúcich obrázkoch je uvedených niekoľko riešení zvarových spojov. Samotné usporiadanie zvaru má veľký význam na jeho výslednú funkčnosť. Nižšie je uvedených sedem prípadov vyskytujúcich sa pri konštruovaní zváraných spojov, je vhodné aby boli dodržané základné zásady.

1. Miesto pre vytvorenie zvaru musí byť dobre prístupné.



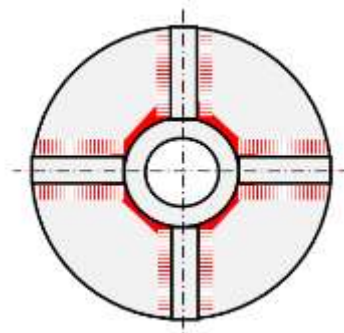
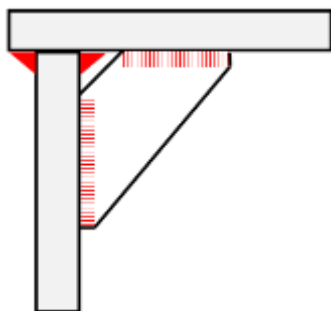
Vhodné riešenie



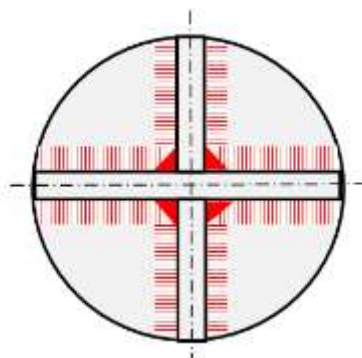
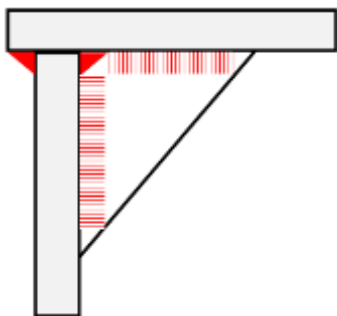
Nevhodné riešenie

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2. Zvary sa nesmú križovať v jednom mieste a nesmú smerovať do jedného miesta.



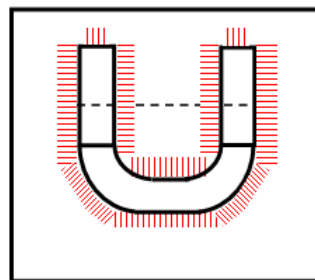
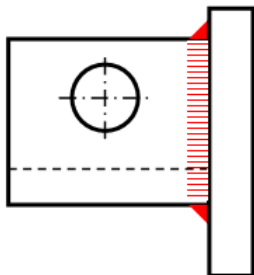
Vhodné riešenie



Nevhodné riešenie

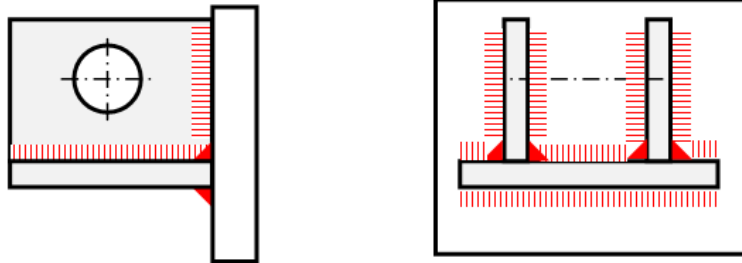
3. Počet zvarov, ich dĺžka a hrúbka má byť čo najmenšia, používajú sa také riešenia, aby sa dosiahol čo najmenší počet zváraných častí.

Si



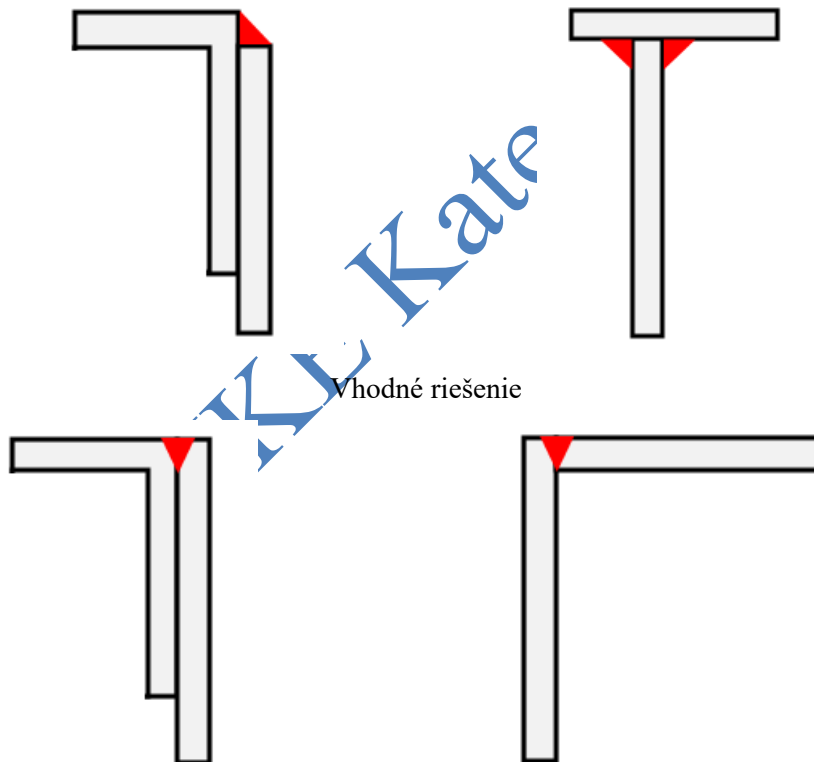
Vhodné riešenie

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Nevhodné riešenie

4. Miesto zvaru voliť tak, aby sa obmedzilo opracovanie hrán spájaných materiálov.

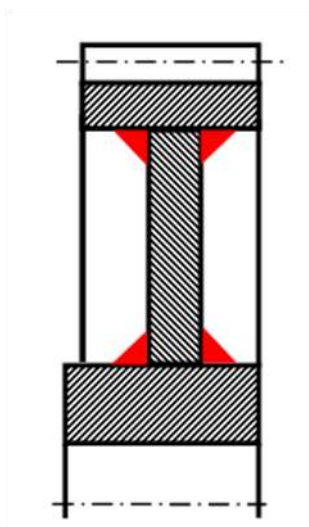


Vhodné riešenie

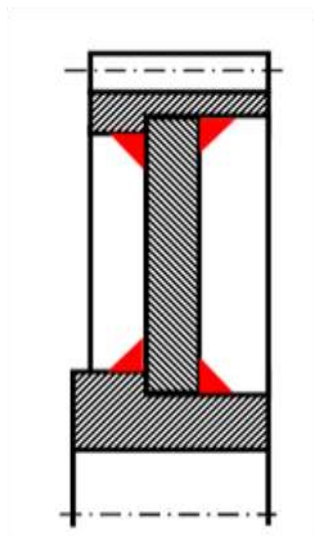
Nevhodné riešenie

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

5. Používať ustavovacie prípravky - obmedziť používanie osadenia pre zabezpečenie stredenia spájaných častí.

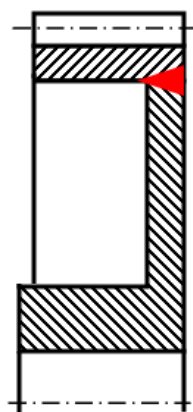


Vhodné riešenie

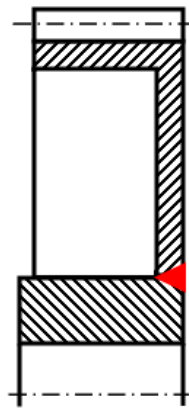


Nevhodné riešenie

6. Umiestniť zvary v mieste menšieho namáhania.



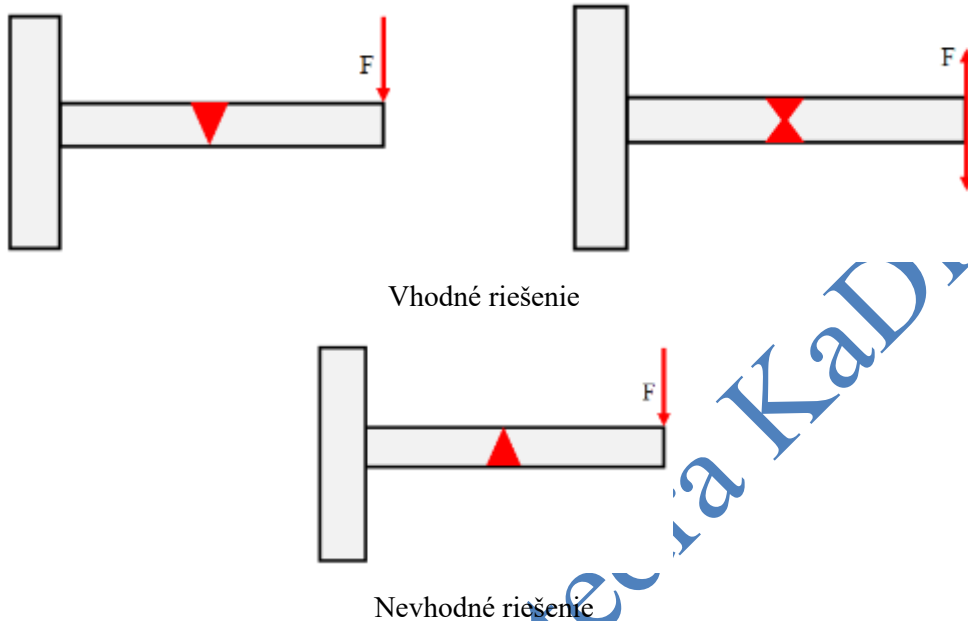
Vhodné riešenie



Nevhodné riešenie

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

7. Koreň zvaru sa nesmie nachádzať v mieste namáhanom na ťah.



2.3 Výpočet zvarov

Pri zváraní sa používa teplo, ktoré spôsobuje v blízkosti zvaru metalurgické zmeny v základnom kove. Zvar tiež môže byť príčinou vzniku zvyškových napätí z dôvodu upnutia alebo niekedy z dôvodu technológie zvárania. Zvyčajne tieto zvyškové napätia sú dostatočne silné na to, aby vyvolali poruchu. Na odstránenie zvyškových napätí sa používajú tepelné úpravy zváraných súčiastok v podobe ich žihania. Ak sú diely veľkých rozmerov, ktoré sa majú vyhotoviť zváraním, vhodné je použitie predohrevu.

Dôležitou vlastnosťou spojovaných materiálov je ich *zvariteľnosť*. Zvariteľnosť je definovaná ako spôsobilosť materiálu vytvoriť zváraním pri určitých technologických podmienkach, zvarové spoje požadovaných vlastností. Zvariteľnosť sa všeobecne hodnotí posudzovaním degradácie celistvosti a vlastností zvarového spoja v porovnaní s neovplyvneným základným materiálom [9].

Veľmi dobre sa zvárajú nízko uhlíkové ocele do obsahu uhlíka $C = 0,2 \%$. Pri ostatných oceliach je veľká náchylnosť materiálov na vznik studených trhlín.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Nebezpečenstvo vzniku studených trhlín je možné znížiť aplikáciou predhrevu. Pre použitie a stanovenie teploty predhrevu platí viacero odporúčaní. Primárne pre určenie teploty predhrevu, je to chemické zloženie zváraných materiálov. Chemické zloženie zváraných materiálov je vhodné vyjadriť pomocou uhlíkového ekvivalentu. Podľa odporúčaní Medzinárodného zvaračského inštitútu sa v praxi používajú dva typy výpočtov uhlíkového ekvivalentu, vhodné pre plechy valcované CE a plechy zošľachtené CET:

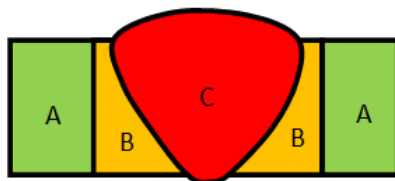
$$CE = C + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{Mn}{6} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (2.1)$$
$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40}$$

Vo všeobecnosti platí:

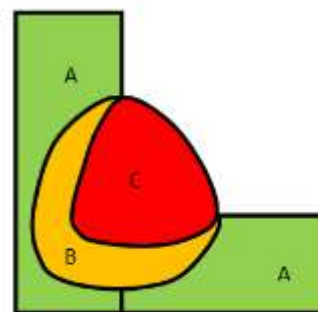
- ✓ ak $CE \leq 0,4 \%$ materiály sú zvariteľné,
- ✓ ak $CE \leq 0,6 \%$ materiály sú zvariteľné pri použití doplnkovej technológie, napr. predhrevu,
- ✓ ak $CE > 0,6 \%$ materiály sú nezvariteľné.

Pri spájaní materiálov zvaraním dostaneme tri základné oblasti - Obr. 2.2.

- Oblasť A – zvaraný (základný) materiál,
- Oblasť B – teplom ovplyvnená oblasť,
- Oblasť C – zvarový kov.



a) tupý zvar



b) kútový zvar

Obr. 2.2 Schéma oblasti zvarového spoja

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Zvarový kov ocele tuhne asi pod teplotou 1500°C (v závislosti od jeho chemického zloženia). Tuhne ako bunečná alebo dendritická štruktúra, pri značnom podchladení. Hranica medzi zvarovým kovom a teplom ovplyvnenou oblasťou sa nazýva hranica natavenia. Teplom ovplyvnená oblasť je tá časť zvarového spoja, ktorej mikroštruktúru ovplyvní teplo pri zváraní. Kým mikroštruktúra kovu bez polymorfnej premeny zostáva v teplom ovplyvnenej oblasti (Cu, Al, Ni) rovnaká, v kovoch s polymorfnou premenou (ocеле) sa štruktúra môže výrazne meniť [9].

Každá z uvedených oblastí na Obr. 2.2, má teda odlišné mechanické vlastnosti, ktoré sú závislé na vlastnostiach základného materiálu, druhu elektródy, spôsobe zvárania, parametroch zvárania a pod. Taktiež štruktúra a zloženie zvarového kovu je odlišné od zváraných materiálov. Pri vytvorení zvaru je nevyhnutné, aby bol zváraný materiál vyššej pevnosti a s vyššou čistotou. Prídavný materiál (materiál zvarového kovu) má mať chemické vlastnosti podobné základnému materiálu, prípadne vyššie. Mechanické vlastnosti prídavného materiálu musia byť rovnaké, prípadne vyššie, nie však viac ako o 10 % oproti mechanickým vlastnostiam základného materiálu.

Počas zvárania je vplyv teploty na štruktúrne pásma vo zvarovom kove a teplom ovplyvnenej oblasti veľmi významný. Významnú fázu teplotného cyklu tvorí maximálna teplota ohrevu a čas zotrvania na vysokej teplote, čo má vplyv na zhrubnutie zrna, zníženie vrubovej a lomovej húževnatosti v teplom ovplyvnenej oblasti. Fáza ochladzovania zvaru je dôležitá pri štruktúrnej (polymorfnej) premene a pri difúzii (napr. vodíka). Možno ju charakterizovať časom ochladzovania medzi teplotou 800 až 500°C ($\Delta t_{8/5}$). Pri krátkom čase ochladzovania môže v oceliach vznikáť tvrdá nerovnovážna martenzitická štruktúra s potlačenou difúziou vodíka s možnosťou tvorby studených trhlín. Zvarový kov začína tuhnúť na hranici natavenia so základným materiálom a tento začiatok rastu je riadený tzv. epitaxiálnym rastom. Epitaxiálny rast tuhnutia zrn je vlastne heterogénnym procesom. Počiatočné zrná zvarového kovu nadväzujú na zrná teplom ovplyvnenej oblasti. Tieto zrná kopírujú aj ich veľkosť.

Zvárané oceľové konštrukcie je možné konštruovať na základe viacerých kritérií. Navrhovanie zváraných konštrukcií na základe medzných stavov je jedným

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

z najpoužívanějších návrhov. Medzným stavom, ktorým je odolnosť proti nadmernej deformácii a tvárnemu porušeniu, kde sa za kritérium medzného stavu používa medza klzu R_e a medza pevnosti R_m ocele má široké uplatnenie. Veľmi dôležitým parametrom pri návrhu zváraných oceľových konštrukcií z pohľadu únavovej pevnosti je samotný tvar konštrukčných detailov a k tomu prislúchajúci typ zvaru.

Výber základného a prídavného oceľového konštrukčného materiálu, tak aby boli splnené všetky požiadavky z hľadiska medzných stavov, je náročné. Mnohokrát samotné požiadavky na konštrukčné riešenia sú protichodné, ako napr. vysoká pevnosť a vysoká húževnatosť, vysoká spoľahlivosť a nízka výrobná a prevádzková cena a pod. Konštruktér volí kompromisné riešenie, uprednostnia sa rozhodujúce požiadavky a v prijateľnej miere zohľadní ostatné.

Pre unifikovanú voľbu materiálov zváraných výrobkov boli štandardizované skupiny použitia materiálov. Pre oceľové konštrukcie sú určené ocele skupiny S - „konštrukčné“, pre tlakové nádoby ocele skupiny P - „na tlakové zariadenia“. Ďalej ocele skupiny L - „na rúrovody“, prípadne aj skupina H - „za studena valcované ploché výrobky z vysokopevných ocelí“, ktoré sa používajú pri zhotovení niektorých druhov oceľových konštrukcií.

Za statické zaťaženie zvaru sa považuje zaťažovací stav s počtom cyklov zaťaženia menej ako $N \leq 5 \cdot 10^3$ cyklov. Nad túto hodnotu budeme zvar považovať za dynamicky zaťažovaný a pre jeho výpočet treba použiť postup kontroly zvaru na únavu.

Najčastejším miestom porušenia zvarového spoja býva teplom ovplyvnená oblasť, nie zvarový kov samotný. Napriek tomuto faktoru sa pri navrhovaní zvarov a ich kontrole vychádza z podmienky porušenia v mieste zvaru. Pri určení dovoleného namáhania zvaru (oblasť B a C) sa vychádza z dovoleného namáhania základného kovu (oblasť A) s použitím korekčných súčiniteľov zvaru. Ak je dovolené napätie základného materiálu v oblasti A σ_D , potom dovolené napätie v oblasti B a C bude σ_{Ds} resp. τ_{Ds} .

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pre určenie dovoleného napätia v oblasti B a C sa používajú korekčné súčinitele podľa tab.2.4. nasledovne:

Tab. 2.4 Korekčné súčinitele zvarov α

Druh zvaru	Spôsob namáhania	Korekčný súčiniteľ			
Tupé zvary	Ťah	$\alpha_{\perp}$	1,0		
	Tlak		0,85	0,90 ²⁾	1,0 ³⁾
	Šmyk	α_{τ}		0,7	
Kútové zvary	Čelný	$\alpha_{\tau\perp}$	0,75 ⁴⁾	0,90 ⁵⁾	1,0 ⁶⁾
	Bočný	$\alpha_{\tau\parallel}$	0,65 ⁴⁾	0,80 ⁵⁾	0,90 ⁶⁾

²⁾ Platí len pre odporové zváranie.

³⁾ Len pre riadne prevarený koreň zvaru, kontrolovaný prežiarením, alebo rovnocennou defektoskopickou metódou.

⁴⁾ Len pre ručné zváranie elektrickým oblúkom, elektródou o rovnakej pevnosti ako základný materiál.

⁵⁾ Ručné zváranie elektrickým oblúkom, zváranie pod tavivom, zváranie v ochrannnej atmosfére pre zvary $z > 12\text{mm}$.

⁶⁾ Pre automatické zváranie pod tavivom pre jednovrstvové zvary o veľkosti $z \leq 12\text{mm}$.

Potom dovolené napätie tupého zvaru bude nasledovné:

$$\sigma_{Ds\perp} = \alpha_{\perp} \cdot \sigma_D, \quad \sigma_{Ds\parallel} = \alpha_{\parallel} \cdot \sigma_D, \quad \tau_{Ds} = \alpha_{\tau} \cdot \sigma_D \quad (2.2)$$

Potom dovolené napätie kútového zvaru bude nasledovné:

$$\tau_{Ds\perp} = \alpha_{\tau\perp} \cdot \sigma_D, \quad \tau_{Ds\parallel} = \alpha_{\tau\parallel} \cdot \sigma_D \quad (2.3)$$

Pre určenie bezpečnosti zvarového spoja sa používa dovolené namáhanie zváraného materiálu v oblasti A. Pri bežných zvariteľných oceliach sa dovolené namáhanie určuje z medze klzu R_e a z bezpečnosti zvaru n , ktorá zohľadňuje vplyv zvaru na základný materiál a pohybuje sa v rozmedzí od 1,25 do 2, zvyčajne sa pre bežné oceľové konštrukcie používa bezpečnosť $n = 1,5$. Dovoľené napätie základného zváraného materiálu určíme teda $\sigma_D = R_e / n$.

$$\sigma_{Ds} = \alpha \frac{R_e}{n}, \quad \tau_{Ds} = \alpha_{\tau} \frac{R_e}{n} \quad (2.4)$$

α – korekčný súčiniteľ zvaru,

α_{τ} – korekčný súčiniteľ zvaru,

R_e – medza klzu zváraného materiálu,

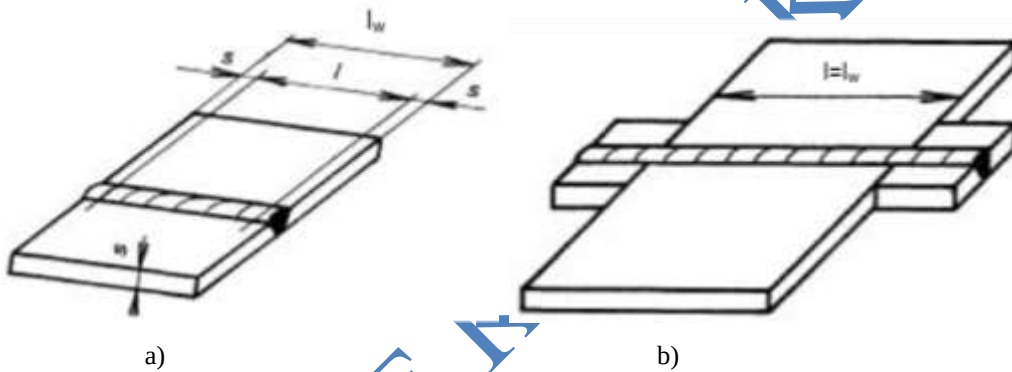
n – miera bezpečnosti zvaru.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.4 Tupé zvary

Nosný prierez tupých zvarov je definovaný hrúbkou spájaných materiálov a výpočtovou dĺžkou zvaru.

Plocha tupého zvaru je teda definovaná hrúbkou zvaru a výpočtovou dĺžkou zvaru – Obr. 2.3a), ktorá je na rozdiel od konštrukčnej dĺžky (dĺžka zvaru zakótovaná na výkrese) skrátená o neplnohodnotný (deformovaný) prierez zvaru na začiatku a konci. Túto deformáciu je možné odstrániť použitím príložného materiálu - Obr. 2.3b).



Obr. 2.3 Nosný prierez tupého zvaru

$$S_w = l \cdot s = (l_w - 2s) \cdot s \quad (2.5)$$

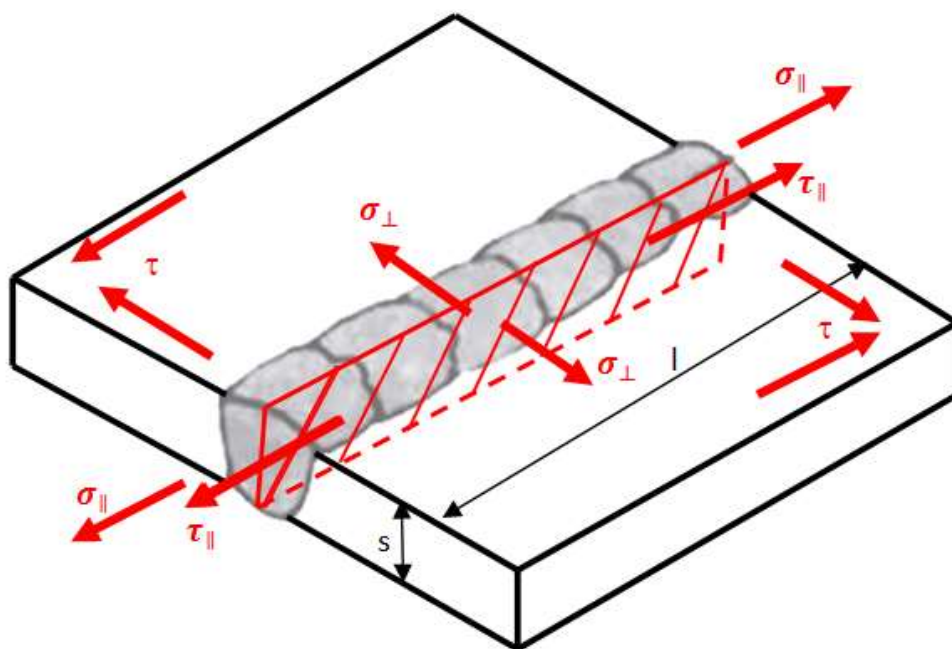
kde:

l – výpočtová dĺžka tupého zvaru,

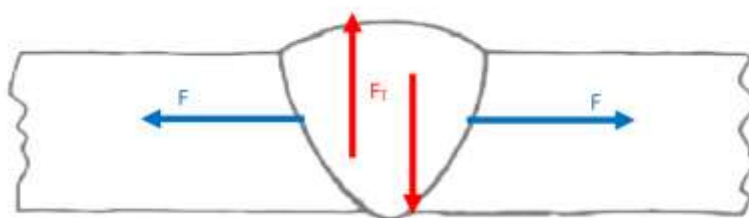
l_w – dĺžka tupého zvaru (dĺžka zakótovaná na výkrese).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Stanovenie napätí v tupom zvare zaťaženom statickým zaťažením je obdobné, ako pri určení napätí základného materiálu - Obr. 2.4a).



Obr. 2.4a) Výpočtový model tupého zvaru



Obr. 2.4b) Zaťažujúce sily tupého zvaru

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Napätie v tupom zware

$$\sigma_w = \frac{F}{S_w} = \sigma_{\perp} \quad (2.6)$$

$\sigma_{\perp}$ – napätie od sily kolmej na plochu zvaru,

$$\frac{\sigma_{\perp}}{\alpha_{\perp}} = \frac{R_e}{n} \quad (2.7)$$

$\alpha_{\perp}$ – korekčný súčiniteľ zvaru,

R_e – medza klzu základného zváraného materiálu,

n – miera bezpečnosti zvaru,

$$\tau_w = \frac{F_T}{S_w} = \tau_{\parallel} \quad (2.8)$$

$\tau_{\parallel}$ – napätie od zaťaženia rovnobežného s plochou zvaru,

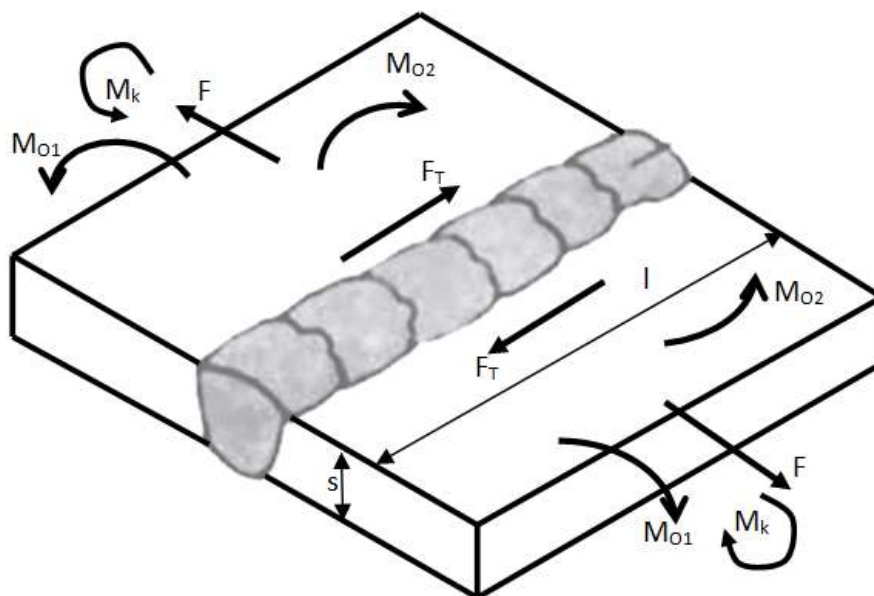
$$\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}} = \tau_D \quad (2.9)$$

$\alpha_{\parallel}$ – korekčný súčiniteľ zvaru.

Pre kombináciu napätia normálového a šmykového určíme výsledné redukované napätie v zware:

$$\sigma_{zr} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\perp}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}}\right)^2} \leq \frac{R_e}{n} \quad (2.10)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.5 Všeobecné zaťaženie tupého zvaru silami a momentmi

Výpočet jednotlivých samostatných napätí v zware na Obr. 2.5 sa bude realizovať nasledovne:

Od ohybového momentu M_{o1}

$$\sigma_{\perp 1} = \frac{M_{o1}}{W_{ow1}} = \frac{M_{o1}}{\frac{s^2 \cdot l}{6}} \quad (2.11)$$

Od ohybového momentu M_{o2}

$$\sigma_{\perp 2} = \frac{M_{o2}}{W_{ow2}} = \frac{M_{o2}}{\frac{l^2 \cdot s}{6}} \quad (2.12)$$

Od sily kolmej na plochu zvaru F

$$\sigma_{\perp 2}' = \frac{F}{S_w} = \frac{F}{s \cdot l} \quad (2.13)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Od sily rovnobežnej na plochu zvaru F_T

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_T}{S_w} = \frac{F_T}{s \cdot l} \quad (2.14)$$

Od krútiaceho momentu M_k

$$\tau_{\parallel M_k} = \frac{M_k}{W_{kw}} = \frac{M_k}{\frac{J_{pw}}{e}} = \frac{M_k}{\gamma \cdot s^2 \cdot l} \quad (2.15)$$

W_{kw} – prierezový modul zvaru v krútení,

J_{pw} – polárny moment zvaru,

e – krajné vlákno prierezu zvaru,

γ – súčiniteľ pre nekruhové prierezy určený podľa pomeru l/s .

Za predpokladu, že je pomer $l/s > 6$, potom je možné pre výpočet napätia v zvare nekruhového prierezu uplatniť nasledovný vzťah:

$$\tau_{\parallel M_k} = \frac{3 \cdot M_k}{s^2 \cdot l} \quad (2.16)$$

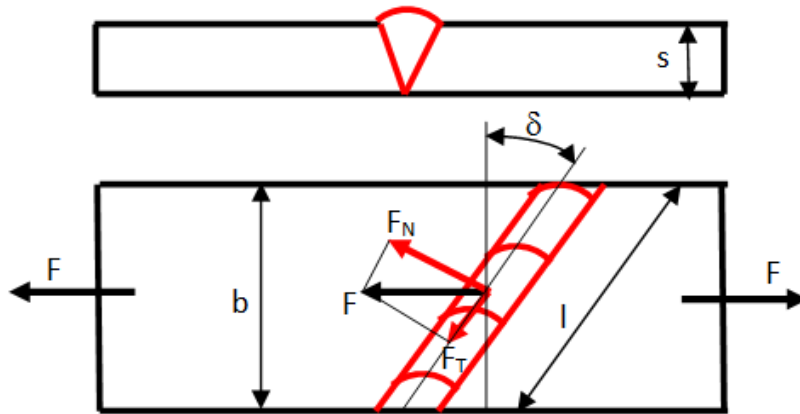
Výsledné napätie v tupom zvare:

$$\sigma_{zr} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\perp}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \frac{\sigma_{\perp} \cdot \sigma_{\parallel}}{\alpha_{\perp}} + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}}\right)^2} \leq \frac{R_e}{n} \quad (2.17)$$

Pozn. $\sigma_{\parallel}$ - normálové napätie vznikne od sily rovnobežnej s plochou zvaru tak, že sila zaťažuje obe spojované časti – spojované materiály sa voči sebe neposúvajú, ako v prípade sily F_T .

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Šikmý tupý zvar vyhotovený podľa Obr. 2.6 je zaťažený silou F . Sila F sa rozloží do zložiek síl, ktoré budú kolmé na zvar - F_N a rovnobežné so zvarom - F_T .



Obr. 2.6 Zaťaženie tupého šikmého zvaru

Napätie vo zware potom bude vyjadrené nasledovne:

Od sily kolmej na plochu zvaru F :

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_N}{S_w} = \frac{F \cdot \cos \delta}{s \cdot l} = \frac{F \cdot \cos \delta}{s \cdot \frac{b}{\cos \delta}} = \frac{F \cdot \cos^2 \delta}{s \cdot b} \quad (2.18)$$

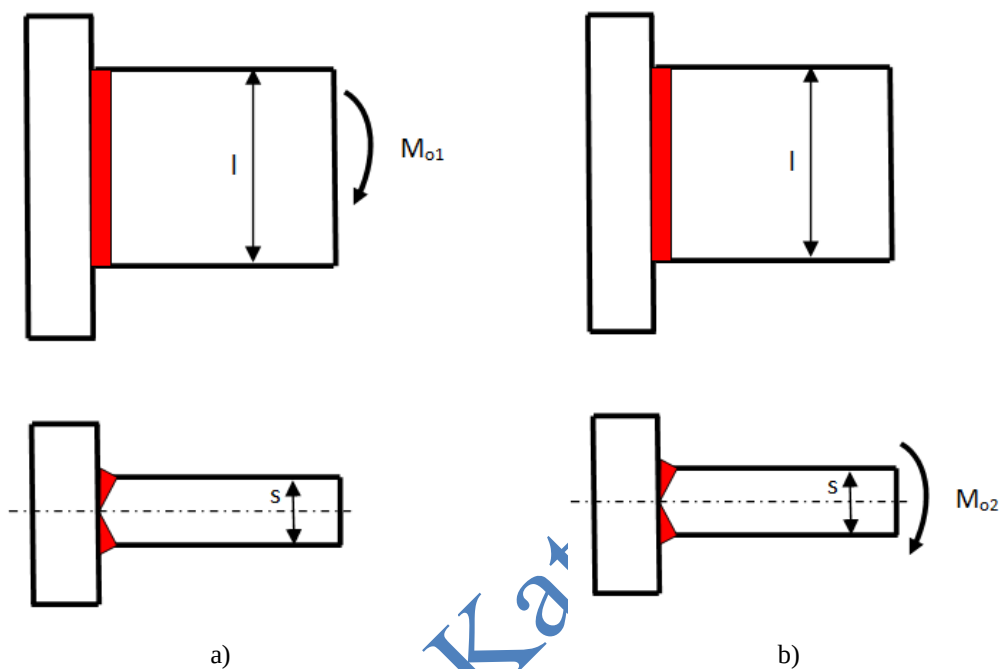
Od sily rovnobežnej na plochu zvaru F_T :

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_T}{S_w} = \frac{F_T}{s \cdot l} = \frac{F \cdot \sin \delta}{s \cdot \frac{b}{\cos \delta}} = \frac{F \cdot \sin 2\delta}{2 \cdot s \cdot b} \quad (2.19)$$

$$\sigma_{\parallel} = \frac{F_T}{S_w} = \frac{F_T}{s \cdot l} = \frac{F \cdot \sin \delta}{s \cdot \frac{b}{\sin \delta}} = \frac{F \cdot \sin^2 \delta}{s \cdot b} \quad (2.20)$$

Tupý zvar (obojstranný 1/2V zvar alebo zvar K) vyhotovený podľa Obr. 2.7 slúži na pripojenie konzolovej dosky k základovej plochej dosky. Konzolová doska bude zaťažená momentom M_{01} resp. M_{02} .

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.7 Pripojenie konzolovej dosky pomocou tupého zvaru

Napätie v tupom zvare zaťaženom podľa Obr. 2.7a) bude vyjadrené nasledovne:

$$\sigma_{\perp 1} = \frac{M_{o1}}{W_{ow1}} = \frac{M_{o1}}{\frac{s \cdot l^2}{6}} = \frac{6 \cdot M_{o1}}{s \cdot l^2} \quad (2.21)$$

Napätie v tupom zvare zaťaženom podľa Obr. 2.7b) bude vyjadrené nasledovne:

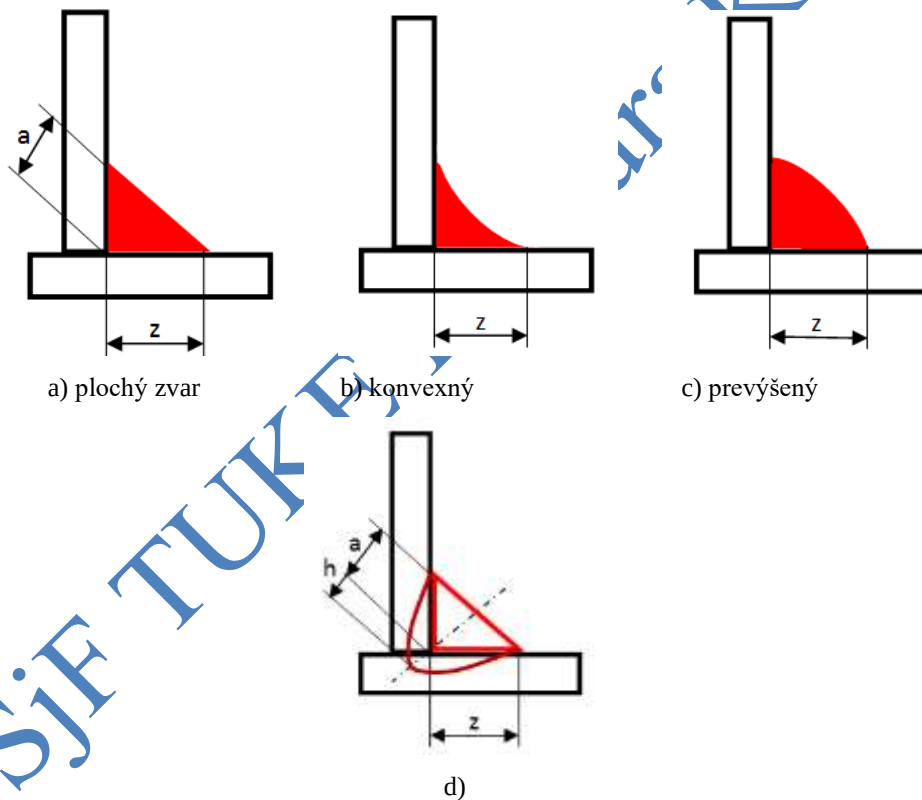
$$\sigma_{\perp 2} = \frac{M_{o2}}{W_{ow2}} = \frac{M_{o2}}{\frac{s^2 \cdot l}{6}} = \frac{6 \cdot M_{o2}}{s^2 \cdot l} \quad (2.22)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.5 Kútový zvar

Kútové zvary sú vzhľadom na ich prevedenie väčšími koncentrátormi napätia ako zvary tupé. Najvhodnejším tvarom kútového zvaru vzhľadom na koncentráciu napätia je zvar konvexný, menej vhodnými tvarmi je plochý zvar a prevýšený tvar - Obr. 2.8.

V prípade kútových zvarov je veľmi dôležitým faktorom vyhotovenie koreňa zvaru - Obr. 2.8.d). V prípade nevhodne prevareného koreňa zvaru je napätie v koreni niekoľko násobne vyššie ako napätie v prechodovej oblasti zvaru.

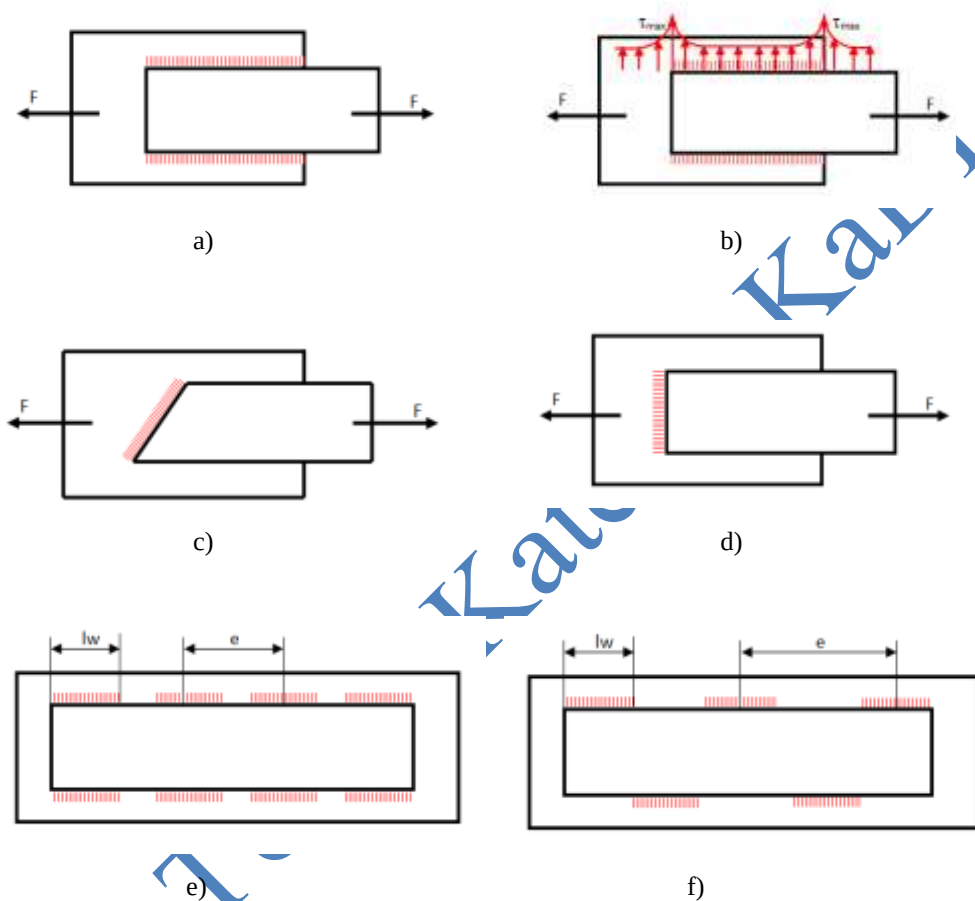


Obr. 2.8 Definovanie tvaru kútového zvaru

Kútové zvary je nutné posudzovať aj z hľadiska vzájomného pôsobenia síl a polohy zvaru - Obr. 2.9. Kútové zvary potom môžeme z tohto hľadiska rozdeliť na kútové zvary bočné, čelné a šikmé kútové zvary. Vzhľadom na dĺžku zvaru a

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

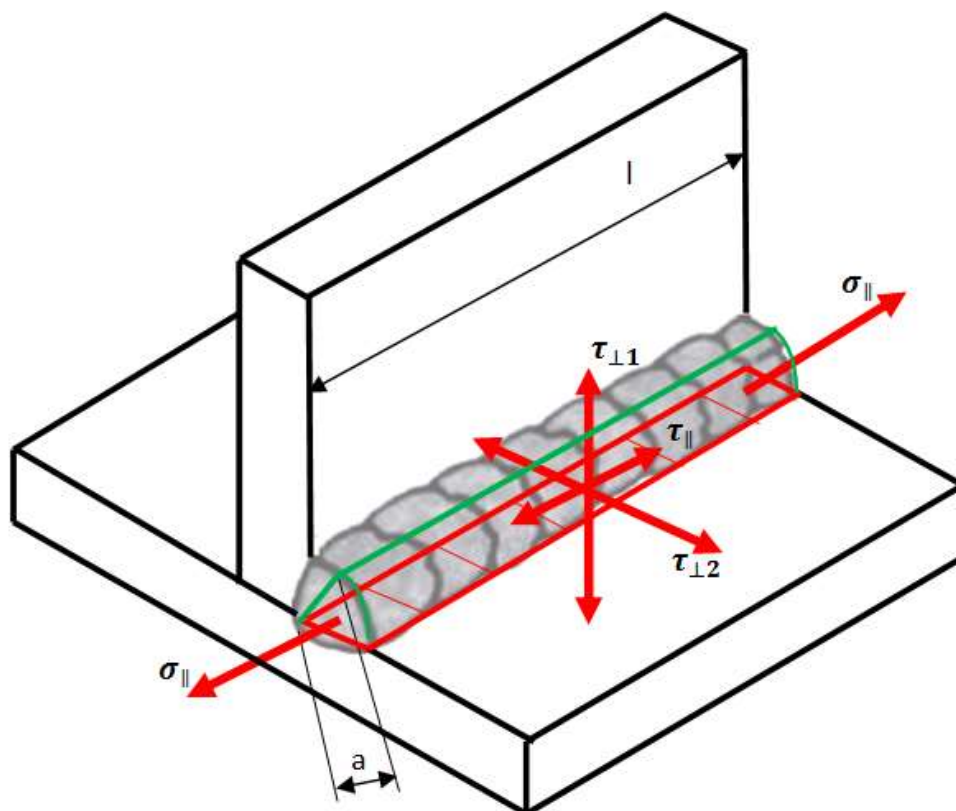
v prípade, ak sa nevyžaduje tesnosť zvaru, môžu byť kútové zvary v prevedení prerušovaných zvarov - Obr. 2.9.d,e).



Obr. 2.9 Definovanie polohy kútového zvaru

V smere bočných zvarov sú napätia rozložené nerovnomerne - Obr. 2.9b). Koncentrácia napätia na začiatku a konci zvaru rastie s dĺžkou preplátovania, v niektorých prípadoch môže dosiahnuť hodnoty medze klzu. Prevenciou proti vzniku plastických lokálnych deformácií na začiatku a konci zvaru je obmedzenie dĺžky zvaru.

Podľa STN sa obmedzuje dĺžka zvarov nasledovne: $l_{wmin} = 4.z$, minimálne však $l_{wmin} = 40\text{mm}$ a $l_{wmax} = 50.z$.



Obr. 2.10 Výpočtový model kútového zvaru

Pri zaťažení kútového zvaru vonkajšími silami a momentmi sa vytvárajú v priereze zvaru šmykové napätia - Obr. 2.10. Prierez zvaru sa sklápa do roviny pripojenia. Nasledne plocha kútového zvaru je definovaná:

$$S_w = l \cdot a = (l_w - 2a) \cdot a \quad (2.23)$$

l – výpočtová dĺžka kútového zvaru,

l_w – dĺžka kútového zvaru (dĺžka zvaru zakótovaná na výkrese).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Všetky vonkajšie zaťaženia kútového zvaru sa po premietnutí do ťažiska zvaru prejavajú ako zaťaženia vyvolávajúce šmykové napätia.

Napätie od sily kolmej na plochu zvaru:

$$\tau_{\perp} = \sqrt{\tau_{\perp 1}^2 + \tau_{\perp 2}^2} \quad (2.24)$$

Jednotlivé napätia zvaru:

$$\frac{\tau_{\perp}}{\alpha_{\perp}} = \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.25)$$

$$\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}} = \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.26)$$

β – veľkostný súčiniteľ kútového zvaru,

$\beta = 1,3 - 0,042 \cdot a$; ak $a \leq 7\text{mm}$,

$\beta = 1$; ak $a > 7\text{mm}$.

Výsledné napätie v kútovom zvare:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{\parallel}^2 + \left(\frac{\tau_{\perp}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}}\right)^2} \leq \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.27)$$

$\sigma_{\parallel}$ - normálové napätie, ktoré vznikne od sily rovnobežnej s plochou zvaru tak, že sila zaťažuje obe spojované časti súčasne – spojované materiály sa voči sebe neposúvajú ako v prípade sily F_T .

Napätia v bočnom kútovom zvare zaťaženého symetrickou silou F podľa Obr. 2.9a) sa určujú podľa vzorca:

$$\tau_{\parallel F} = \frac{F}{S_w} = \frac{F}{2 \cdot a \cdot l} \quad (2.28)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

kde:

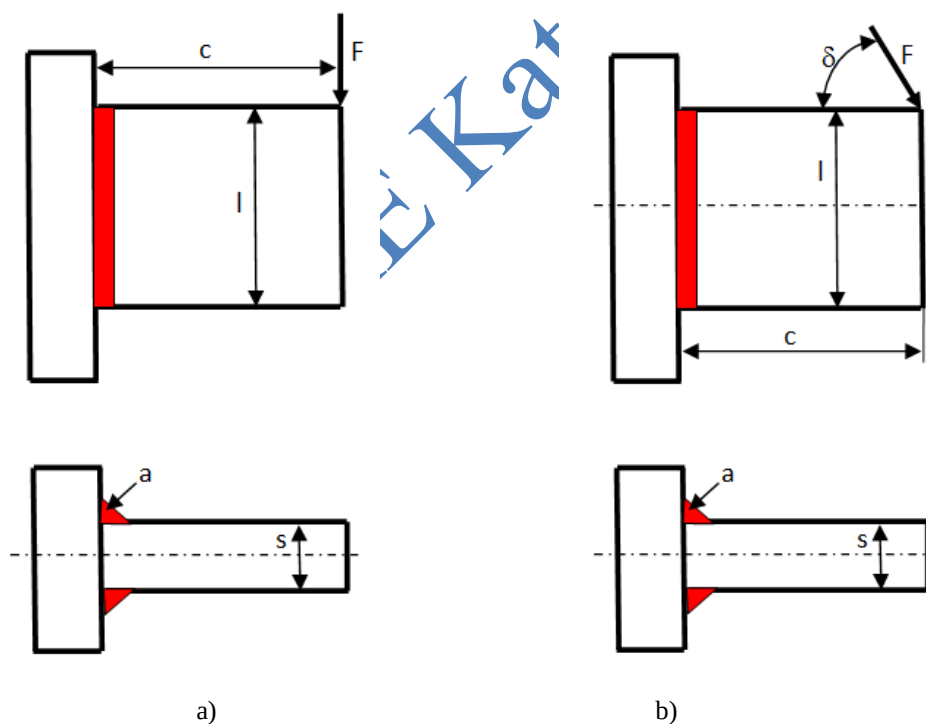
a - charakteristický rozmer veľkosti kútového zvaru,

l - výpočtová dĺžka kútového zvaru.

Napätie v čelnom kútovom zvare zaťaženého silou F podľa Obr. 2.9d) sa určí podľa vzorca:

$$\tau_{\perp F} = \frac{F}{S_w} = \frac{F}{a \cdot l} \quad (2.29)$$

Obojstranný kútový zvar podľa Obr. 2.11 bol použitý na pripojenie konzolovej dosky k základnej doske. Konzolová doska je zaťažená dvoma rôznymi spôsobmi pôsobenia osamelej rovinnej sily F – Obr. 2.11a)b).



Obr. 2.11 Zaťaženie kútového zvaru osamelou silou

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Obojstranný kútový zvar na Obr. 2.11a), sa bude kontrolovať nasledovným postupom. Vonkajšie zaťaženie F sa pretransformuje do ťažiska zvaru, v ktorom dostávame zaťažujúci kolektív zvaru v nasledovnej podobe: F_t – posúvajúca sila $F_t = F$, a ohybový moment $M_o = F \cdot c$

V obojstrannom kútovom zvare vzniknú napätia:

Od posuvajúcej sily F_t :

$$\tau_{\parallel Ft} = \frac{F_t}{S_w} = \frac{F_t}{2 \cdot a \cdot l} \quad (2.30)$$

Od ohybového momentu M_o :

$$\tau_{\perp Mo} = \frac{M_o}{W_{ow}} = \frac{M_o}{\frac{I_w}{e}} = \frac{M_o}{\frac{2 \cdot \frac{1}{12} \cdot a \cdot l^3}{\frac{l}{2}}} = \frac{M_o}{\frac{a \cdot l^2}{3}} \quad (2.31)$$

S_w – plocha obojstranného zvaru,

W_{ow} – prierezový modul zvaru v ohybe,

I_w – kvadratický moment zvaru v ohybe,

e – vzdialenosť krajného vlákna zvaru.

Výsledné napätie v kútovom zvare na Obr. 2.11a) je nasledovné:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}}\right)^2} \leq \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.32)$$

Obojstranný kútový zvar podľa Obr. 2.11b), ktorý je zaťažený všeobecnou rovinnou silou, sa skontroluje nižšie uvedeným postupom.

Vonkajšie zaťaženie F sa pretransformuje do ťažiska zvaru, v ktorom dostávame zaťažujúci kolektív zvaru v nasledovnej podobe: F_t – posúvajúca sila $F_t = F \cdot \sin \delta$, F_k – kolmá sila $F_k = F \cdot \cos \delta$, ohybový moment od posúvajúcej sily $M_{o1} = F_t \cdot c$, a ohybový moment od kolmej sily $M_{o2} = F_k \cdot l_w / 2$,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

V obojstrannom kútovom zvare vzniknú napätia:

Od posuvajúcej sily F_t :

$$\tau_{\parallel Ft} = \frac{F_t}{S_w} = \frac{F_t}{2 \cdot a \cdot l} \quad (2.33)$$

Od kolmej sily F_k :

$$\tau_{\perp Fk} = \frac{F_k}{S_w} = \frac{F_k}{2 \cdot a \cdot l} \quad (2.34)$$

Od ohybového momentu M_{o1} :

$$\tau_{\perp Mo1} = \frac{M_{o1}}{W_{ow1}} = \frac{M_{o1}}{\frac{I_w}{e}} = \frac{M_{o1}}{\frac{2 \cdot \frac{1}{12} \cdot a \cdot l^3}{\frac{l}{2}}} = \frac{M_{o1}}{\frac{a \cdot l^2}{3}} \quad (2.35)$$

Od ohybového momentu M_{o2} :

$$\tau_{\perp Mo2} = \frac{M_{o2}}{W_{ow2}} = \frac{M_{o2}}{\frac{I_w}{e}} = \frac{M_{o2}}{\frac{2 \cdot \frac{1}{12} \cdot a \cdot l^3}{\frac{l}{2}}} = \frac{M_{o2}}{\frac{a \cdot l^2}{3}} \quad (2.36)$$

kde:

S_w – plocha obojstranneho zvaru,

W_{ow} – prierezový modul zvaru v ohybe,

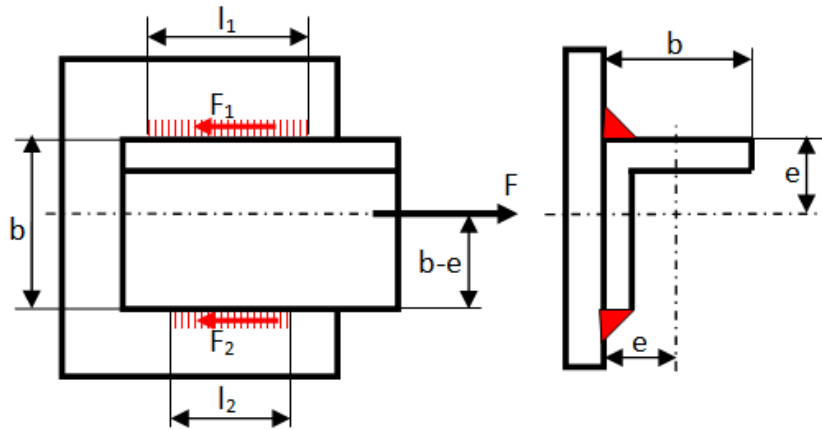
I_w – kvadratický moment zvaru v ohybe,

e – vzdialenosť krajného vlákna zvaru.

Výsledné napätie v obojstrannom kútovom zvare na Obr. 2.11b) bude:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp Fk} + \tau_{\perp Mo1} + \tau_{\perp Mo2}}{\alpha_{\perp}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel Ft}}{\alpha_{\parallel}} \right)^2} \leq \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.37)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.12 Zaťaženie kútového zvaru

Kútovým zvarom je privarený rovnoramenný L profil podľa Obr. 2.12, ktorý je zaťažovaný ťahovou silou v ťažisku profilu L. Požaduje sa, aby napätie v zvaroch bolo rovnaké. Návrh dĺžok zvarov bude určený nasledovne:

Z momentovej podmienky k zvaru 1 a k zvaru 2 určíme sily vo zvaroch F_1 a F_2 .

$$F_1 = F \frac{b-e}{b} \quad a \quad F_2 = F \frac{e}{b} \quad (2.38)$$

Vychádzajúc z podmienky rovnakých napätí a rovnakých veľkostí zvaru $a_1 = a_2 = a$, je možné z pomeru síl vo zvaroch F_1/F_2 vyjadriť pomer dĺžok zvarov l_1/l_2 , a teda musí platiť $F_1/F_2 = l_1/l_2$.

Napätie vo zvaroch sa určí:

$$\tau_{\parallel 1} = \frac{F_1}{S_{w1}} = \frac{F_1}{a \cdot l_1} \quad (2.39)$$

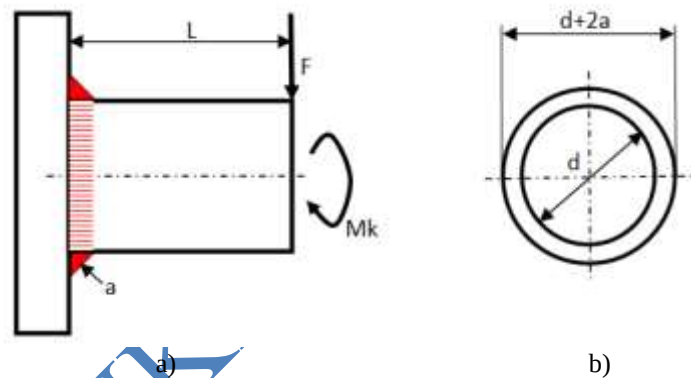
$$\tau_{\parallel 2} = \frac{F_2}{S_{w2}} = \frac{F_2}{a \cdot l_2} \quad (2.40)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Vzhľadom k tomu, že zaťažujúca sila F nepôsobí v rovine zvarov, je potrebné uvažovať aj s namáhaním zvarov od ohybového momentu.

$$\tau_{\perp Mo} = \frac{M_o}{W_{ow}} = \frac{F \cdot e}{\frac{I_w}{\frac{l_1}{2}}} \approx \frac{3}{2} \frac{F \cdot b}{a \cdot l_1^2} \quad (2.41)$$

V prípade pripojenia kruhovej tyče pomocou kútového zvaru po obvode - Obr. 2.13a), a zaťaženého krútiacim momentom a osamelou silou sa napätie vo zvare definuje nižšie uvedeným postupom. Kútový zvar sa sklopí do roviny pripojenia v podobe medzikružia - Obr. 2.13b).



Obr. 2.13 Zaťaženie kútového obvodového zvaru

Vonkajšie zaťaženie v podobe momentu krútiaceho M_k , a sily F musí byť pretransformované ako zaťaženie zvaru do ťažiska zvaru. Zaťaženie pretransformované do ťažiska zvaru vytvorí zaťažovací kolektív v podobe momentu krútiaceho M_k , posúvajúcu silu $F_t = F$ a ohybový moment $M_o = F \cdot L$.

Napätia vo zvare sa výpočtom stanovia týmto uvedeným postupom.

Napätia od posúvajúcej sily F_t :

$$\tau_{\parallel Ft} = \frac{F_t}{S_w} = \frac{F_t}{\pi \cdot (a + d) \cdot a} \quad (2.42)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Napätia od krútiaceho momentu M_k :

$$\tau_{\parallel Mk} = \frac{M_k}{W_{kw}} = \frac{M_k}{\frac{J_{pw}}{e}} = \frac{M_k}{\frac{\pi}{32} \cdot \frac{[(2a+d)^4 - d^4]}{\frac{d+2a}{2}}} \quad (2.43)$$

kde:

S_w – plocha obojstranného zvaru,

W_{kw} – prierezový modul zvaru v krútení,

J_{pw} – polárny moment zvaru,

e – krajné vlákno prierezu zvaru.

Napätia od ohybového momentu M_o :

$$\tau_{\perp Mo} = \frac{M_o}{W_{ow}} = \frac{M_o}{\frac{I_w}{e}} = \frac{F \cdot L}{\frac{\pi}{64} \cdot \frac{[(2a+d)^4 - d^4]}{\frac{d+2a}{2}}} \quad (2.44)$$

kde:

W_{ow} – prierezový modul zvaru v ohybe,

I_w – kvadratický moment zvaru v ohybe,

e – vzdialenosť krajného vlákna zvaru.

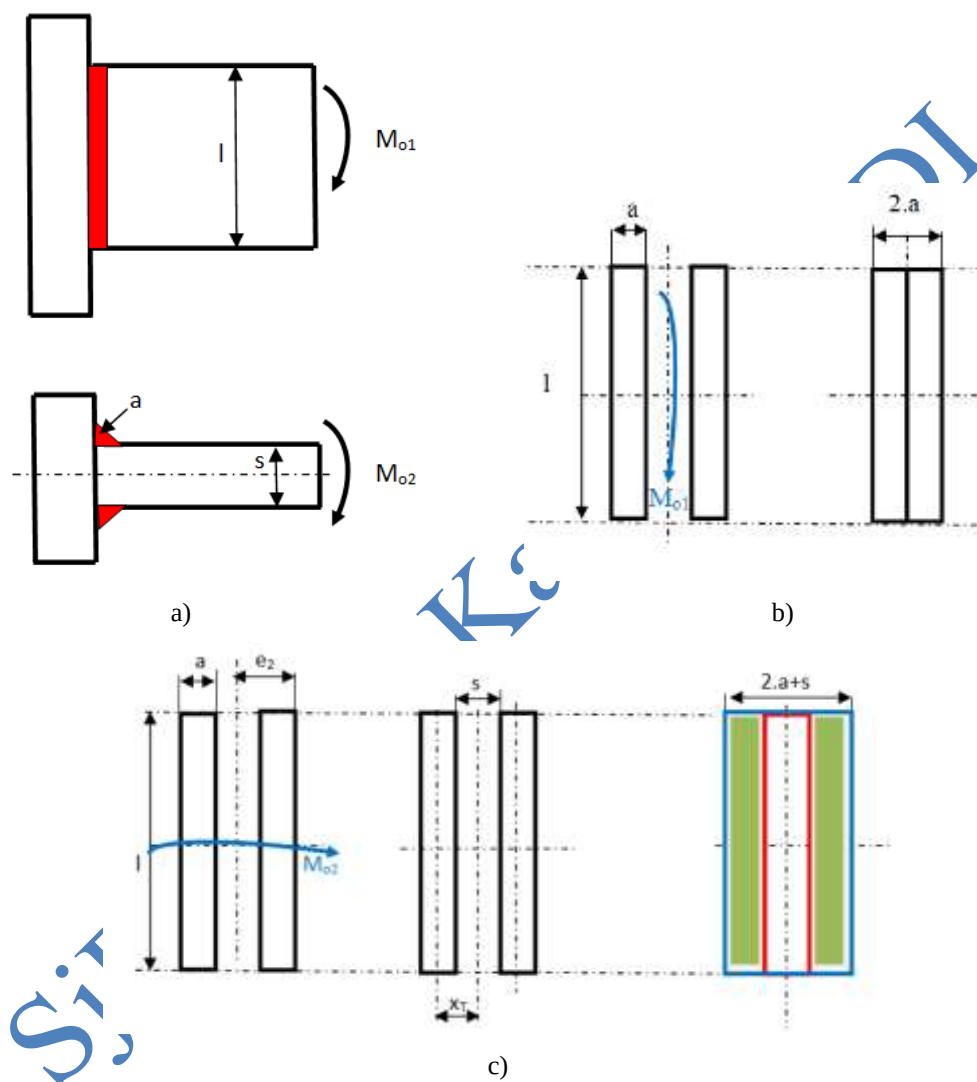
Výsledné napätie v kúťovom zware vyhotovenom na Obr. 2.13 bude:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}}\right)^2} \leq \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.45)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp Mo}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel Ft} + \tau_{\parallel Mk}}{\alpha_{\parallel}}\right)^2} \quad (2.46)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

V prípade pripojenia obdĺžnikového profilu pomocou kútového zvaru - Obr. 2.14 a zaťaženia momentmi ohybovými v dvoch na seba kolmých rovinách definujeme parciálne napätia vo zvare.



Obr. 2.14 Kútový zvar zaťažovaný v dvoch rovinách

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

V rovine zvislej pôsobí moment ohybový M_{o1} , napätia od tohto momentu vyjadríme nasledovne:

$$\tau_{\perp Mo1} = \frac{M_{o1}}{W_{ow1}} = \frac{M_{o1}}{\frac{I_{w1}}{e_1}} \quad (2.47)$$

kde:

W_{ow1} – prierezový modul zvaru v ohybe,

I_{w1} – kvadratický moment zvaru v ohybe,

e_1 – vzdialenosť krajného vlákna zvaru, $e_1 = l/2$.

V rovine vodorovnej pôsobí moment ohybový M_{o2} , napätia od tohto momentu vyjadríme nasledovne:

$$\tau_{\perp Mo2} = \frac{M_{o2}}{W_{ow2}} = \frac{M_{o2}}{\frac{I_{w2}}{e_2}} \quad (2.48)$$

kde:

W_{ow2} – prierezový modul zvaru v ohybe,

I_{w2} – kvadratický moment zvaru v ohybe,

e_2 – vzdialenosť krajného vlákna zvaru, Obr. 2.14c).

Výsledné napätie v kútovom zvare zobrazenom na Obr. 2.14 bude:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp Mo1}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\perp Mo2}}{\alpha_{\perp}}\right)^2} \leq \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.50)$$

Pre stanovenie napätí od momentov ohybových je dôležité vhodné určenie prierezových charakteristík zvarov.

V prípade obojstranných zvarov podľa Obr. 2.14 dostávame dve prierezové charakteristiky zvaru a dve plochy zvaru od seba vzdialené o hrúbku spájaného materiálu s .

V prípade stanovenia plochy zvaru S_w môžeme tieto plochy jednoducho sčítať bez ohľadu na spôsob zaťaženia.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

V prípade prierezových charakteristík zvaru pri namáhaní v ohybe musíme postupovať v zmysle určenia kvadratického momentu a určenia krajného vlákna prierezu.

Kvadratické momenty môžeme sčítvať, ak ich sčítavanie nebude mať vplyv na vzdialenosť krajného vlákna od ťažiska - Obr.2.14b), (ak je ohybový moment rovnobežný s kubickou stranou).

Plocha zvaru: $S = a \cdot l$ $l = l_w - 2a$

Plocha obojstranného zvaru: $S_w = 2 \cdot a \cdot l$

Kvadratický moment zvaru: $I = a \cdot l^3 / 12$

Kvadratický moment obojstranného zvaru: $I_w = 2 \cdot I = a \cdot l^3 / 6$

Prierezový modul zvaru: $W_{ozv} = I / e_1 = I / (l/2) = a \cdot l^2 / 6$

Prierezový modul obojstranného zvaru: $W_{ow} = 2 \cdot I / e_1 = 2 \cdot I / (l/2) = 2 \cdot W_{ozv} = a \cdot l^2 / 3$

V prípade, ak by došlo k zmene vzdialenosti krajného vlákna, je potrebné určiť prierezový modul zvaru ako kvadratický moment ku krajnému vláknu prierezu. Kvadratický prierez zvaru, ktorý je zaťažovaný momentom ohybovým M_{o2} , podľa Obr. 2.14c) je možné určiť dvoma spôsobmi.

Prvým spôsobom je použitie Steinerovej vety

$$I_w = 2 \cdot (I_{zv} + S_{zv} \cdot x_T^2) \quad (2.51)$$

kde:

I_{zv} – kvadratický moment plochy zvaru: $I_{zv} = l \cdot a^3 / 12$,

S_{zv} – plocha zvaru : $S_{zv} = a \cdot l$,

x_T – súradnica ťažiska plochy zvaru k súradnici profilu: $x_T = s/2 + a/2 = (s+a)/2$.

Prierezový modul zvaru bude potom:

$$W_{ow2} = \frac{I_w}{e_2} \quad (2.52)$$

e_2 – vzdialenosť krajného vlákna od ťažiska: $e_2 = a + s/2$.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Druhým spôsobom je doplnenie myšleného prierezu a odčítanie kvadratických prierezov zvaru - Obr. 2.14c).

$$I_w = I_{von} - I_{vn} \quad (2.53)$$

Doplnením vonkajšieho prierezu (ohraničené modrým na Obr. 2.14c):

$$I_{von} = \frac{l \cdot (2 \cdot a + s)^3}{12} \quad (2.54)$$

Červeným ohraničené na Obr. 2.14c):

$$I_{vn} = \frac{l \cdot s^3}{12} \quad (2.55)$$

Prierezový modul zvaru bude potom:

$$W_{ow2} = \frac{I_w}{e_2} \quad (2.56)$$

e_2 - vzdialenosť krajného vlákna od ťažiska: $e_2 = a + s/2$.

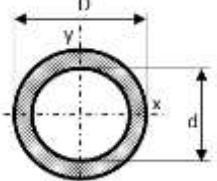
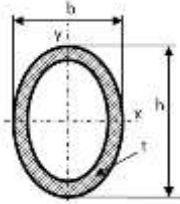
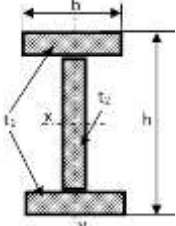
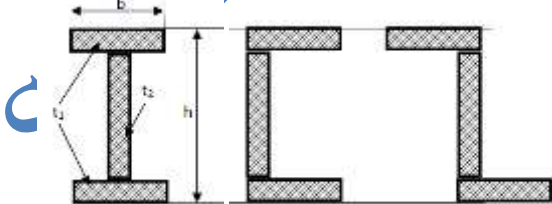
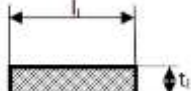
Z vyššie uvedeného je zrejmé, že pre stanovenie napätia vo zvare, je nevyhnutné vhodné určenie prierezových charakteristík zvarov. V Tab. 2.5 sú uvedené prierezové charakteristiky najbežnejších tvarov zvarov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tab. 2.5 Základné prierezové charakteristiky jednoduchých geometrických tvarov

	Základné charakteristiky v ohybe						Základné charakteristiky v krútení			
	$I_x = I_y = \frac{a^4}{12}$ $W_{x,y} = \frac{a^3}{6}$						$I_k = 0,141a^4$ $W_k = 0,208a^3$			
	$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}$ $I_y = \frac{h \cdot b^3}{12}$			$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}$ $W_y = \frac{h \cdot b^3}{6}$			$I_k = c_1 \cdot h \cdot b^3$ $W_k = \frac{c_1}{c_2} \cdot h \cdot b^2$ Ak $m=h/b \geq 4$, je možné použiť $I_k = \frac{(m - 0,63) \cdot b^4}{3}$ $W_k = \frac{(m - 0,63) \cdot b^3}{3}$			
m	1	1,5	2	3	4	6	8	10	∞	
c ₁	0,141	0,196	0,229	0,263	0,281	0,298	0,307	0,312	0,333	
c ₂	0,675	0,852	0,928	0,977	0,990	0,997	0,999	1,000	1,000	
c ₃	1	0,858	0,796	0,753	0,745	0,743	0,743	0,743	0,743	
	$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$ $I_y = \frac{h \cdot b^3}{12} - \frac{h_1 \cdot b_1^3}{12}$ $W_x = \frac{1}{6} \cdot \left[\frac{b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^3}{h} \right]$ $W_y = \frac{1}{6} \cdot \left[\frac{h \cdot b^3 - h_1 \cdot b_1^3}{b} \right]$ $b_1 = b - 2 \cdot t$ $h_1 = h - 2 \cdot t$ $b_s = b - t$ $h_s = h - t$ $S = h_s \cdot b_s$						$I_k = \frac{4 \cdot h_s^2 \cdot b_s^2 \cdot t^2}{h_s \cdot t + b_s \cdot t}$ $W_k = 2 \cdot h_s \cdot b_s \cdot t = 2 \cdot S \cdot t$			
	$I = \frac{\pi d^4}{64}$			$W = \frac{\pi d^3}{32} = \approx 0,1d^3$			$I_k = \frac{\pi d^4}{32}$		$W_k = \frac{\pi d^3}{16} = \approx 0,2d^3$	

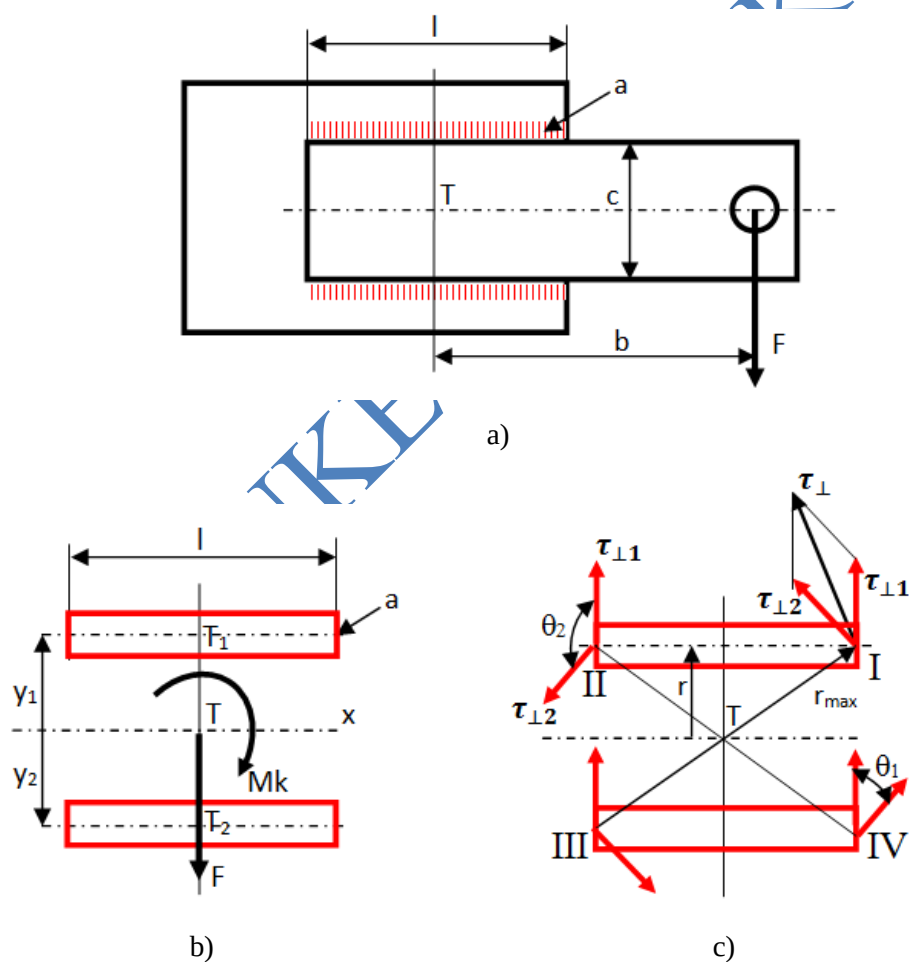
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

	$I = \frac{\pi}{64} \cdot [D^4 - d^4]$ $W = \frac{\pi}{32} \cdot \left[\frac{D^4 - d^4}{D} \right]$	$I_k = \frac{\pi}{32} \cdot [D^4 - d^4]$ $W_k = \frac{\pi}{16} \cdot \left[\frac{D^4 - d^4}{D} \right]$
 $b_1 = b - 2 \cdot t$ $h_1 = h - 2 \cdot t$	$I_x = \frac{\pi \cdot b \cdot h^3}{64} - \frac{\pi \cdot b_1 \cdot h_1^3}{64}$ $I_y = \frac{\pi \cdot h \cdot b^3}{64} - \frac{\pi \cdot h_1 \cdot b_1^3}{64}$ $W_x = \frac{\pi}{32} \left[\frac{b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^3}{h} \right]$ $W_y = \frac{\pi}{32} \left[\frac{h \cdot b^3 - h_1 \cdot b_1^3}{b} \right]$	$I_k = \frac{\pi \cdot (b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^3) \cdot b_1^2}{16(b_1^2 + h_1^2)}$ $W_k = \frac{\pi \cdot (h \cdot b^3 - h_1 \cdot b_1^3)}{16b_1}$
 $b_1 = b - t_2$ $h_1 = h - 2 \cdot t_1$	$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$ $I_y = \frac{2 \cdot t_1 \cdot b^3}{12} + \frac{h_1 \cdot t_2^3}{12}$ $W_x = \frac{1}{6} \left[\frac{b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^3}{h} \right]$ $W_y = \frac{1}{6} \cdot \left[\frac{2 \cdot t_1 \cdot b^3 + h_1 \cdot t_2^3}{b} \right]$	
 $b_1 = b - 0,63 \cdot t_1$ $h_1 = h - 1,67 \cdot t_1 + 1,75 \cdot t_2$ $b_1 = b - t_2 / 2 - 0,315 \cdot t_1$ $h_1 = h - t_2$	$I_k = \frac{1}{3} \cdot (2b_1 \cdot t_1^3 + h_1 \cdot t_2^3)$ $W_k = \frac{1}{3t_1} \cdot (2b_1 \cdot t_1^3 + h_1 \cdot t_2^3)$ kde $t_1 = t_{\max}$	
 $\eta = 1$ $\eta = 1,15$ $\eta = 1,17$	$I_k = \frac{1}{3} \cdot \eta \cdot \sum (l_i \cdot t_i^3)$	

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

 $\eta=1,12$ $\eta=1,2$ $\eta=1,3$	$W_k = \frac{1}{3t_{max}} \cdot \eta \cdot \sum (l_i \cdot t_i^3)$
--	--

V prípade spojenia dvoch preplátovaných materiálov pomocou kútového zvaru – Obr. 2.15a) zaťaženého excentrickým zaťažením voči ťažisku zvaru, postupujeme podľa obvyklého postupu. Vonkajšie zaťaženie premietneme do ťažiska zvaru - Obr. 2.15b).



Obr. 2.15 Spojenie preplátovaných materiálov kútovým zvarom

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

V ťažisku zvaru pôsobí posúvajúca sila F_t , ktorá vo zvare vytvorí šmykové napätie nasledovne:

$$\tau_{\perp 1} = \frac{F_t}{S_w} = \frac{F_t}{2 \cdot a \cdot l} \quad (2.57)$$

Vonkajšie excentrické zaťaženie sa premietne do ťažiska zvaru ako krútiaci moment o veľkosti $M_k = F \cdot b$. Napätie vyvolané krútiacim momentom vyjadríme nasledovne:

$$\tau_{\perp 2} = \frac{M_k \cdot r}{I_w} \quad (2.58)$$

Polárny moment zvaru I_w určíme z geometrie zvaru podľa Obr. 2.15b).

K ťažisku T_1 budú kvadratické charakteristiky prierezu "1" nasledovné:

$$I_{x1} = \frac{l \cdot a^3}{12}, \quad I_{y1} = \frac{a \cdot l^3}{12} \quad (2.59)$$

Polárny moment prierezu "1" je definovaný nasledovne:

$$I_{p1} = I_{x1} + I_{y1} = \frac{l \cdot a^3}{12} + \frac{a \cdot l^3}{12} = \frac{a \cdot l}{12} \cdot (a^2 + l^2) \quad (2.60)$$

S použitím Steinerovej vety ku ťažisku zvaru bude polárny moment plochy "1" zvaru nasledovný:

$$I_{pT} = I_{p1} + S \cdot y_1^2 = \frac{a \cdot l}{12} \cdot (a^2 + l^2) + a \cdot l \cdot y_1^2 = S \cdot \left[\frac{a^2 + l^2}{12} + y_1^2 \right] \quad (2.61)$$

Vychádzajúc z rozmerov zvaru, kde rozmer veľkosti zvaru „a“ voči dĺžke zvaru „l“ je zanedbateľný. Môžeme teda uviesť, že $a^3 \approx 0$, potom polárny moment plochy "1" zvaru voči ťažisku vyjadríme nasledovne:

$$I_{pT} = S \cdot \left[\frac{l^2}{12} + y_1^2 \right] \quad (2.62)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pre viac zvarových plôch vyjadríme polárne momenty uvedeným spôsobom. Výsledný polárny moment k ťažisku zvaru je potom možné definovať nasledovne:

$$I_{pT} = \sum I_{pi} \quad (2.63)$$

Pre prípad zvaru - Obr.2.15b), kedy vzdialenosť ťažísk dielčích plôch zvarov voči ťažisku zvaru je vo vzdialenosti $y = y_1 = y_2$, je polárny moment nasledovný:

$$I_{pT} = 2 \cdot S \cdot \left[\frac{l^2}{12} + y^2 \right] \quad (2.64)$$

Napätie od krútiaceho momentu budeme vyšetrovať v krajných bodoch zvaru I až IV podľa Obr. 2.15c), kde je maximálna vzdialenosť zvaru od ťažiska zvaru $r_{\max}$. Napätie v týchto miestach určíme nasledovne:

$$\tau_{\perp 2} = \frac{M_k \cdot r}{I_w} = \frac{M_k \cdot r_{\max}}{2 \cdot S \cdot \left[\frac{l^2}{12} + y^2 \right]} \quad (2.65)$$

Výsledným napätím vo zvare je kombinácia napätia τ_1 a τ_2 , ktorých smer pôsobenia je zobrazený na Obr. 2.15c). Z analýzy síl na Obr. 2.15c) je zrejmé, že maximálne hodnoty výsledného napätia budú v miestach označených "I" a "IV".

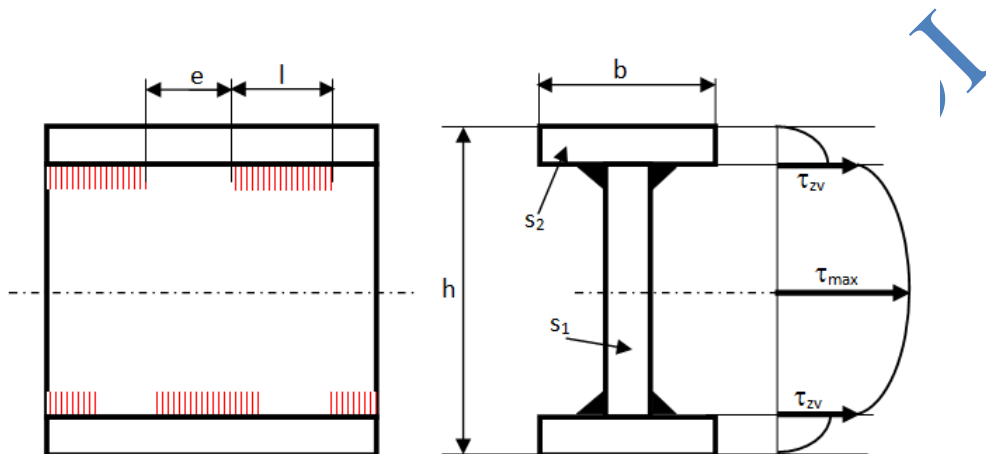
Pre určenie výsledného napätia v bodoch zvaru I až IV použijeme kosínusovú vetu nasledovne:

$$\tau_{\perp} = \sqrt{\tau_{\perp 1}^2 + \tau_{\perp 2}^2 + 2 \cdot \tau_{\perp 1} \cdot \tau_{\perp 2} \cdot \cos \theta_1} \quad (2.66)$$

Z analýzy vzťahu (2.66) je zrejmé, že ak uhol θ sa medzi napätiami bude zmenšovať, potom hodnota $\cos \theta$ bude rásť a bude rásť aj hodnota výsledného šmykového napätia. Z uvedeného a zo smerov napätí v bodoch I až IV zvaru na Obr. 2.15b) je zrejmé, že uhol $\theta_1 < \theta_2$ a teda kritickými bodmi z hľadiska maximálnych napätí v zvare budú miesta označené ako body "I" a "IV".

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Zvárané nosníky pre nosné konštrukcie je možné vyhotoviť v rôznych prierezoch a prevedeniach. Na Obr. 2.16 je zobrazený zváraný nosník prierezu I. Nosník je vyhotovený z pásnic o šírke b a hrúbke s_2 a zo stojiny o hrúbke s_1 . Pásnice sú k stojine privarené obojstranným kútovým zvarom o dĺžke l a rozstupom medzi zvarmi o veľkosti e . Veľkosť zvaru „a“ sa volí podľa hrúbky tenšieho plechu.



Obr. 2.16 Zváraný nosník tenkostenného profilu

Vo zvaroch v miestach spojenia pásnic so stojinou vznikajú šmykové napätia τ od priečnej sily v nosníku T , ktorá bola určená metódami uvoľnenia nosníka a rezu. Napätie v mieste zvaru určíme z Vlasovej teórie pre viazané krútenie tenkostenných prútov [14] nasledovne:

$$\tau = \frac{T \cdot S_x}{I_x \cdot s} \quad (2.67)$$

kde:

T - priečna posúvajúca sila v nosníku,

S_x - statický moment bodu strednice prierezu v ktorom sa určuje napätie,

$$S_x = \int y \cdot dS \quad (2.68)$$

I_x - kvadratický moment prierezu,

s - hrúbka stojiny.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pre nosník na Obr. 2.16 určíme S_x a I_x nasledovne:

$$S_x = b \cdot s_2 \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{s_2}{2} \right) \quad (2.69)$$

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot [b \cdot h^3 - [(b - s_1) \cdot (h - s_2)^3]] \quad (2.70)$$

Z podmienky rovnováhy síl v mieste spojenia pásnice so stojinou je definovaná sila vo zvaru. Táto sila môže byť definovaná pre dĺžku nosníka o jeden rozstup „e“ resp. pre ľubovoľnú dĺžku nosníka (zvyčajne 1 meter) nasledovne:

$$F_{\parallel} = \tau \cdot s_1 \cdot (e + l) \quad (2.71)$$

Pre jeden meter dĺžky nosníka, ak rozmery sú v [mm] a napätie v [MPa] bude sila nasledovná:

$$F_{\parallel} = 1000 \cdot \tau \cdot s_1 \quad (2.72)$$

Pre dĺžku nosníka o jeden rozstup „e“ resp. pre ľubovoľnú dĺžku nosníka (zvyčajne 1 meter) sa napätie pre obojstranný kútový zvar potom určí:

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{\parallel}}{S_w} = \frac{F_{\parallel}}{2 \cdot a \cdot l} = \frac{\tau \cdot s_1 \cdot (e + l)}{2 \cdot a \cdot l} \leq \tau_D = \frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}} = \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.73)$$

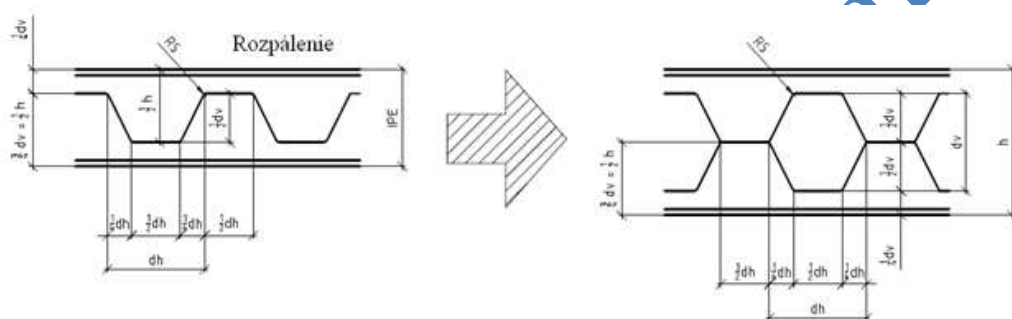
Úpravou vzorca dostávame pomer medzi rozmermi a rozstupom zvaru, vzhľadom na pomer napätia v nosníku a dovoleného napätie vo zvaru.

$$\frac{\tau_D}{\tau} = \frac{s_1 \cdot (e + l)}{2 \cdot a \cdot l} \quad (2.74)$$

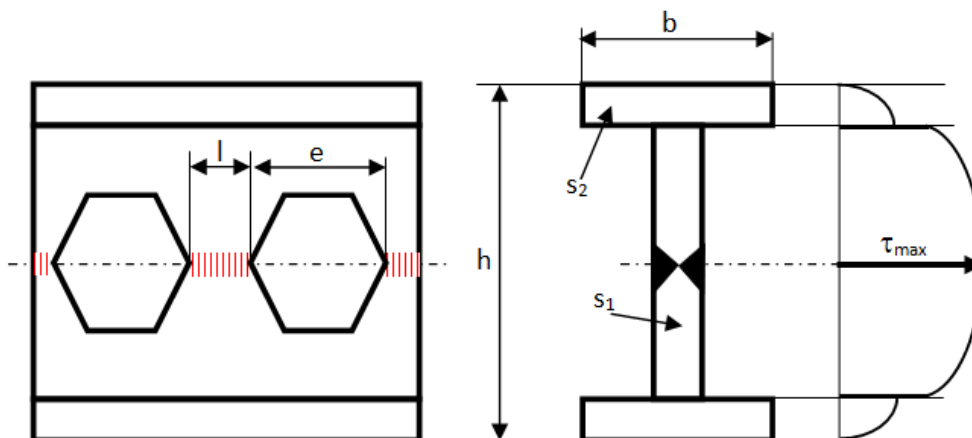
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Obdobným spôsobom postupujeme pri kontrole prelamaného nosníka - Obr. 2.17, ktorý je vyhotovený obojstranným tupým zvarom o veľkosti s . Miesto zvaru sa nachádza v strede nosníka.

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{\parallel}}{S_w} = \frac{F_{\parallel}}{2 \cdot s \cdot l} = \frac{\tau_{max} \cdot s_1 \cdot (e + l)}{2 \cdot s \cdot l} \leq \tau_D = \frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel}} = \beta \cdot \frac{R_e}{n} \quad (2.75)$$



a) spôsob vyhotovenia prelamaného nosníka



b) výpočtový model zvaru prelamaného nosníka

Obr. 2.17 Prelamovaný nosník

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.6 Zvarové spoje zaťažené rázom

Zvary, ktorých počet cyklov zaťaženia počas životnosti je $N > 5 \cdot 10^3$, sú považované za dynamický zaťažené. Dynamické zaťaženie je charakterizované ako premenlivé zaťaženie identifikované pomocou strednej zložky zaťaženia a amplitúdou zaťaženia. Ak v rámci premenlivého zaťaženia sa v zaťažení nachádzajú ešte rázové zaťaženia, je potrebné zohľadniť tento účinok rázov na zvar. Pre vyjadrenie rázového účinku sa používa výpočtový súčiniteľ φ , ktorý je definovaný v Tab. 2.6. Rázový súčiniteľ sa potom použije podľa nasledovných rovníc:

$$F = F_s + \varphi \cdot F_a \quad \text{resp.} \quad M = M_s + \varphi \cdot M_a \quad (2.76)$$

kde:

F_s, M_s – stredná hodnota zaťaženia (sila resp. moment),

F_a, M_a – amplitúdová hodnota zaťaženia.

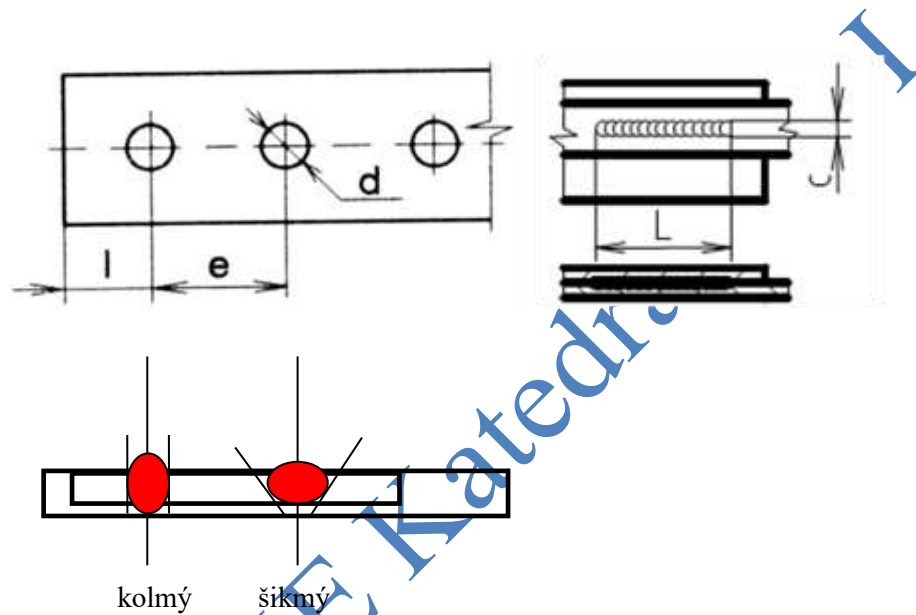
Tab. 2.6 Charakteristické hodnoty súčiniteľa rázu

Druh stroja	Charakteristický pohyb stroja	Súčiniteľ rázu φ
Elektrické rotačné stroje (brúsky, dýchadla, turbíny)	Rotačný pohyb	$1,0 \approx 1,1$
Hobl'ovacie stroje, obrábacie stroje, spaľovacie motory, piestové kompresory	Priamočiary vratný pohyb	$1,2 \approx 1,4$
Ohraňovacie lis, hydraulické kovacie lis a pod.	Priamočiary vratný pohyb a pozvoľné rázy	$1,5 \approx 2,0$
Drviče, triediče, valcovacie stolice, buchary	Rázový pohyb	$2,0 \approx 3,0$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.7 Dierové a žliabkové zvary

Použitie dierových a žliabkových zvarov je predovšetkým pri spájaní tenkých materiálov. Pri použití tohto spôsobu sa zvar vytvára na stenách otvorov a to kolmo alebo šikmo k spájanému materiálu. Odporúča sa, aby priemer diery bol $d > 4s$ a šírka žliabku $b > 2s$, kde s – je hrúbka spájaného materiálu.



Obr. 2.18 Tvar dierového zvaru

V prípade šikmých dierových zvarov je odporúčané zošikmenie od 45° do 55° - Obr.2.18.

V dierovom a žliabkovom zware bude vždy vznikať šmykové napätie τ . Za plochu zvaru je možné považovať plochu vytvorenú na základnej alebo obvodovej ploche.

Dierový zvar:

Základná plocha: $S_{Dzak} = \pi \cdot d^2 / 4$ Obvodová plocha: $S_{Dob} = \pi \cdot d \cdot s$

Žliabkový zvar:

Základná plocha: $S_{Zzak} = c \cdot L$ Obvodová plocha: $S_{Zob} = 2 \cdot L \cdot s$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Napätie v dierovom a žliabkovom zvare sa vyjadrí nasledovne:

$$\tau = F/\alpha.S \quad (2.77)$$

α - korekčný súčiniteľ dierového a žliabkového zvaru.

Po dosadení a úprave bude výsledné napätie v jednom dierovom zvare:

K základnej ploche pre kolmý zvar: $\tau = F/0,5.d^2$, pre šikmý zvar: $\tau = F/0,8.d^2$

K obvodovej ploche pre kolmý zvar: $\tau = F/2,2.s.d$, pre šikmý zvar: $\tau = F/3,1.s.d$

Po dosadení a úprave bude výsledné napätie v jednom žliabkovom zvare:

K základnej ploche pre kolmý zvar: $\tau = F/0,7c.L$, pre šikmý zvar: $\tau = F/c.L$

K obvodovej ploche pre kolmý zvar: $\tau = F/1,4.s.L$, pre šikmý zvar: $\tau = F/2.s.L$

Výsledné napätie v dierových a žliabkových zvaroch musí vyhovovať podmienke:

$$\tau_v = \frac{\tau}{i} \leq 0,65 \cdot \frac{R_e}{k} \quad (2.78)$$

kde:

i – počet dierových alebo žliabkových zvarov.

2.8 Bodové zvary vyhotovené odporovým zváraním

V tomto prípade sú bodové zvary vytvorené odporovým zváraním. Tento druh zvarov sa využíva pri spájaní tenkých plechov. Pri navrhovaní bodového zvaru ho treba zvoliť tak, aby v ňom vzniklo len šmykové napätie. Priemer bodového zvaru sa určí podľa hrúbky tenšieho zo spájaných materiálov a rozstup zvarov e a vzdialenosť zvarov od okraja f sa určuje podľa priemeru zvaru d .

Priemer zvaru d :

$$d = 5 \cdot \sqrt{s} \quad (2.79)$$

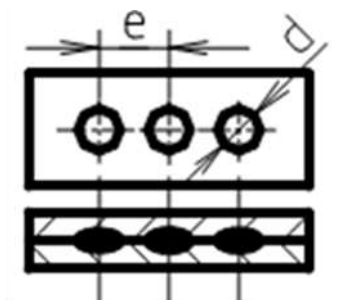
Rozstup zvarov e :

$$e = (2 \div 3) \cdot d \quad (2.80)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Vzdialenosť zvaru od okraja f :

$$f \geq 2,7 \cdot d \quad (2.81)$$



Obr. 2.19 Rozmiestnenie bodových zvarov

Pri kontrole napätia v zvaroch predpokladáme rovnomerné rozloženie zaťaženia vo všetkých zvaroch.

$$\tau_v = \frac{F}{i \cdot \pi \cdot d^2} \leq 0,65 \cdot \frac{R_e}{k} \quad (2.82)$$

V prípade tenkých plechov sa kontroluje zvar proti vytrhnutiu na obvodovej ploche:

$$\tau_v = \frac{F}{i \cdot \pi \cdot d \cdot s} \leq 0,65 \cdot \frac{R_e}{k} \quad (2.83)$$

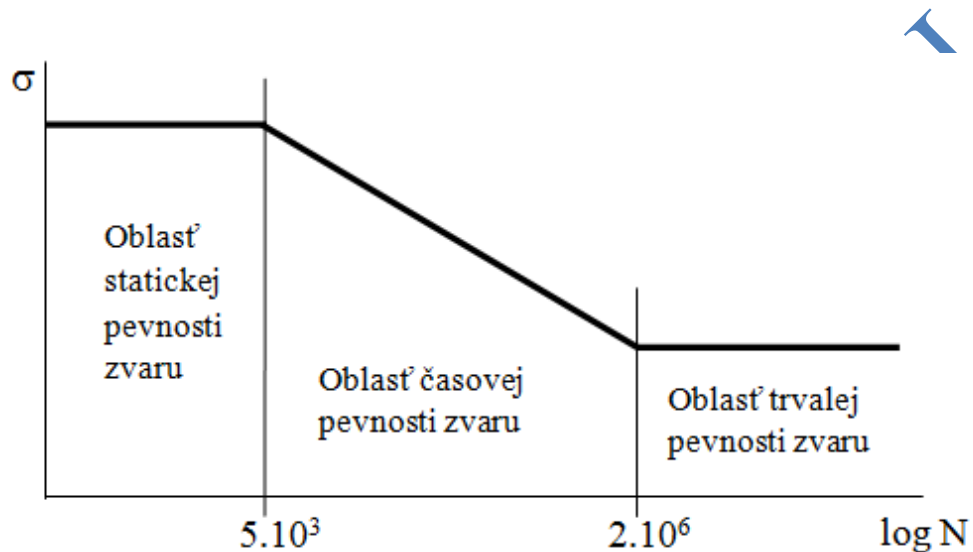
Kontrola odtrhnutia od základného materiálu:

$$\sigma = \frac{F}{d \cdot s} \leq \sigma_{Dov} \quad (2.84)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.9 Dynamicky namáhané zvary

Za dynamicky namáhané sa považujú také zvary, pri ktorých je počas ich životnosti počet cyklov zaťaženia $N > 5 \cdot 10^3$. Počet od $N = 5 \cdot 10^3$ až $2 \cdot 10^6$ cyklov, sa považuje za časovo obmedzenú pevnosť. Počet cyklov $N > 2 \cdot 10^6$ sa považuje za oblasť trvalej pevnosti, v ktorej sa uplatňuje výpočet zvaru na únavu.



Obr. 2.20 Všeobecná Wöhlerová krivka zvaru

Dynamicky namáhané zvary v oblasti trvalej pevnosti je potrebné kontrolovať na únavový lom. Najčastejšou príčinou únavovej poruchy je nevhodne vyhotovený koreň zvaru v podobe neprevarenia koreňa alebo nerovnomerného prevarenia koreňa. Ďalšou z príčin vzniku poruchy je nedostatočne vytvorený prechod zvaru do základného zváraného materiálu. Pre všeobecný návrh zvaru, ktorý je dynamicky namáhaný, je vhodné použiť normu STN 050120. Pre vymedzené technické zariadenia, ako sú žeriavy, bagre, tlakové nádoby, potrubia a iné, je nutné postupovať podľa príslušnej priradenej technickej normy.

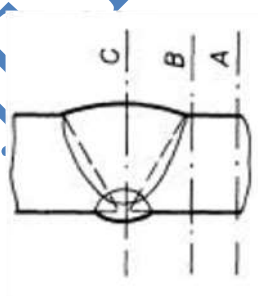
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Všeobecný postup stanovenia bezpečnosti dynamicky namáhaných zvarov je možné zhrnúť v nasledovných bodoch:

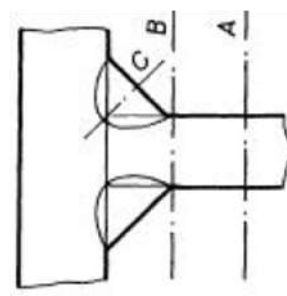
1. Výpočet napätí zvaru σ_h , σ_n , resp. τ_h , τ_n , vznikajúcich od vonkajšieho zaťaženia,
2. Určí sa pomer $r = \sigma_n / \sigma_h$ resp. $r = \tau_n / \tau_h$,
3. Podľa spôsobu namáhania sa vyberie typ Smithovho diagramu,
4. Určí sa priebeh horného napätia ku σ_m ,
5. Zakreslia sa napätia σ_a , σ_A ,
6. Stanoví sa výpočtom alebo graficky miera bezpečnosti. Všeobecná požadovaná bezpečnosť dynamicky namáhaných zvarov v oblasti trvalej pevnosti zvaru má byť v rozmedzí $n = 1,5 \div 3$.

2.9.1. Výpočet napätí zvaru od vonkajšieho zaťaženia

Pri stanovení napätí v dynamicky zaťažennom zvare sa postupuje obdobným spôsobom ako je to v prípade staticky zaťaženého zvaru. Vzhľadom na to, že dynamické zaťaženie je charakterizované predovšetkým zložkami zaťaženia definovanými ako hodnota maximálnej zložky zaťaženia F_h , M_{oh} , M_{kh} ; hodnota strednej zložky zaťaženia F_m , M_{om} , M_{km} ; hodnota amplitúdy zaťaženia F_a , M_{oa} , M_{ka} ; a hodnota minimálneho zaťaženia F_n , M_{on} , M_{kn} , je nevyhnutné stanoviť napätie vo zvare pre všetky zložky dynamického zaťaženia. Napätie vo zvare sa stanoví vo všetkých sledovaných miestach zvaru A-A, B-B, C-C, podľa Obr. 2.21a) pre tupý zvar a Obr. 2.21b) pre kútový zvar.



a) tupý zvar



b) kútový zvar

Obr. 2.21 Sledované miesta kontroly zvaru

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Sledované miesto A-A je miesto základného materiálu, miesto B-B je miesto pripojenia základného materiálu a zvaru a miesto C-C je miesto zvarového kovu. Vo všetkých uvedených miestach môže nastať porušenie únavou a preto je nevyhnutné týmto exponovaným miestam venovať rovnakú pozornosť.

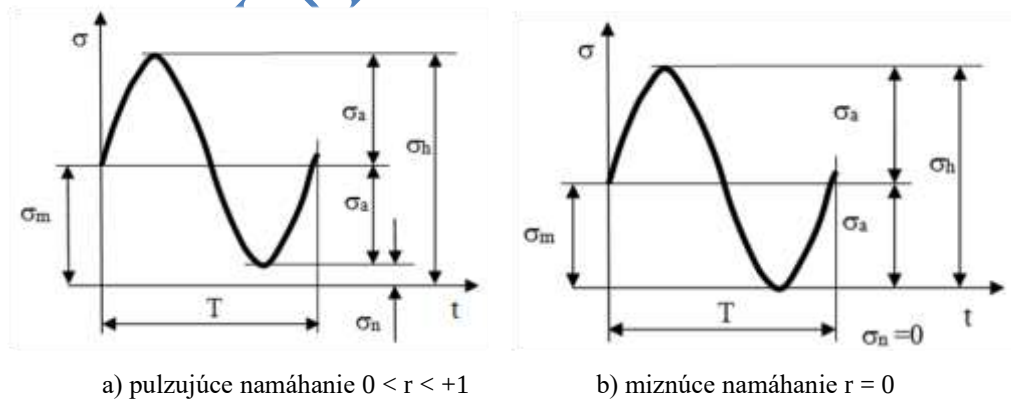
Základné spôsoby zaťaženia a výpočtu napätí v tupých a kútových zvaroch sa uskutočňujú podľa metodiky uvedenej v kapitole 2.4 až 2.5.

2.9.2 Charakteristika dynamického namáhania zvaru

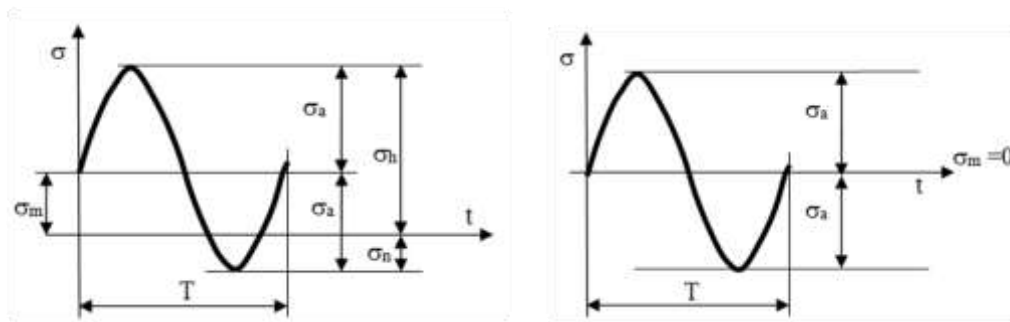
Východiskovými veličinami pre určenie spôsobu dynamického namáhania zvaru sú horné napätie σ_h , dolné napätie σ_n a ich vzájomný pomer nazývaný súčiniteľ nerovnomernosti cyklu r . Súčiniteľ nerovnomernosti cyklu je definovaný rovnicou (2.85) a môže nadobúdať hodnoty $r = < -1, +1 >$. Pre statické zaťaženie je súčiniteľ nerovnomernosti cyklu $r = +1$.

$$r = \sigma_n / \sigma_h \text{ resp. } r = \tau_n / \tau_h \quad (2.85)$$

Základné charakteristiky dynamického namáhania a k nemu prislúchajúci súčiniteľ nerovnomernosti cyklu sú na Obr. 2.22.



Konštruovanie nerozoberateľných spojov



c) striedavé nesúmerné namáhanie $-1 < r < 0$ d) striedavé súmerné namáhanie $r = -1$

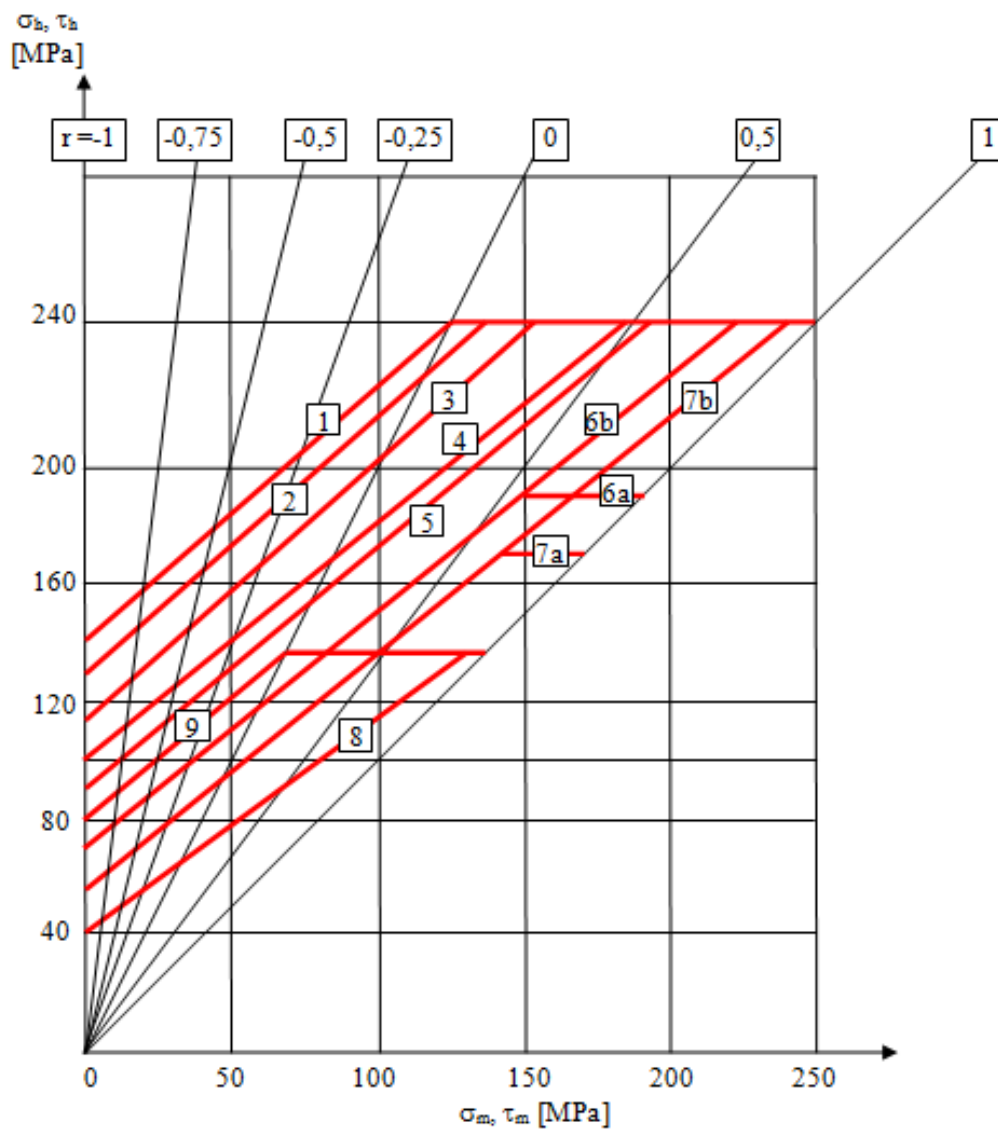
Obr. 2.22 Charakteristika dynamického namáhania

2.9.3 Spôsob namáhania a Smithov diagram

Medza únavy zvarových spojov je závislá na druhu zvaru, jeho umiestnení, triede prevedenia zvaru, tvare zvaru a druhu namáhania zvaru.

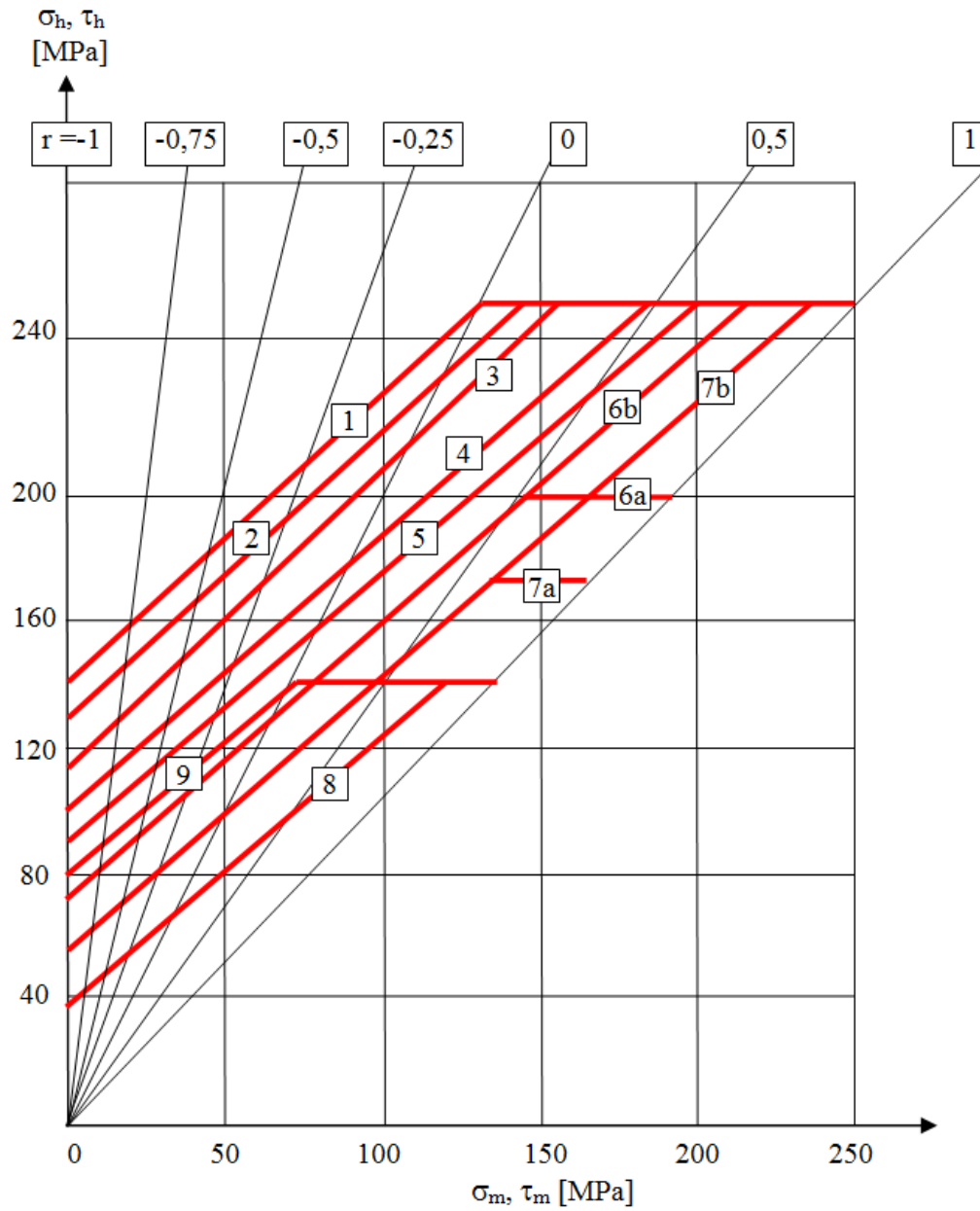
Na nasledujúcich Obr. 2.23 až Obr. 2.25 sú zobrazené Smithove diagramy pre materiál s medzou pevnosti $R_m = 370 \text{ MPa}$, $R_m = 420 \text{ MPa}$ a $R_m = 520 \text{ MPa}$.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



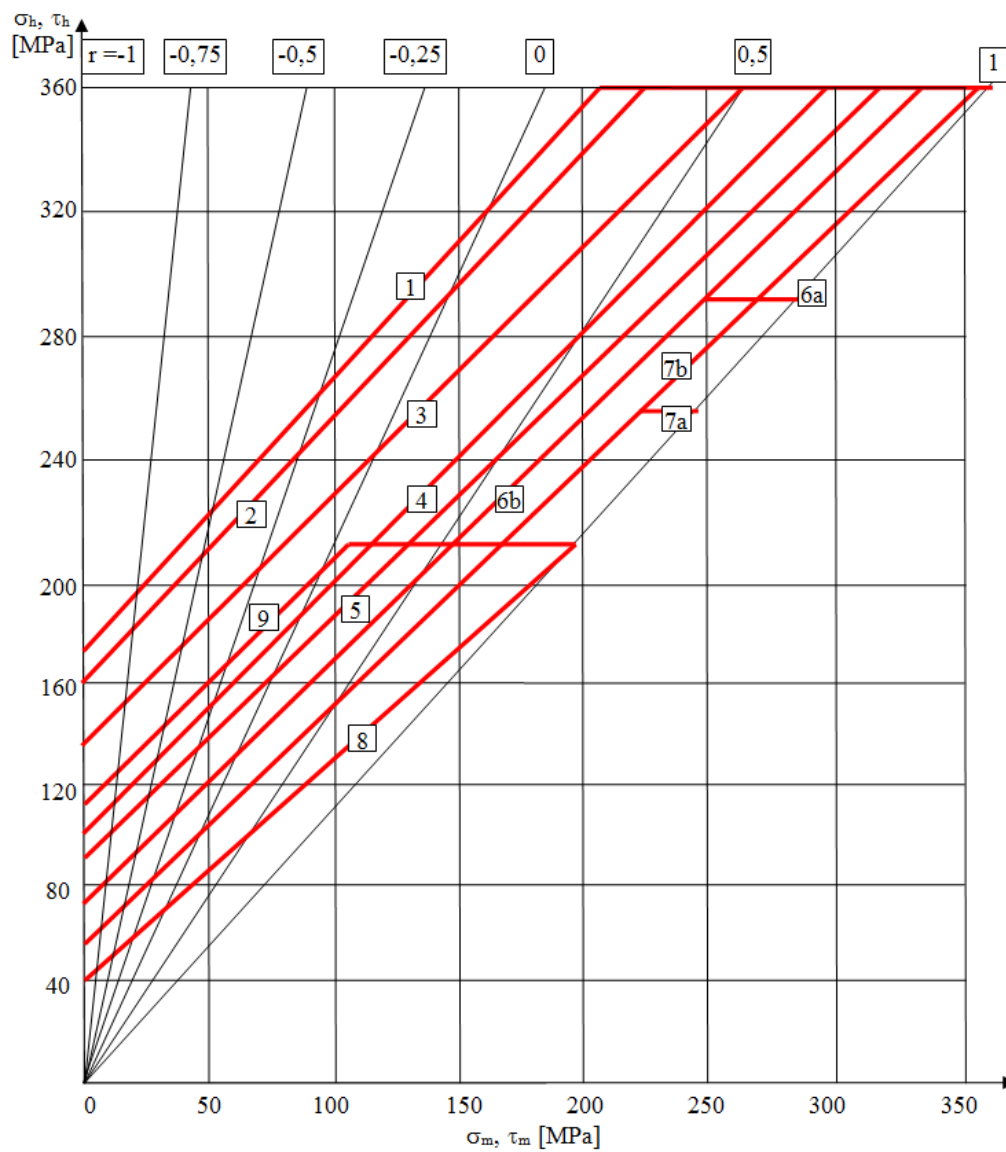
Obr. 2.23 Smithov diagram pre oceľ s medzou pevností $R_m = 370$ MPa

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.24 Smithov diagram pre oceľ s medzou pevností $R_m = 420$ MPa

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

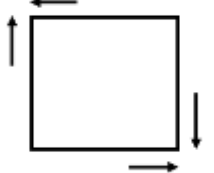
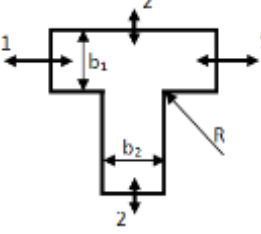
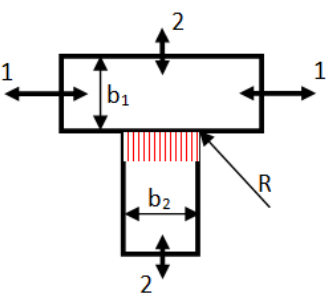


Obr. 2.25 Smithov diagram pre ocel' s medzou pevností $R_m = 520 \text{ MPa}$

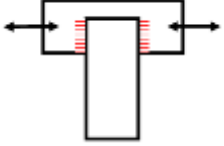
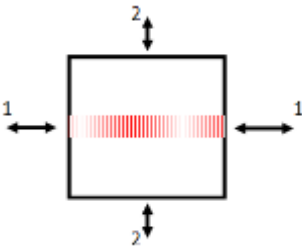
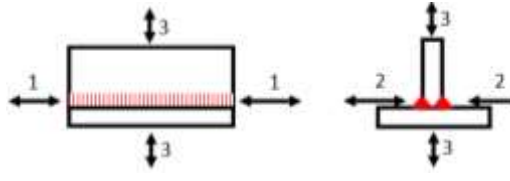
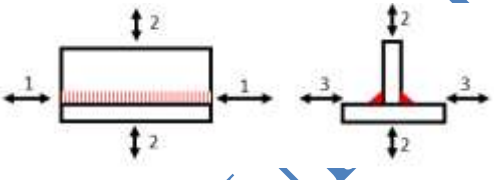
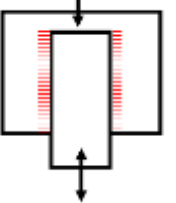
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Smithove diagramy boli vyhotovené pre cyklické zaťaženie ťahom pre počet cyklov $N = 2 \cdot 10^6$. Pre namáhanie tlakom je možné použiť Smithove diagramy na Obr. 2.23 až Obr. 2.25, ale je potrebné mať na zreteli, že medze únavy v tlaku sú v skutočnosti o niečo vyššie hodnoty. Jednotlivé priebehy hornej medze únavy sú označené číslami od 1 do 9. Číselné označenie horných medzí únavy prislúcha spôsobu namáhania zvaru podľa Tab. 2.8.

Tab. 2.8 Priradenie zvarových spojov k triedam prevedenia a priebehom hornej medze únavy

Zaťaženie detailu zvaru	Spôsob namáhania	Trieda zvaru	Označenie kriviek v mieste zvaru		
			A	B	C
	Základný materiál namáhaný ťahom, tlakom		1		
	Základný materiál namáhaný šmykom		9		
	Základný materiál namáhaný ťahom, tlakom		7b		
	Ak $R \geq b/3$		3		
	Ťah - tlak v smere 1 aj v smere 2	CD	1	7b	Ťah 7a Tlak 7b
	Ak $R \geq b_1/3$	AD	1	3	
	Ťah - tlak v smere 1	BD	1	4	
	Ak $R \geq b_2/3$ Ťah - tlak v smere 2	AD	1	3	3
		BD	1	4	4
		CD	1	6b	Ťah 6a Tlak 6b
				7b	Ťah 7a Tlak 7b

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

	Ťah - tlak	CD	1	7b	
	Ťah - tlak v smere 1	AD	1	2	2
		BD	1	3	3
	Ťah - tlak v smere 2	AD	1	2	2
		BD	1	4	4
		CD	1	6b	Ťah 6a Tlak 6b
	Obojstranný 1/2V (K) zvar Ťah - tlak v smere 1	AD	1	2	2
		BD	1	3	3
		AD	1	3	
	v smere 2	BD	1	4	
		CD	1	5	
		AD	1	3	
	v smere 3	BD	1	5	
		CD	1	6b	Ťah 6a Tlak 6b
		AD	1	3	
	Ťah - tlak v smere 1	BD	1	3	3
	v smere 2	CD	1	6b	8
	v smere 3	BD	1	4	
		CD	1	5	
	Ťah - tlak	BD	1	4	
		CD	1	5	
	Ťah, tlak, šmyk	CD	1	6b	8

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

	šmyk	AD BD CD	9 9 9	9 9 9	9 9 9
	šmyk	AD BD CD	9 9 9	9 9 9	9 9 9
	šmyk	AD BD CD	9 9 9	9 9 9	8 8 8
	šmyk, krút	AD BD CD	9 9 9	9 9 9	8 8 8

Pozn: Čiara 1 v mieste zvaru A sa použije za predpokladu, že sa jedná o základný, zvarom neovplyvnený materiál s čiernym povrchom, bez viditeľných chýb. Hrany sú dokonalé opracované (frézovaním resp. brúsením), bez rýh na povrchu naprieč pôsobiacich síl. V prípade nesplnenia týchto podmienok sa používa čiara 2 zo Smithových diagramov.

Prevedenie zvarov sa navrhuje na základe stupňa pevnostnej bezpečnosti zvaru. Označenie S sa používa pre staticky namáhané zvary a je možné ich vyhotoviť v triedach AS, BS, CS. Dynamicky namáhané zvary sa označujú písmenom D a je možné ich vyhotoviť v triedach AD, BD, CD.

Zvar označený AD, je zvarom tupým alebo kútovým, plochým bez vrubu, obrobený do úrovne základného materiálu, koreň zvaru je prevarený a vybrúsený.

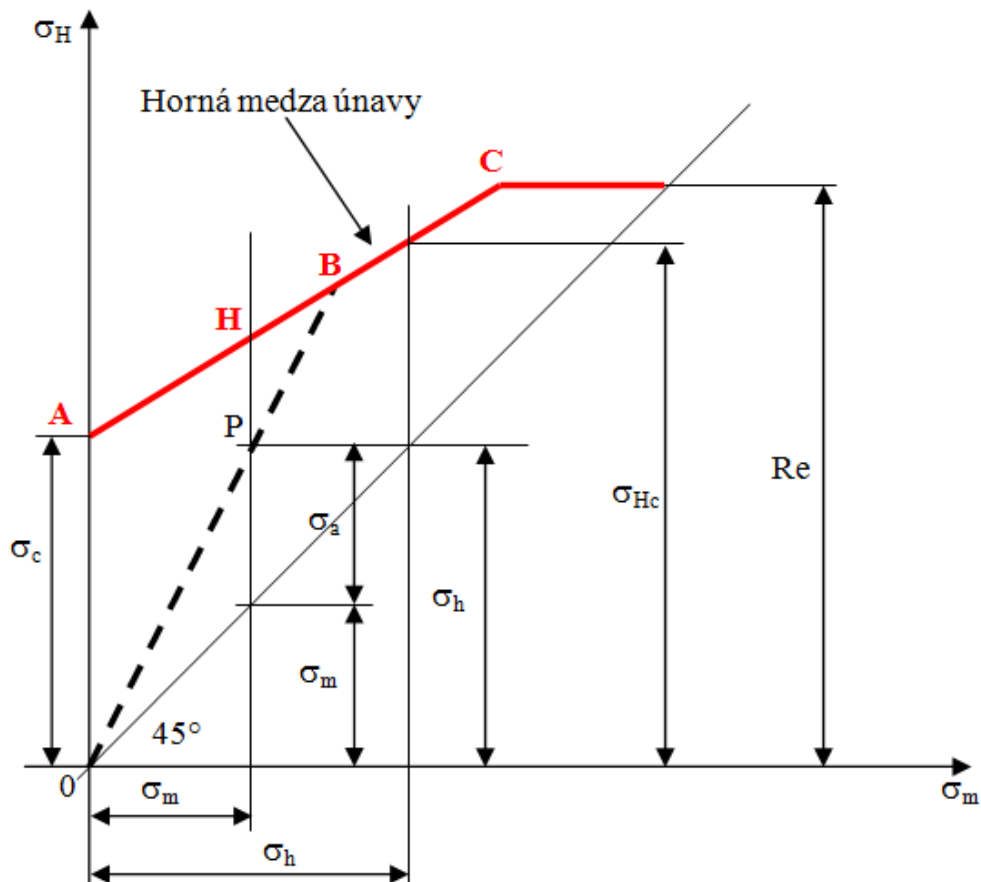
Zvar označený BD, charakterizuje tupý alebo kútový zvar, ktorý je prevýšený, bez vrubu, prechody do základného materiálu sú po celej dĺžke obrúsené, koreň zvaru je prevarený a vybrúsený.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Zvar CD je zvarom tupým prevýšeným alebo kútovým plochým, hĺbka preliačín a koncové krátery majú veľkosť max. 1,5 mm, koreň zvaru bol podložený zvarovou húsenicou. (Pre detailnejšiu charakteristiku prevedenia zvaru vid'. príloha normy STN 050120).

2.9.4 Závislosť horného a stredného napätia

Všeobecný Smithov diagram zvarového spoja – Obr. 2.26 je vyhotovený v súradnicovom systéme horného napätia σ_H v závislosti na strednom napätí σ_m .



Obr. 2.26 Všeobecný Smithov diagram pre zváraný spoj

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

V súlade s praxou sa bude predpokladať, že pomer horného napätia a stredného napätia sa nemení a teda $\sigma_H / \sigma_m = \text{konšt.}$ V takomto prípade je smernica určujúcej priamky $\overline{OP}$ definovanej prostredníctvom stredného napätia vyjadrená nasledovne:

$$\tan \alpha = \frac{\sigma_h}{\sigma_m} = \frac{\sigma_h}{\frac{\sigma_h + \sigma_n}{2}} = \frac{2}{1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_h}} = \frac{2}{1 + r} = k_z \quad (2.86)$$

Rovnica určujúcej priamky $\overline{OP}$ má teda tvar: $\sigma_H = k_z \cdot \sigma_m$. Ak bude medza únavy σ_c základného materiálu definovaná pre striedavý súmerný ťah (– tlak, bude súčiniteľ asymetrie cyklu $r = -1$. Upravená medza únavy σ_c^* bude mať vplyvom vrubového súčiniteľa zvaru β_z nasledovný tvar:

$$\sigma_c^* = \frac{\sigma_c}{\beta_z} \quad (2.87)$$

Veľkosť horného napätia σ_{cH}^* , pri ktorom dôjde k poruche, je definovaná na Obr. 2.22 priesečníkom priamky $A'C'$ a priamky OPH' . Upravená horná medza únavy bude mať nasledovný tvar a je to zároveň rovnica priamky $A'C'$:

$$\sigma_{Hc}^* = \sigma_c^* + \sigma_M - \psi_z \cdot \sigma_M = \sigma_c^* + \sigma_M(1 - \psi_z) \quad (2.88)$$

kde:

ψ_z - súčiniteľ citlivosti materiálu na asymetriu cyklu a charakterizuje sklon priamky $A'C'$,

$\psi_z = 0,15$ - nelegovaná oceľ $R_m = 400 \div 550$ MPa,

$\psi_z = 0,20$ - nelegovaná oceľ $R_m = 650 \div 750$ MPa,

$\psi_z = 0,30$ - legovaná oceľ $R_m = 1100 \div 1280$ MPa.

Upravený Smithov diagram so zapracovaním súčiniteľa citlivosti a upravenou medzou únavy σ_c^* pre skutočný zvarový spoj je zobrazený na Obr. 2.27. Súradnice horného napätia σ_{cH}^* pri ktorom dôjde k poruche, je možné vyjadriť nasledovne:

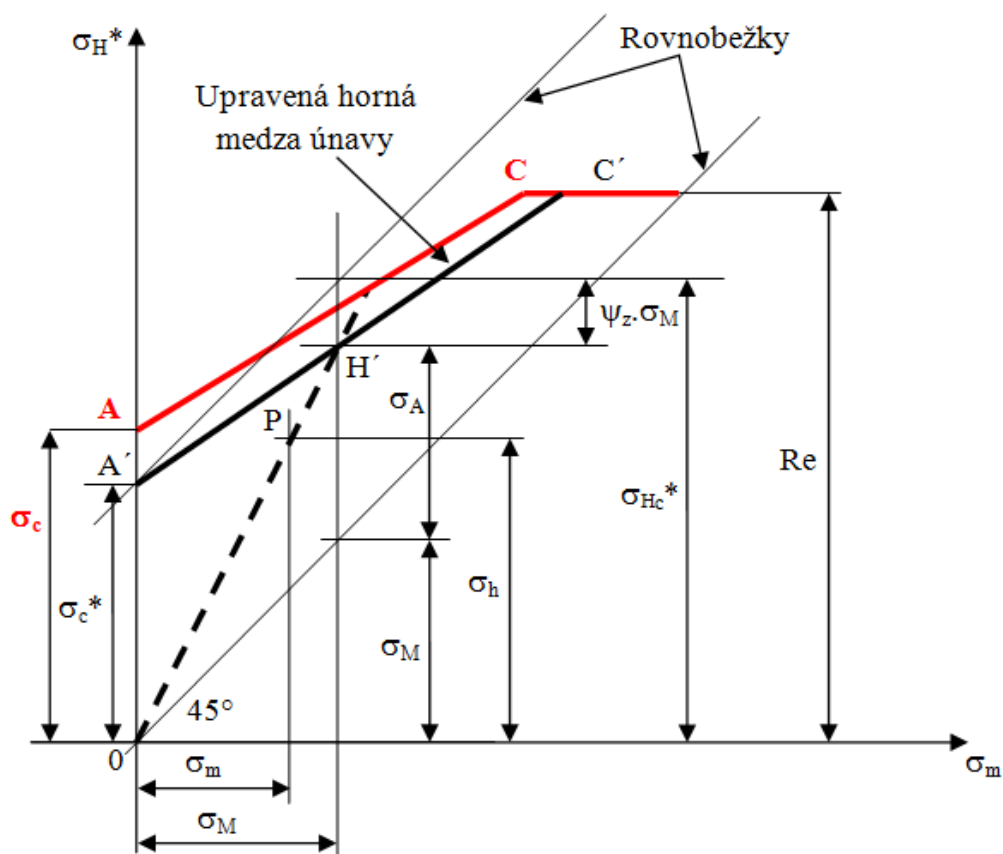
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

$$\sigma_{Hc}^* = k_z \cdot \sigma_M \quad (2.89)$$

$$\sigma_{Hc}^* = \sigma_c^* + \sigma_M(1 - \psi_z) = \frac{\sigma_c}{\beta_z} + \sigma_M(1 - \psi_z) \quad (2.90)$$

$$\sigma_{Hc}^* = \frac{\sigma_c \cdot k_z}{\beta_z \cdot (k_z - 1 + \psi_z)} = \frac{2 \cdot \sigma_c}{\beta_z \cdot [(1 - r) + \psi_z(1 + r)]} \quad (2.91)$$

Smithov diagram zvarového spoja je nutné vytvoriť samostatne pre kontrolovanú oblasť zvaru A-A, B-B a C-C.



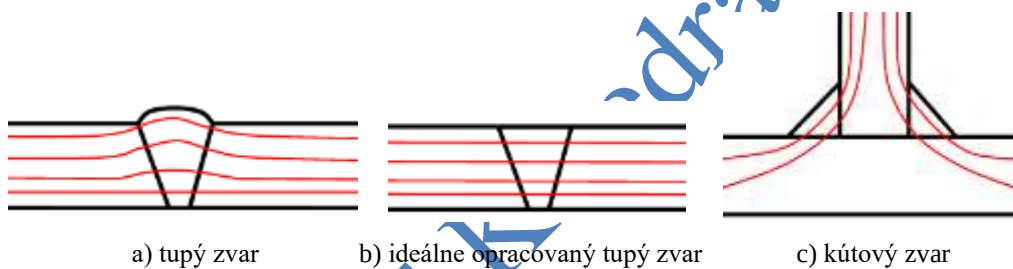
Obr. 2.27 Upravený Smithov diagram pre zváraný spoj

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Hodnoty vrubového súčiniteľa zvaru β_z je potrebné určiť v súlade s údajmi pre vymedzené technické zariadenia a im odporúčané technické normy. Vrubový súčiniteľ zvaru β_z má vplyv na správanie sa materiálu zvaru a je možné vyjadriť materiálovú citlivosť zvaru nasledovne:

$$\psi_z = \frac{\psi}{\beta_z} \quad (2.92)$$

Ideálnym prípadom je $\beta_z = 1$ a nastane vtedy, ak sa zvar bude správať ako základný spájaný materiál - Obr. 2.28b).



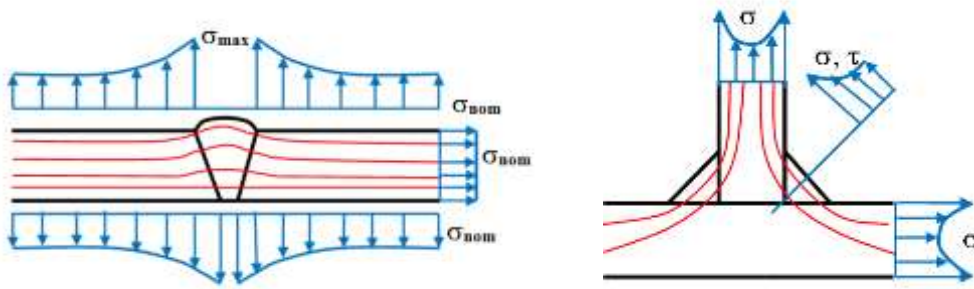
Obr. 2.28 Vplyv tvaru zvaru na priebeh napätia v zvarovom spoji

Pre tupý zvar je to možné dosiahnuť za predpokladu obrúsenia prevýšenia zvaru a dokonalého vybrúsenia prechodov zvaru na základný materiál. Prechody zvaru a základného materiálu je možné mechanicky spevniť pomocou tlakového valčkovania. Podmienkou takýchto úprav je, že dôsledkom brúsenia a valčkovania nesmú vzniknúť mikrotrhliny, ktoré by neskôr boli iniciátorom únavovej trhliny.

Vo všeobecnom prevedení je možné zvoliť vrubový súčiniteľ β_z na základe súčiniteľa koncentrácie napätia α_σ resp. α_τ .

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Existuje mnoho dôvodov pre zníženie hodnoty medze únavy, ale medzi tie najčastejšie patria zle prevarený koreň a ostrý prechod medzi zvarovou húsenicou a základným materiálom.



a) tupý zvar

b) kútový zvar

Obr. 2.29 Koncentrácie napätia vo zvarovom spoji

Uvedené dôvody zapríčiňujú nerovnomerné rozdelenie napätia vo zvarovom spoji - Obr. 2.29a)b). Nerovnomerné rozdelenie napätia v tupom zvarovom spoji je možné vyjadriť pomocou súčiniteľa koncentrácie napätia α_σ , resp. α_τ pre kútový zvar.

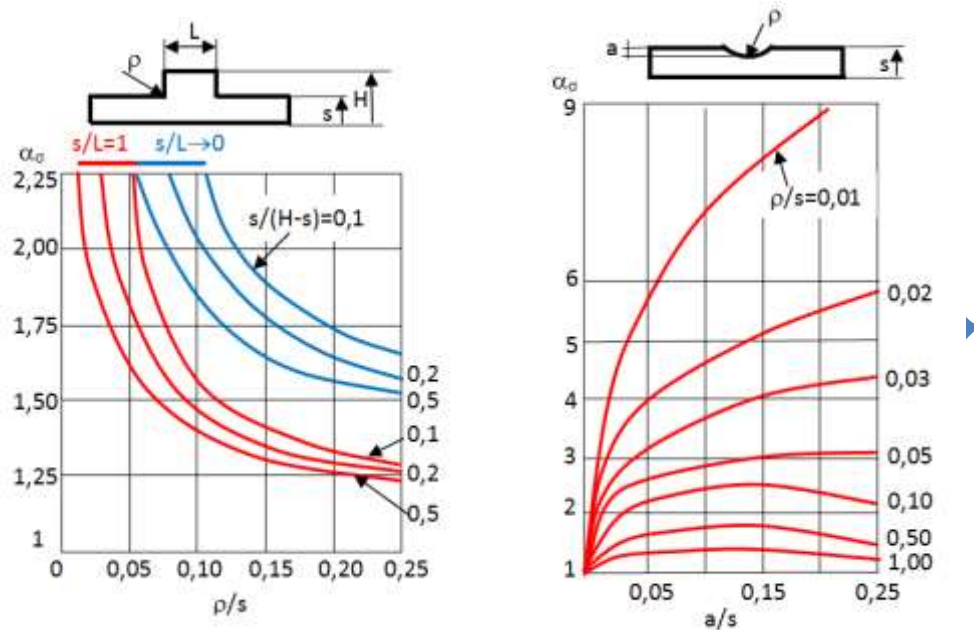
$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (2.93)$$

kde:

σ_{max} a σ_{nom} sú napätia maximálne a nominálne.

Predovšetkým v počiatočnej fáze únavového procesu sa zvary správajú ako klasický koncentrátor napätia a teda sú závislé od tvaru vrubu. Na Obr. 2.30 sú uvedené niektoré prípady stanovenia súčiniteľa koncentrácie napätia pre tupý zvar.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

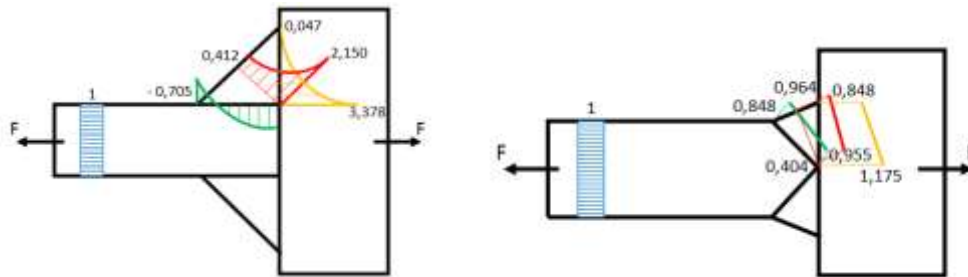


Obr. 2.30 Súčinitele koncentrácie napätia pre tupý zváraný spoj

Pri tavných zvaračských technológiách v ochrannej atmosfére, pri ktorých je pretavená prechodová oblasť, je možné dosiahnuť uspokojivého napojenia zvaru na základný materiál bez ostrého prechodového polomeru. Pri týchto tavných technológiách je možné dosiahnuť veľký polomer $\rho > 10\text{mm}$ napojenia zvarovej húsenice na základný materiál, čo sa výrazne podieľa na znížení súčiniteľa koncentrácie napätia α_σ . Kútové zvary majú vo všeobecnosti vyšší súčiniteľ koncentrácie napätia α_τ , ako súčiniteľ koncentrácie napätia α_σ tupých zvarov.

Na Obr. 2.31 je porovnanie rozloženia napätia v tupom obojstrannom zvare 1/2V (K zvar) a kútovom zvare.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.31 Rozloženie napätia v kútovom a tupom zváranom spoji

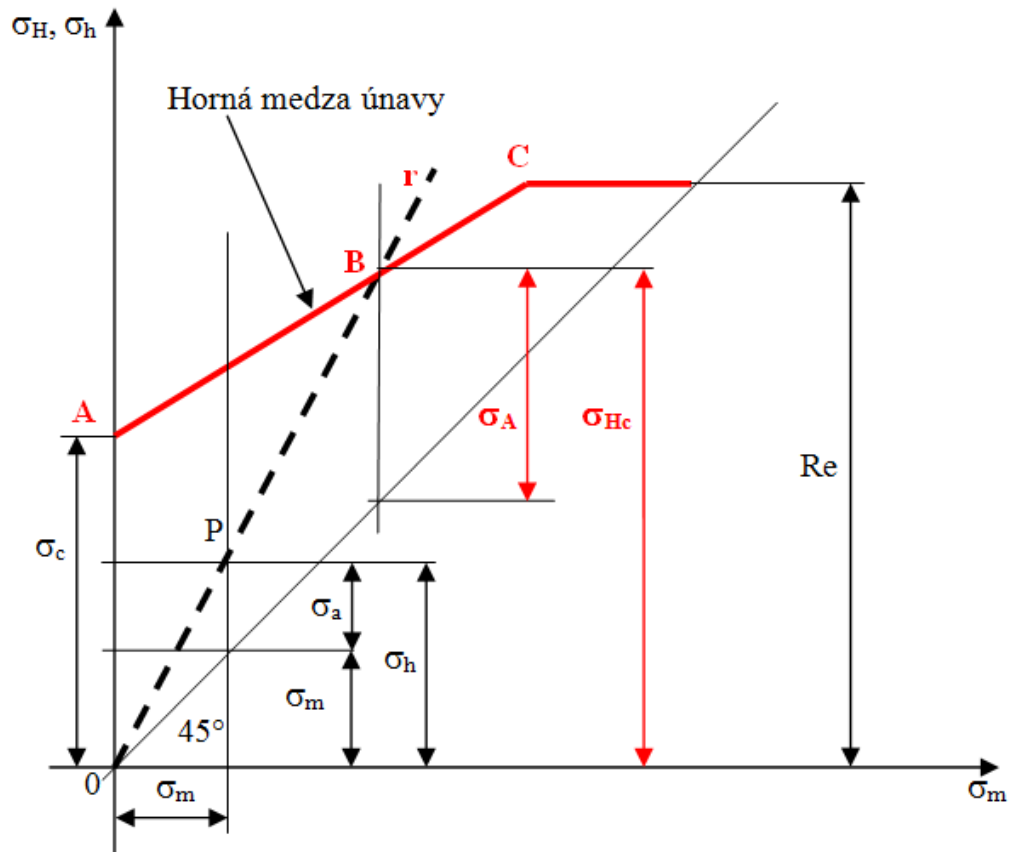
Z Obr. 2.31 je zrejmé, že v prípade tupého zvaru je možné dosiahnuť lepšieho prevarenia koreňa zvaru, čo znižuje súčiniteľ koncentrácie napätia z hodnoty 3,378 na hodnotu 1,175. Porovnaním aj ďalších miest zvaru je zrejmé, že použitím vhodného zvaru je možné výrazne znížiť hodnotu súčiniteľa koncentrácie napätia, čo sa priaznivo prejaví v možnom zvýšení dynamického zaťaženia.

2.9.5 Závislosť amplitúdového a stredného napätia

Do Smithovho diagramu, ktorý zohľadňuje tvar zvaru, prevedenie zvaru, úpravu zvaru a pod. vykreslíme amplitúdové napätie - Obr. 2.32. Smithov diagram je vytvorený v súradnicovom systéme horného napätia (zvislá os) v závislosti na strednom napätí (vodorovná os). Do Smithovho diagramu je teda vynesená stredná hodnota skutočného napätia σ_m v kontrolovanom mieste zvaru, zakreslená zvislou súradnicou (tenká zvislá čiara). Ďalej je možné postupovať nasledovne: Zakreslí sa priamka r (čiarkovaná čiara) charakterizujúca súčiniteľ nerovnomernosti cyklu. V mieste, kde táto priamka pretne hornú medzu únavy definovanú priamkou AC (hrubá červená čiara), vznikne bod B. Bod B určuje hodnotu hornej medze únavy σ_{Hc} pre sledovaný prípad zvaru. V mieste, kde priamka r vytvorí priesečník so zvislou súradnicou stredného napätia, je definovaný bod P. Bod P predstavuje skutočnú hodnotu horného napätia v sledovanom mieste zvarového spoja. Zvislá vzdialenosť bodu P k tvoriacej priamke Smithovho diagramu (tenká plná čiara pod uhlom 45°) je

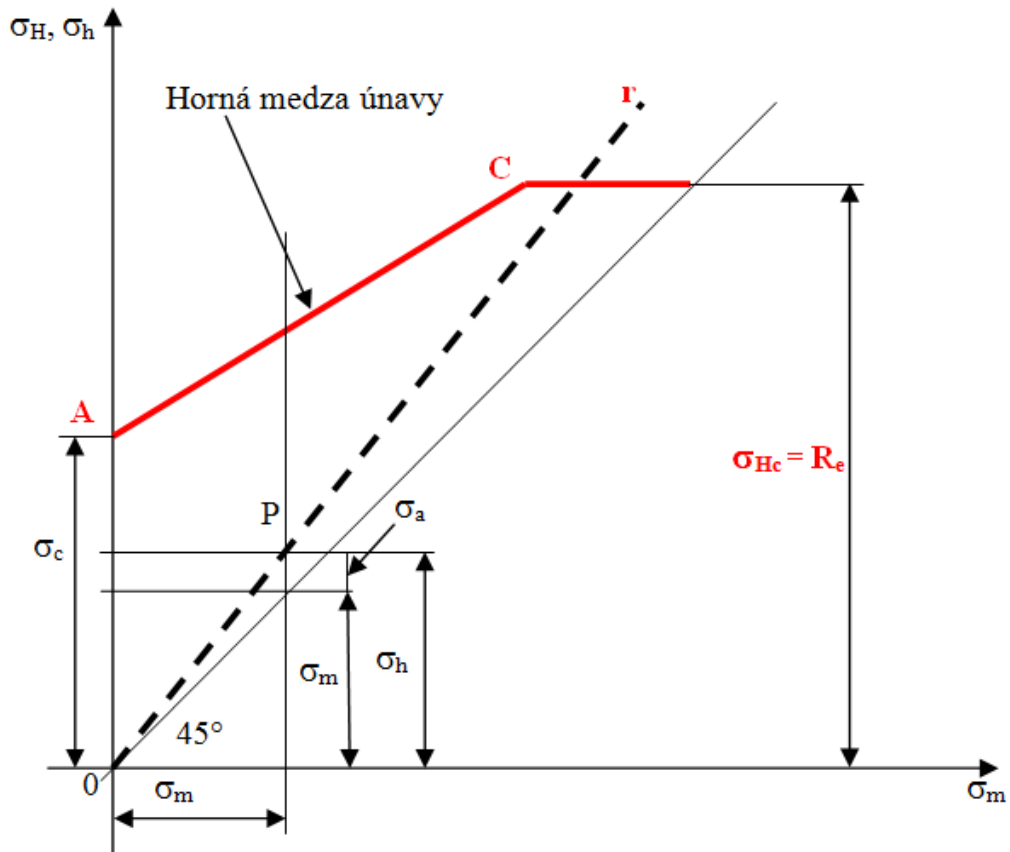
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

hodnota skutočnej amplitúdy napätia v zvarovom spoji σ_a . Zvislá vzdialenosť bodu B k tvoriacej priamke Smithovho diagramu je hodnota porovnávacej amplitúdy medze únavy σ_A .



Obr. 2.32 Smithov diagram pre zváraný spoj

V technickej praxi môžu nastať prípady, kedy priamka r , charakterizujúca nerovnomernosť cyklu, pretne hornú medzu únavy na vodorovnom úseku definovanom medzou klzu materiálu - Obr. 2.33. V takom prípade je skutočná amplitúda vo vzťahu k strednej hodnote napätia nízka a nastane to v prípade ak $r = 1$ resp. r sa blíži k hodnote 1. V takomto prípade má zmysel sledovať len správanie horného napätia v sledovanom mieste zvarového spoja k medzi klzu materiálu.



Obr. 2.33 Smithov diagram pre zváraný spoj

2.9.6 Miera bezpečnosti zvarového spoja

Miera bezpečnosti n_σ a n_τ vyjadruje, koľkokrát musí vzrásť prevádzkové napätie, kým sa dosiahne medzný stav. V praxi zvyčajne určujeme dva druhy bezpečnosti a to bezpečnosť amplitúdovú a bezpečnosť k hornej medze únavy.

Amplitúdová bezpečnosť je všeobecne definovaná nasledovne:

$$n_a = \frac{\sigma_A}{\sigma_a} \quad (2.94)$$

Bezpečnosť k hornej medze únavy je všeobecne definovaná nasledovne:

$$n_H = \frac{\sigma_H}{\sigma_h} \quad (2.95)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

V praxi a vyskytujú tri typické prípady zmien prevádzkových napätí:

1. Stredné napätie σ_m je konštantné a menia sa amplitúdy napätia σ_a . Špeciálnym prípadom je vznik striedavo súmerného namáhania, kedy bude stredné napätie $\sigma_m = 0$. V takomto prípade je amplitúdová miera bezpečnosti totožná s mierou bezpečnosti k hornému napätiu a určí sa nasledovne:

$$n_{\sigma A} = \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \quad (2.96)$$

2. Dolné napätie σ_n je konštantné. Tento prípad môže nastať, ak zvar bude súčasťou zariadenia, ktoré bude predpäté za účelom znižovania vplyvu vonkajšieho cyklického zaťaženia.

3. Pomer napätí σ_a / σ_m resp. σ_n / σ_m je konštantný. Praktické aplikácie zvarových spojov sa odporúča vyhotoviť v danom prevedení.

Vo všeobecnosti sa amplitúdová miera bezpečnosti tupého zvarového spoja, v ktorom vznikajú normálové napätia definuje:

$$n_{\sigma A} = \frac{\sigma_A}{\sigma_a} \quad (2.97)$$

Miera bezpečnosti tupého zvarového spoja, v ktorom vznikajú normálové napätia k hornému napätiu sa určí nasledovne:

$$n_{\sigma H} = \frac{\sigma_{Hc}}{\sigma_h} \quad (2.98)$$

V prípade, ak priamka vyjadrujúca nerovnomernosť cyklu r pretne hornú medzu únavy v mieste vymedzenom medzou klzu - Obr. 2.33, stanovenie amplitúdovej bezpečnosti je bezpredmetné. V takomto prípade je nutné určiť mieru bezpečnosti k hornému napätiu vzťahujúcu ju k medzi klzu.

$$n_{\sigma H} = \frac{R_e}{\sigma_h} \quad (2.99)$$

Analogickým spôsobom postupujeme v prípade kútového zvarového spoja, v ktorom sa vyskytujú šmykové napätia a tupého spoja, v ktorom sa budú vyskytovať šmykové napätia.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Amplitúdová miera bezpečnosti zvarového spoja so šmykovými napätiami sa definuje:

$$n_{\tau A} = \frac{\tau_A}{\tau_a} \quad (2.100)$$

Miera bezpečnosti zvarového spoja so šmykovými napätiami k hornému napätiu sa definuje:

$$n_{\tau H} = \frac{\tau_{Hc}}{\tau_h} \quad (2.101)$$

Aj v prípade šmykových napätí, ak priamka asymetrie cyklu r pretne hornú medzu únavy v mieste vymedzenom medzou klzu - Obr. 2.33, stanovenie amplitúdovej bezpečnosti je bezpredmetné. V takomto prípade je nutné určiť mieru bezpečnosti k hornému napätiu vzťahujúcu ju k medzi klzu upravenej pre šmykové napätia nasledovne:

$$n_{\tau H} = \frac{0,577R_e}{\tau_h} \quad (2.102)$$

Požadovaná bezpečnosť má byť v rozmedzí $k = 1,5 \div 3$. Nižšiu hodnotu bezpečnosti ($k = 1,5 \div 2$) je možné požadovať, ak súčiniteľ asymetrie cyklu nadobúda hodnoty $r = < 0, +1 >$. Ak však súčiniteľ asymetrie cyklu nadobúda hodnoty $r = < -1, 0 >$, je potrebné požadovať mieru bezpečnosti v rozmedzí $k = 2 \div 3$.

V prípade kombinovaného namáhania, keď vo zvarovom spoji vznikajú normálové aj šmykové napätia, sa určí zrovnávacie napätie zvaru alebo redukované napätie zvaru a tieto napätia sa porovnávajú s napätím únavovým. Zároveň musia byť splnené aj podmienky pevnosti zvaru, akoby bol namáhaný staticky.

Miery bezpečnosti pre normálové aj šmykové napätie vo zvare:

$$n = \frac{\sigma_{Hc}}{\sigma_{red}} \quad (2.103)$$

Možný je aj postup, kedy sa určí samostatne miera bezpečnosti pre normálové napätia a šmykové napätia.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Miera bezpečnosti pre normálové napätia:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_A}{\sigma_a} \quad (2.104)$$

Miera bezpečnosti pre šmykové napätia:

$$n_{\tau} = \frac{\tau_A}{\tau_a} \quad (2.105)$$

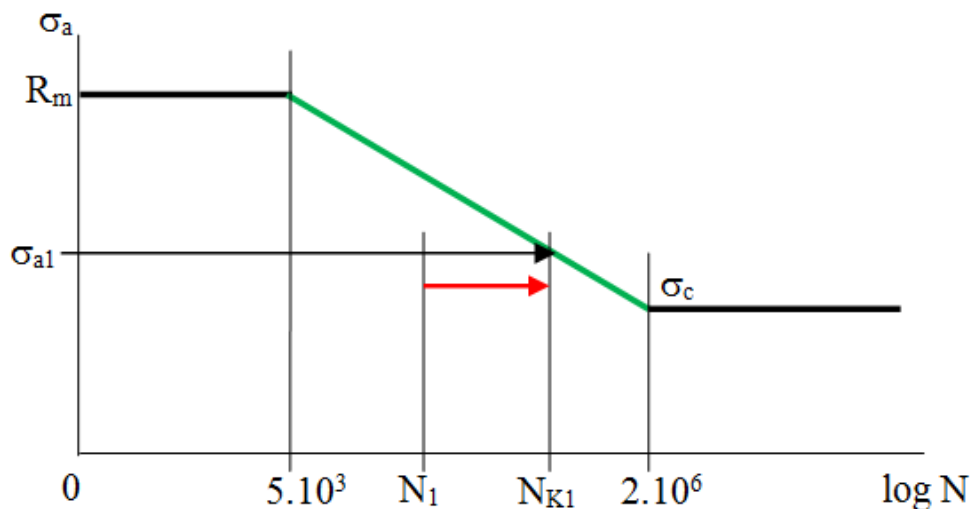
Výsledná miera bezpečnosti zvaru sa stanoví nasledovne:

$$n = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{(n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2)}} \quad (2.106)$$

2.9.7 Kontrola dynamicky namáhaného zvarového spoja v oblasti časovej pevnosti

V oblasti časovej pevnosti - Obr. 2.34 sa využíva aproximácia Wöhlerovej únavovej krivky. K aproximácii je možné využiť závislosť napätia a počtu cyklov nasledovne:

$$\sigma_c^m \cdot 2 \cdot 10^6 = R_m \cdot 5 \cdot 10^3 = \text{konšt.} = \sigma_a^m \cdot N \quad (2.107)$$



Obr. 2.34 Wöhlerová krivka

Exponent m v rovnici (2.107) charakterizuje sklon Wöhlerovej krivky na Obr.2.34 - zelený úsek. Pre ocele s nižšou pevnosťou sa pohybuje exponent sklonu

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Wöhlerovej krivky v rozmedzí $m = 3,5 - 4,5$, pre ocele s vyššou pevnosťou v rozmedzí $m = 4 - 6$.

Vychádzajúc zo vzorca (2.107) je možné pre napätie v oblasti časovej pevnosti σ_{a1} definovať počet cyklov zvaru do porušenia N_{K1} , za podmienky zaťaženia striedavým súmerným zaťažením, a teda za podmienky súčiniteľa asymetrie cyklu $r = -1$, podľa nižšie uvedeného vzťahu.

$$\sigma_c^m \cdot 2 \cdot 10^6 = R_m \cdot 5 \cdot 10^3 = \text{konšt.} = \sigma_{a1}^m \cdot N_{K1} \quad (2.108)$$

Pri zaťažení napätím σ_{a1} pri všeobecnom počte cyklov N_1 zostáva do poškodenia $N_{K1} - N_1$ cyklov (červená šípka v Obr. 2.34). Zvyškovú životnosť je možné definovať aj ako stupeň poškodenia D nasledovne:

$$D = \frac{N_1}{N_{K1}} \quad (2.109)$$

V prípade, že zvar bol pri zaťažení σ_{a1} zaťažený počtom cyklov $N_1 = 0$ (nezaťažený zvar), je potom stupeň poškodenia $D = 0$. Pri zaťažení σ_{a1} , ak zvar absolvoval počet cyklov $N_1 = N_{K1}$, bude stupeň poškodenia $D = 1$, čiže dôjde k porušeniu zvaru. Ak je zvar zaťažený všeobecným súborom cyklov N_i s amplitúdami σ_{ai} , potom výsledný stupeň poškodenia na základe teórie lineárnej kumulácie poškodenia bude:

$$D = \sum_{i=1}^i D_i = \sum_{i=1}^i \frac{N_i}{N_{Ki}} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^i N_i \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_c} \right)^m \quad (2.110)$$

Kde počet cyklov N_{Ki} symetrického cyklu vyjadríme zo vzorca (2.110) takto:

$$N_{Ki} = N_c \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{ai}} \right)^m \quad (2.111)$$

Ak bude zaťažovací cyklus nesymetrický so súčiniteľom asymetrie cyklu $r = \sigma_n / \sigma_h$, pri strednom napätí σ_{mi} potom bude platiť:

$$N_{Ki} = N_c \cdot \left[\frac{\sigma_c}{\sigma_{ai} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{mi}}{R_m} \right)^{-1}} \right]^m \quad (2.112)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Obdobný princíp stanovenia stupňa poškodenia sa používa aj v prípade kútových zvarov s hodnotami napätia τ_a , τ_m , τ_c .

2.9.8 Príklady dobrej praxe dynamicky namáhaného zvarového spoja

Príklad dobrej praxe, ktorý bude predstavený, je zváraným nosníkom žeriavovej dráhy. Nosník žeriavovej dráhy je dynamicky zaťažanou zváranou konštrukciou, pri ktorej bolo potrebné stanoviť kumulatívne poškodenie nosníkov. Pre stanovenie zaťažovacej analýzy boli uskutočnené tenzometrické merania prevádzkového zaťaženia vybraných nosníkov. Následne bolo podľa normy EN 1993-1-9 Eurokód 3: Navrhovanie oceľových konštrukcií, časť 9: Únava, vrátane príloh A a B, vypočítané kumulatívne poškodenie nosníkov.

Nosníky žeriavových dráh sú prosté nosníky o dĺžke 18 000 mm. Pod niektorými prostými nosníkmi - Obr. 2.35 o dĺžke 18 000 mm sú podložené brzdové portály - Obr. 2.36. Prierez prostého nosníka žeriavovej dráhy o dĺžke 18 000 mm bez brzdového portálu je na Obr. 2.37. Umiestnenie brzdových portálov pod uvedené nosníky si vyžiadalo úpravu nosníkov tak, že na spodnú pásnicu I profilu nosníka boli priečne privarené plechy od stredu nosníka vpravo aj vľavo, slúžiace na prenos horizontálnych brzdových síl do brzdového portálu. Prierez nosníka žeriavovej dráhy o dĺžke 18 000 mm s brzdovým portálom je totožný ako na Obr. 2.37 a je zobrazený na Obr. 2.38.



Obr. 2.35. Prostý nosník o dĺžke 18 000 mm

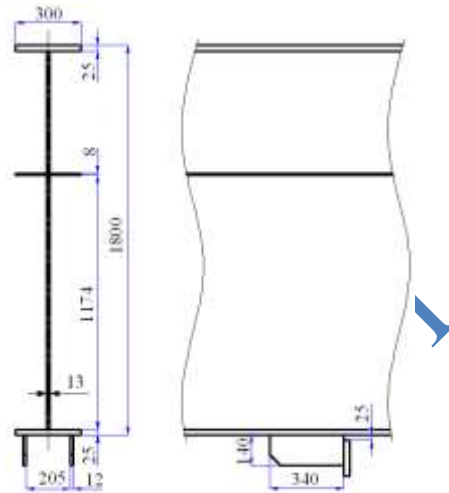


Obr. 2.36 Prostý nosník o dĺžke 18 000 mm
s brzdovým portálom

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.37. Prierez nosníka žeriavovej dráhy
bez brzdneho portálu

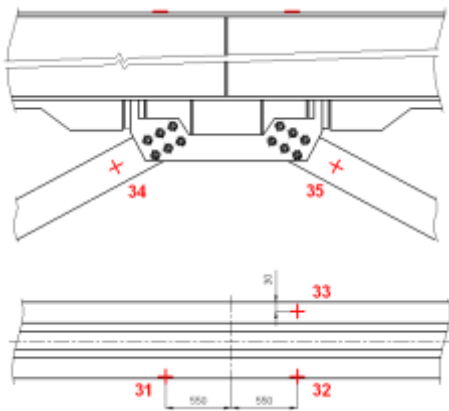


Obr.2. 38. Prierez nosníka žeriavovej dráhy
s brzdým portálom

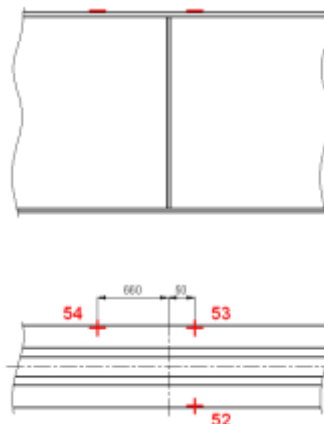
Expertíza žeriavovej dráhy tenzometrickým meraním bola uskutočnená na základe vopred vykonanej teoretickej analýzy a vizuálnej obhliadky žeriavovej dráhy. Následne bola navrhnutá metodika experimentálneho určenia deformácie a z nej vyplývajúcej napätosti. Miesta aplikácie snímačov sa zvolili tak, aby tenzometre boli aplikované na každom type nosníka na dráhe, s brzdým portálom aj bez neho a aby boli zahrnuté všetky obmedzenia pri pohybe žeriavov po dráhe vplyvom rozmiestnenia technológie. Celkovo pre účely expertízy boli aplikované snímače na 10 vybratých nosníkoch.

Príklady rozmiestnenia snímačov na nosníku s brzdým portálom sú na Obr. 2.39 a na prostom nosníku na Obr. 2.40.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.39 Rozmiestnenie tenzometrických snímačov na nosníku s brzdovým portálom



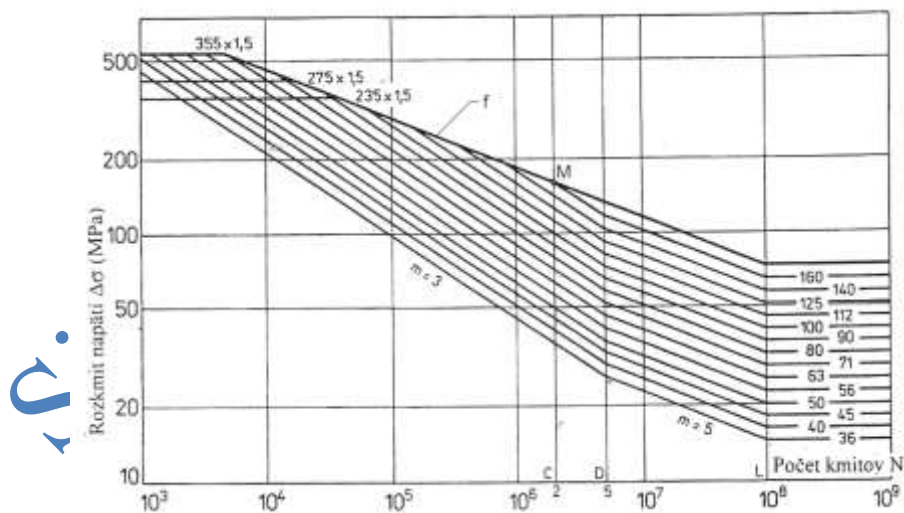
Obr. 2.40 Rozmiestnenie tenzometrických snímačov na prostom nosníku

Kumulácia únavového poškodenia označovaná aj ako zvyšková životnosť únavy žeriavových dráh sa posudzuje pre druh namáhania s premenným rozkmitom napätí. Pri premennom namáhaní konštrukčného detailu sa vyjadruje spektrum normálových napätí $\Delta\sigma_i$. Spektrum zaťaženia sa nahradí blokovým zaťažením s k-blokmi $n_1 - \Delta\sigma_1$; $n_2 - \Delta\sigma_2$; $n_i - \Delta\sigma_i$; $n_k - \Delta\sigma_k$, kde n_i je počet kmitov pri rozkmite $\Delta\sigma_i$ počas životnosti konštrukcie. Hodnoty $\Delta\sigma_D$ a $\Delta\sigma_L$ pre jednotlivé kategórie detailov sú v Tab. 2.9. Je dôležité podotknúť, že pri danom vrubovom prípade sa Wöhlerove krivky chápu ako krivky s pravdepodobnosťou bezporuchovosti $R = 95 \%$ (približne stredná hodnota mínus dve smerodajné odchýlky).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

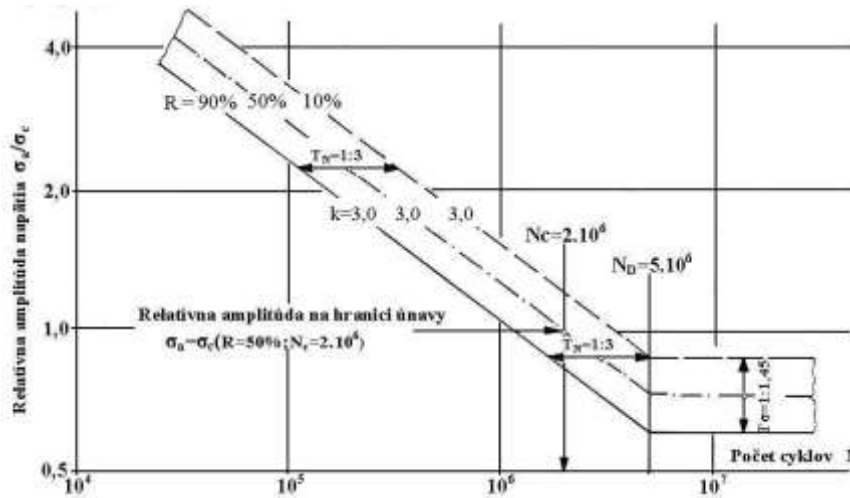
Tab. 2.9. Číselné hodnoty kriviek únavovej životnosti

Namáhanie detailu	Kategória detailu KD	log a		Rozkmit napätí pri		
				N_{MKD}	$N_D = 5 \cdot 10^6$	$N \geq N_L = 10^8$
	$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$ MPa	$m = 3$	$m = 5$	$\Delta\sigma_{MKD}$ MPa	$\Delta\sigma_D, \Delta\tau_D$ MPa	$\Delta\sigma_L, \Delta\tau_L$ MPa
normálovým napätím	160	12,913	17,056	160	118	65
	140	12,739	16,766	196	103	57
	125	12,592	16,520	232	92	51
	112	12,449	16,282	273	83	45
	100	12,301	16,036	324	74	40
	90	12,164	15,807	379	66	36
	80	12,010	15,551	452	59	32
	71	11,855	15,292	–	52	29
	63	11,699	15,032	–	46	26
	56	11,546	14,777	–	41	23
	50	11,398	14,531	–	37	20



Obr. 2.41 Krivky únavovej pevnosti s dvojitým sklonom ($m = 3$ a $m = 5$) pre jednotlivé kategórie detailov

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.42 Normovaná Wöhlerova krivka pre zvarovaný detail z konštrukčnej ocele podľa Obr. 2.41

Hodnoty parciálnych únavových poškodení D_i sa určia zo vzťahu:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2.113)$$

Posúdenie spoľahlivosti konštrukčného detailu namáhaného na únavu s premenným rozkmitom normálových napätí $\Delta\sigma_i$ sa vykoná porovnaním celkového poškodenia D_d s prípustnou hodnotou poškodenia D_L . Podmienka spoľahlivosti je vyjadrená vzťahom:

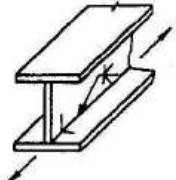
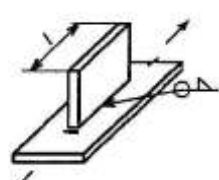
$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq D_L \quad (2.114)$$

Pokiaľ nie sú stanovené presnejšie hodnoty, možno uvažovať s $D_L = 1,0$.

Křivky podľa Obr. 2.41 sa uvažujú s pravdepodobnosťou bezporuchovosti na úrovni 95 %. V Tab. 2.10 sú uvedené kategórie detailu a konštrukčné detaily pri posudzovaní nosných konštrukcií na únavu, pre jednotlivé typy zvaraných profilov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tab. 2.10 Kategórie detailu podľa prílohy bývalej normy STN 73 1401

Číslo detailu	Kategória detailu	Konštrukčný detail	Číslo detailu	Kategória detailu	Konštrukčný detail
206	125		403	50 L > 100 mm	

Podľa údajov prevádzkovateľa žeriava bolo zaťaženie nosníkov cyklami namáhania v počte 9 209 683 plus cca 2 x 290 000 t.j. 9 789 863 cyklov bez započítania určitých špecifik, pričom zo sledovania prevádzky vyplynuli dve skupiny zaťažovania dráhy a to so žeriavmi s priemerným bremenom o hmotnosti cca 11000 kg a tým istým počtom cyklov so žeriavmi bez bremena. Intenzita zaťažovania jednotlivých meraných nosníkov za dané obdobie prevádzky je uvedená v Tab. 2.11.

Pri určení životnosti vybraných nosníkov žeriavovej dráhy sa vychádzalo z výsledkov nameraných a vypočítaných časových priebehov prírastkov normálových napätí získaných pomocou tenzometrického merania.

Tab. 2.11 Kumulatívne poškodenie meraných nosníkov

Meraný nosník č.	Kategória detailu KD	Prírastok napätia		Počet zaťažovacích cyklov		Kumulatívne poškodenie D_a
		Od zaťaženého žeriava $\Delta\sigma_1$	Od prázdneho žeriava $\Delta\sigma_2$	Od zaťaženého žeriava	Od prázdneho žeriava	
1	50	84	71,4	146 848	146 848	0,87
2	50	76,6	65,8	146 848	146 848	0,667
3	50	61,6	54	3 181 705	3 181 705	7,7
4	50	72,5	60,5	1 566 378	1 566 378	5,8
5	50	40,6	30,3	1 566 378	1 566 378	0,89
6	125	50,8	35,8	3 181 705	3 181 705	∞
7	125	90,6	67,8	3 181 705	3 181 705	1,3
8	125	108	85,2	1 566 378	1 566 378	1,245
9	125	65,7	49,2	1 566 378	1 566 378	∞
10	125	65,5	49,8	1 566 378	1 566 378	∞

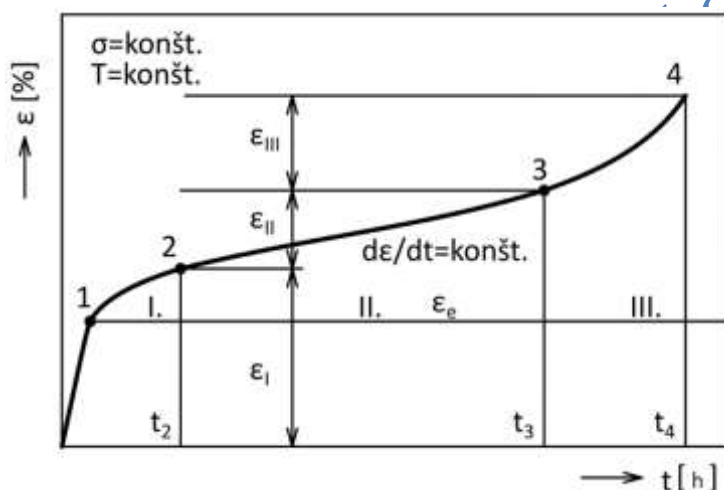
Kumulatívne poškodenie v poslednom stĺpci Tab. 2.11 presahujúce hodnotu 1,0 je indikáciou prekročenia životnosti posudzovaných nosníkov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.10 Konštruovanie zvaraných tlakových zariadení

Do skupiny zvaraných oceľových konštrukcií, pracujúcich v oblasti tečenia (tečenie nastáva pri dlhodobom namáhaní konštrukčných častí v oblasti vysokých teplôt), patria rôzne zariadenia s rozdielnymi prevádzkovými podmienkami.

Tečenie (angl. creep) nastáva pri dlhodobom namáhaní konštrukčných častí v oblasti vysokých teplôt. Rozlišujú sa tri štádia (úseky) tečenia, v ktorých prebiehajú rôzne procesy poškodzovania a spevňovania materiálu - Obr. 2.43.



Obr. 2.43 Typická krivka tečenia ocele pre tlakové zariadenia [58]

Oblasť I. na Obr. 2.43 je prechodové štádium, kde po intenzívnej deformácii sa materiál prispôbi podmienkam namáhania a nastáva druhé štádium, takzvané II. ustálené tečenie. Tomuto štádiu sa hovorí aj stacionárne alebo lineárne a vyznačuje sa konštantnou rýchlosťou tečenia v závislosti od napätia a teploty. Posledné štádium – III. urýchlené tečenie je charakterizované prudkým rastom tečenia, vznikom dutín, trhlín a porušením materiálu.

Výpočtovými charakteristikami sú:

- medza pevnosti pri tečení (žiaropevnosť) $R_{m/T/t}$ je napätie, ktoré pri teplote T (°C) a pri trvalom pôsobení po dobu t (hod) vyvolá porušenie,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- medza tečenia $R_{A/T/t}$ je napätie, ktoré pri teplote T ($^{\circ}\text{C}$) a pri trvalom pôsobení po dobu t (hod) vyvolá trvalé pomerné predĺženie A (%).

Používajú sa aj krátkodobé charakteristiky materiálov ako:

- medza klzu pri teplote T ($^{\circ}\text{C}$) sa označuje $R_{p0,2/T}$,
- medza pevnosti pri teplote T ($^{\circ}\text{C}$) sa označuje $R_{m/T}$.

Väčšina tlakových zariadení, ktoré pracujú v oblasti vysokých teplôt, sa navrhuje podľa žiarupevnosti ocelí $R_{m/T/t}$ pre danú výpočtovú teplotu T ($^{\circ}\text{C}$) a danú výpočtovú životnosť t (napríklad 200 000 hod). Pri týchto zariadeniach, nárast deformácie „dlhodobým tečením“ materiálu, neohroží ich prevádzkovú spôsobilosť. Niektoré konštrukčné časti sa však musia navrhovať tak, aby ich deformácia neprevýšila účinnú hodnotu. Sem patria napríklad lopatky plynových a parných turbín. Tie sa navrhujú podľa medze tečenia $R_{A/T/t}$ ocele. Tieto konštrukčné časti musia vyhovovať aj podľa žiarupevnosti, čo pre húževnate žiarupevné ocele a zliatiny býva splnené, pretože $R_{A/T/t} < R_{m/T/t}$.

Podľa vyššie uvedeného sa mení ich konštrukčné riešenie, požiadavky na vlastnosti ocelí a zvarových spojov, metódy skúšania zariadení pred uvedením do prevádzky a v priebehu životnosti. Z najvýznamnejších výrobkov, vrátane tlakových zariadení, ktoré pracujú pri zvýšených teplotách pod oblasťou tečenia patria:

- tlakové nádoby: jednoduché a nevyhrievané stabilné,
- kotly a parogenerátory: na vykurovanie, teplárenské, elektrárenské,
- výmenníky tepla, teplárenské, elektrárenské, v chemickom priemysle,
- potrubie typu parovodov a horúcovodov,
- zvarané turbínové rotory a skrine,
- zvarané skrine veľkých spaľovacích motorov (napr. lodných, atď.).

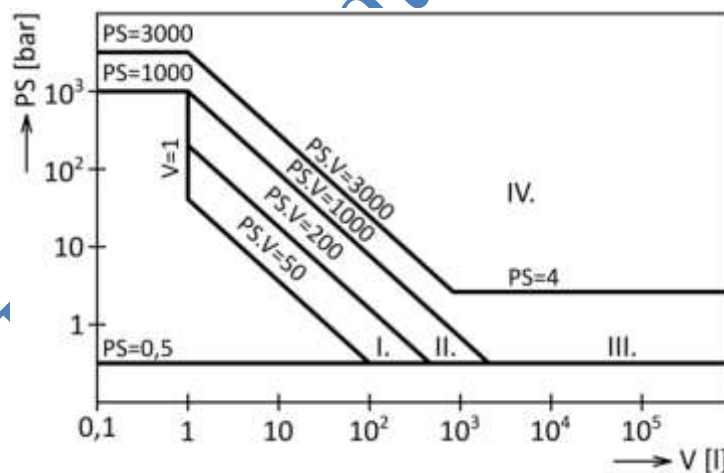
Tlakové nádoby sú teda zariadenia objemového typu, t. j. aparáty a rôzne nádoby, ktoré tvoria podstatnú časť výrobných zariadení v chemickom a potravinárskom priemysle. V nich sa uskutočňujú očakávané fyzikálne a chemické

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

zmeny spracovávaných látok na žiadané produkty. Tieto zariadenia pracujú za rozdielnych tepelných a tlakových podmienok pri rôznom koróznom zaťažení. Pre ich pevnostný výpočet, výrobu, konštrukciu aj prevádzku platia zvláštne pravidlá. Ich cieľom je zabezpečiť požadovanú prevádzkovú bezpečnosť a spoľahlivosť tejto procesnej techniky.

Direktíva Európskej komisie – PED o aproximácii členských štátov pre tlakové zariadenia 97/23/EC z 20.05.1997 rozdeľuje tlakové zariadenia podľa:

- vlastností tekutín do dvoch skupín a to na 1. skupinu, do ktorej patria výbušné, horľavé a toxické tekutiny a na 2. skupinu, do ktorej patrí voda, para a ostatné tekutiny.
- súčinu tlaku a objemu respektíve na potrubia so súčinom tlaku a priemeru do 9 skupín, definované deviatimi diagramami (pozri Obr. 2.44).



Obr. 2.44 Diagram 2 pre zariadenia tlakových nádob na vodnú paru [58]

(PS – označenie pre tlak, V – označenie pre objem)

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.10.1 Prehľad predpisov a noriem pre navrhovanie tlakových zariadení

Na niektoré zariadenia boli vydané európske normy EN, na ďalšie sú rozpracované, príprava určitých noriem postupuje pomaly pre odlišné prístupy v národných normách a v dôsledku prípravy celosvetových noriem ISO. Pri spracovaní ISO noriem sa presadzujú americké ASME, API a japonské prístupy.

Používané normy týkajúce sa konštrukčného návrhu tlakových zariadení sú:

- STN EN 764: Tlakové zariadenia. (Časť 1-7),
- STN EN 1708-1: Zváranie. Základné detaily spojov pri zváraní oceli,
- STN EN 10028: Ploché výrobky z ocelí na tlakové nádoby a zariadenia. (Časť 1-7),
- STN EN 286: Jednoduché nevyhrievané tlakové nádoby na vzduch alebo dusík. (Časť 1-4),
- STN 69 0010 Tlakové nádoby stabilné,
- STN EN 13445: Nevyhrievané tlakové nádoby. (Časť 1-9),
- STN EN 12952: Vodorúrkové kotly a pomocné zariadenia. (Časť 1-16),
- STN EN 12953: Veľkopriestorové vodné kotly. (Časť 1-14),
- STN EN 13480: Kovové priemyselné potrubia. (Časti 1-7),
- STN EN 12516: Priemyselné armatúry. Pevnostný návrh plášťa. (Časť 1-4),
- STN EN 1591: Príruby a ich spoje. Časť 1-4),
- STN EN 13458: Kryogénne nádoby. Stabilné vákuom izolované nádoby,
- STN EN 14197: Kryogénne nádoby. Stabilné nevákuovo izolované nádoby,
- STN EN 13831: Uzatvorené expanzné nádoby so zabudovanou membránou na inštaláciu do vodných systémov,
- STN EN 12542: Zariadenia a príslušenstvo na LPG. Stabilné zvárané valcovité nádoby z ocele sérievej výroby na skladovanie skvapalneného uhlíkovodíkového plynu (LPG) s objemom najviac 13 m³. Navrhovanie a výroba,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- STN EN 14075: Sériovo vyrábané stabilne inštalované zvarané valcové nádoby z ocele na skladovanie skvapalneného ropného plynu (LPG) pod zemou s objemom do 13 m³. Návrh a výroba,
- STN EN 13530: Kryogénne nádoby. Veľké prepravné vákuom izolované nádoby,
- STN EN 14398: Kryogénne nádoby. Veľké prepravné nevákuovo izolované nádoby,
- STN EN 13094: Cisterny na prepravu nebezpečných vecí. Kovové cisterny s pracovným tlakom do 0,5 bar. Návrh a konštrukcia,
- STN EN 14025: Nádrže na prepravu nebezpečných tovarov. Kovové tlakové nádrže. Navrhovanie a výroba.

Jednou zo základných zložiek akosti tlakového zariadenia je jeho spoľahlivosť, čím sa rozumieme schopnosť plniť požadované funkcie pri zadaných prevádzkových ukazovateľoch, v danom čase a podľa stanovených technických podmienok. Bolo by však mylné sa domnievať, že spoľahlivosť je vecou toho, kto zariadenie prevádzkuje. Požadovaná spoľahlivosť sa musí zabezpečiť už v predvýrobných etapách, predovšetkým v projekčnej a konštrukčnej fáze. Tu zariadenie vzniká a potrebné zmeny ku zvýšeniu spoľahlivosti sa dajú dosiahnuť zmenami vo výkresovej dokumentácii, t. j. bez veľkých nákladov. Projektant, výpočtár aj konštruktér sa teda na utváraní spoľahlivosti navrhovaného zariadenia podieľajú významnou mierou.

Jednou zo základných metód na dosiahnutie vyššej spoľahlivosti je aj predimenzovanie základných dimenzií konštrukčných prvkov, ako je hrúbka steny nádoby. Aby sa vyhlo neekonomickým riešeniam, používajú sa záväzné výpočtové postupy, osvedčené materiály a také projekčné a konštrukčné riešenia, ktoré sa v praxi osvedčili. Takéto postupy a odporúčania sú obsahom súboru noriem, ktoré majú vypracované všetky priemyselne vyspelé krajiny sveta.

Na Slovensku bola používaná norma STN 690010 – Tlakové nádoby stabilné. Norma sa vzťahuje na voľbu materiálov, výpočet únosnosti, konštrukciu, vývoj,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

výrobu, skúšanie, preberanie a dokumentáciu tlakových nádob stabilných s výpočtovým tlakom vyšším ako 0,0 MPa. Neplatí pre kotly, mobilné nádoby, guľové uskladňovacie nádrže a na nádoby obsahujúce jedovaté, výbušné alebo rádioaktívne látky. Koncepcia normy nezodpovedá prístupom EN ani požiadavkám Direktívy – PED. Najväčšie nedostatky vyplývajú zo spôsobu voľby materiálov, vrátane materiálov, ktorý nezohľadňuje požiadavky na húževnatosť z hľadiska odolnosti proti krehkému porušeniu. Normu nahradili normy STN EN 286 a STN EN 13445.

Norma STN EN 13445 platí pre voľbu materiálu, výpočet pevnosti, konštrukciu, výstroj, výrobu, skúšanie, preberanie a dokumentáciu tlakových nádob stabilných s výpočtovým pretlakom väčším ako 0,07 MPa. Platí aj pre tlakové nádoby stabilné z feriticko-perlitických ocelí, ktoré sú určené pre teploty pod 0 °C.

Norma má aj svoje obmedzenia a neplatí pre:

- parné a horúcovodné kotle vrátane príslušenstva, platí však pre ohrievače napájacej vody, prihrievače pary vykurované parou a chladiče pary odpojiteľné za prevádzky od tlakového celku kotla,
- tlakové nádoby na dopravu plynov,
- guľové uskladňovacie tlakové nádoby,
- tlakové nádoby obsahujúce plyny alebo pary s výpočtovým pretlakom najviac 0,07 MPa,
- nekovové tlakové nádoby,
- tlakové nádoby pracujúce s rádioaktívnymi látkami,
- tlakové nádoby obsahujúce žieravé, jedovaté, alebo výbušné kvapaliny s pretlakom presahujúci hydrostatický tlak najviac o 0,07 MPa pri akejkoľvek pracovnej teplote,
- tlakové nádoby obsahujúce nežieravé, nejedovaté, alebo nevýbušné kvapaliny o akejkoľvek pracovnom pretlaku, pokiaľ ich teplota neprevýši hodnotu zodpovedajúcu teplote varu kvapaliny pri pretlaku 0,07 MPa, atď. podľa normy.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Norma sa skladá z týchto častí:

- Časť 1: Všeobecná časť
- Časť 2: Materiály
- Časť 3: Navrhovanie
- Časť 4: Výroba
- Časť 5: Inšpekcia a skúšanie
- Časť 6: Požiadavky na navrhovanie a výrobu tlakových nádob a častí navrhovaných zo sferodizovanej liatiny
- Časť 8: Dodatočné požiadavky na tlakové nádoby z hliníka a hliníkových zliatin
- Časť 9: Zhoda súboru noriem EN 13445 s ISO 16528.

Podľa tejto normy sa navrhujú tlakové nádoby stabilné, teda aj väčšina objemových zariadení a aparátov pre chemický a potravinársky priemysel, biotechnológie a príbuzné odvetvia.

2.10.2 Materiál pre navrhovanie tlakových zariadení

Materiály používané pre výrobu tlakových nádob je nutné deliť podľa účelu ich použitia v súlade s platnými normami a predpismi. Všeobecné požiadavky sú:

- materiály musia byť dostatočne ťažné a húževnaté,
- materiál musí byť odolný proti krehkému lomu,
- hodnota ťažnosti v ktoromkoľvek smere musí byť $> 14\%$,
- nárazová práca (V-vrub) musí byť $\geq 27 \text{ J}$ pre feritické a 1,5 % až 5 % Ni legované ocele a $KV \geq 40 \text{ J}$ pre ocele materiálovej skupiny 8, 9.3 a 10,
- prídavné materiály pre zváranie musia vyhovovať požiadavkám pre základný materiál,
- pri použití materiálu s obmedzenými možnosťami zvárania, sa musia špecifikovať podmienky zvárania v technologickom postupe zvárania vrátane požiadaviek na kontrolu zvarových spojov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Materiály pre výrobu tlakových nádob a ich častí sa volia podľa nasledujúcich hľadísk:

- výpočtového pretlaku,
- najnižšej a najvyššej teploty steny a výpočtovej teploty,
- objemu tlakovej nádoby,
- konštrukčného riešenia,
- chemického zloženia a charakteru pracovnej látky (korózna agresivita, výbušnosť, jedovatosť atď.),
- technologických a fyzikálne chemických vlastností materiálu,
- spôsobu výroby,
- iných požiadaviek napr. na prevádzku, umiestnenie a pod.

Materiály pre tlakové nádoby sa volia podľa vrubovej húževnatosti v závislosti od najnižšej teploty steny tak, aby nedošlo ku krehkému porušeniu. Podľa toho sú rozdelené na materiály pre pracovné teploty $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vyššie a materiály pre pracovné teploty pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Materiály používané na tlakové nádoby musia byť tepelne spracované na stav požadovaný normou. Spôsob tepelného spracovania volí výrobca zariadenia.

Pokiaľ materiál bude použitý na výrobu tlakových častí tvárnením za tepla, možno použiť materiál tepelne nespracovaný. Tlakové časti musia však byť tepelne spracované po dokončení výroby častí, a to na stav uvedený v norme. Pre austenitické nehrdzavejúce ocele je potrebné navyše preukázať vyhovujúcu odolnosť proti medzikryštalickej korózii.

Materiály sa musia zatriediť v súlade s CR ISO 15608: 2000, aby sa zosúladiť požiadavky na výrobu a kontrolu s všeobecnými typmi materiálov – Tab. 2.12.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tab. 2.12 Skupinový systém pre ocele (výber z CR ISO 15608: 2000)

Skupina	Pod-skupina	Druh ocele
1		Ocele so zaručenou minimálnou medzou klzu $R_{eH} \leq 460 \text{ MPa}$ ^{a)} a s obsahom prvkov v %: $C \leq 0,25$ $Si \leq 0,60$ $Mn \leq 1,70$ $Mo \leq 0,70$ ^{b)} $S \leq 0,045$ $P \leq 0,045$ $Cu \leq 0,40$ ^{b)} $Ni \leq 0,5$ ^{b)} $Cr \leq 0,3$ (0,4 na odliatky) ^{b)} $Nb \leq 0,05$ $V \leq 0,12$ ^{b)} $Ti \leq 0,05$
	1.1	Ocele so zaručenou minimálnou medzou klzu $R_{eH} \leq 275 \text{ MPa}$
	1.2	Ocele so zaručenou minimálnou medzou klzu $275 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 360 \text{ MPa}$
	1.3	Normalizované jemnozrnné ocele so zaručenou minimálnou medzou klzu $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	1.4	Ocele so zlepšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii, ktorých analýza môže prekročiť požiadavky na základné prvky, ako sú uvedené v 1
2		Termomechanicky spracované jemnozrnné ocele a ocele na odliatky so zaručenou minimálnou medzou klzu $R_{eH} > 360 \text{ MPa}$
	2.1	Termomechanicky spracované jemnozrnné ocele a ocele na odliatky so zaručenou minimálnou medzou klzu $360 \text{ MPa} < R_{eH} \leq 460 \text{ MPa}$
	2.2	Termomechanicky spracované jemnozrnné ocele a ocele na odliatky so zaručenou minimálnou medzou klzu $R_{eH} > 460 \text{ N/mm}^2$
3		Kalené a popustené (zošľachtené) ocele a precipitačne vytvrdené ocele mimo nehrdzavejúcich ocelí so zaručenou minimálnou medzou klzu $R_{eH} > 360 \text{ MPa}$
	3.1	Kalené a popustené ocele so zaručenou minimálnou medzou klzu $60 \text{ N/mm} < R_{eH} \leq 690 \text{ MPa}$
	3.2	Kalené a popustené ocele so zaručenou minimálnou medzou klzu $R_{eH} > 690 \text{ MPa}$
	3.3	Precipitačne vytvrdené ocele mimo nehrdzavejúcich ocelí

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Skupina	Pod-skupina	Druh ocele
4		Legované ocele Cr-Mo-(Ni) s $Mo \leq 0,7 \%$ and $V \leq 0,1 \%$
	4.1	Ocele s $Cr \leq 0,3 \%$ a $Ni \leq 0,7 \%$
	4.2	Ocele s $Cr \leq 0,7 \%$ a $Ni \leq 1,5 \%$
5		Cr-Mo ocele bez vanádu s $C \leq 0,35 \%$ ^{c)}
	5.1	Ocele s $0,75 \% \leq Cr \leq 1,5 \%$ a $Mo \leq 0,7 \%$
	5.2	Ocele s $1,5 \% < Cr \leq 3,5 \%$ a $0,7 < Mo \leq 1,2 \%$
	5.3	Ocele s $3,5 \% < Cr \leq 7,0 \%$ a $0,4 < Mo \leq 0,7 \%$
	5.4	Ocele s $7,0 \% < Cr \leq 10 \%$ a $0,7 < Mo \leq 1,2 \%$
6		Cr-Mo-(Ni) ocele so zvýšeným obsahom vanádu
	6.1	Ocele s $0,3 \% < Cr \leq 0,75 \%$, $Mo \leq 0,7 \%$ a $V \leq 0,35 \%$
	6.2	Ocele s $0,75 \% < Cr \leq 3,5 \%$, $0,7 \% < Mo \leq 1,2 \%$ a $V \leq 0,35 \%$
	6.3	Ocele s $3,5 \% < Cr \leq 7,0 \%$, $Mo \leq 0,7 \%$ a $0,45 \% < V \leq 0,55 \%$
	6.4	Ocele s $7,0 \% < Cr \leq 12,5 \%$, $0,7 \% < Mo \leq 1,2 \%$ a $V \leq 0,35 \%$
7		Feritické, martenzitické a precipitačne vytvrdené nehrdzavejúce ocele s $C \leq 0,35 \%$ a $10,5 \% \leq Cr \leq 30 \%$
	7.1	Feritické nehrdzavejúce ocele
	7.2	Martenzitické nehrdzavejúce ocele
	7.3	Precipitačne vytvrdené nehrdzavejúce ocele
8		Austenitické ocele
	8.1	Austenitické nehrdzavejúce ocele s $Cr \leq 19 \%$
	8.2	Austenitické nehrdzavejúce ocele s $Cr > 19 \%$
	8.3	Mangánové austenitické nehrdzavejúce ocele s $4 \% < Mn \leq 12 \%$
9		Niklom legované ocele s $Ni \leq 10 \%$
	9.1	Niklom legované ocele s $Ni \leq 3 \%$
	9.2	Niklom legované ocele s $3,0 \% < Ni \leq 8 \%$
	9.3	Niklom legované ocele s $8,0 \% < Ni \leq 10 \%$
10		Austeniticko-feritické nehrdzavejúce ocele (duplexné)
	10.1	Austeniticko-feritické nehrdzavejúce ocele s $Cr \leq 24 \%$
	10.2	Austeniticko-feritické nehrdzavejúce ocele s $Cr > 24 \%$
^{a)} Podľa požiadaviek normy oceleového výrobku môže sa R_{eH} nahradiť $R_{p0,2}$ alebo $R_{t0,5}$. ^{b)} Akceptuje sa vyššia hodnota za predpokladu, že $Cr + Mo + Ni + Cu + V \leq 0,75 \%$. ^{c)} „Bez vanádu“ znamená, že nebol úmyselne do materiálu pridaný.		

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Príklady používaných materiálov

PLECHY pre tlakové nádoby

Uhlíkové ocele	P235GH, P265GH, P295GH, P355GH	EN 10028-2
Jemnozrnné ocele (pre záporne teploty)	P275NH, P275NL1, P275NL2, P355NH, P355NL1, P355NL2	EN 10028-3
Nízkolegované ocele (do 380 – 450 °C)	13CrMo45, 10CrMo910	EN 10028-2
Austenitické ocele		EN 10028-8

RÚRKY pre tlakové nádoby

Uhlíkové ocele	P235GH, P265GH, P355GH	EN 10216-2
Jemnozrné ocele (pre záporne teploty)	P275NL1, P275NL2, P355NH, P355NL1, P355NL2	EN 10216-3 EN 10216-4
Nízkolegované ocele (do 380 – 450 °C)	13CrMo45, 10CrMo910	EN 10216-2
Austenitické ocele		EN 10216-5

TYČE

EN 10273

VÝKOVKY

Uhlíkové ocele	P245GH, P250GH, P355GH	EN 10222-2
Jemnozrné ocele	P275NH, P355NH, P285QH, P355QH	EN 10222-4
Nízkolegované ocele (do 380 – 450 °C)	13CrMo45, 10CrMo910	EN 10222-2
Austenitické ocele		EN 10222-5

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.10.3 Všeobecné požiadavky pre navrhovanie tlakových zariadení

Základné požiadavky na konštrukciu tlakových nádob môžeme zhrnúť do týchto bodov:

- tvar tlakovej nádoby navrhnuť čo najjednoduchší, podľa možnosti rotačne symetrický, umožňujúci hospodárnu výrobnú technológiu a spoľahlivosť,
- rovné steny ako plášte sa majú používať čo najmenej,
- konštrukcia nádoby musí byť technologicky zvládnuteľná,
- po dobu stanovenú v technickej dokumentácii musí navrhnutá konštrukcia zabezpečovať možnosť kontroly, prehliadky, prefukovania a opravy v priebehu výroby aj za prevádzky,
- musí byť zabezpečená možnosť odvzdušnenia, vyprázdnenia a čistenia nádob,
- vnútorné vybavenie nádob (rúrkové hady, prepážky a pod.) má byť podľa možnosti odnímateľné.

Detaily tlakových zariadení sú spravidla namáhané zložitým spôsobom. Mnohé detaily sa zhotovujú zvaraním. Správne umiestnenie spoja a vhodný tvar zvarových plôch majú významný vplyv na únosnosť a životnosť detailu, prípadne aj celého tlakového zariadenia. Typickým príkladom je pripojenie polguľového dna na valcový plášť rovnakej hrúbky. Obvodové napätie je vo valcovej škrupine dva krát vyššie ako v polguľovej časti, preto v mieste spojenia dvoch geometrických útvarov vznikne koncentrácia napätia. Podobné lokálne zvýšenie napätia spôsobí zmena hrúbky steny.

Požiadavky na zvarové spoje tlakových nádob:

- zvarové spoje treba umiestniť mimo vysoko namáhané oblasti, treba zvoliť vhodné tvary dien, plynulý prechod hrúbky steny a podobne,
- prednostne používať tupé zvary s plným prevarením po hrúbke steny,
- použitie jednostranných kútových zvarov sa povoľuje pre privarenie hrdiel a prírub k tlakovým nádobám s vnútorným priemerom do 800 mm,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

výpočtovým pretlakom najviac 1,6 MPa, výpočtovou teplotou do 200 °C a menovitou hrúbkou plášťa alebo dna 8 mm,

- konštrukcia a umiestnenie zvarových spojov musí umožňovať realizáciu zvarových spojov pri zachovaní všetkých stanovených požiadaviek, potrebné rozmiestnenie ohrievacích zariadení na prípadný predohrev a tepelné spracovanie, vykonanie kontroly zvarov podľa STN EN a odstránenie neprípustných chýb.

2.10.4 Zaťaženie pôsobiace na konštrukciu tlakovej nádoby

Na konštrukciu tlakovej nádoby môžu pôsobiť zaťaženia statického charakteru, zaťaženia dynamické alebo rôzne kombinácie týchto zaťažení. Môžeme ich rozdeliť takto:

I. Hlavné zaťaženie:

1. zaťaženie stále, ktoré predstavuje najmä vlastná tiaž jednotlivých častí konštrukcie,
2. zaťaženie procesné,
 - vnútorný pretlak,
 - vonkajší pretlak,
 - hydrostatický tlak látok,
 - dynamické sily vlastnej konštrukcie.
3. zaťaženie snehom.

II. Vedľajšie zaťaženie

1. zaťaženie vetrom,
2. vnútorné a vonkajšie tepelné účinky,
3. vonkajšie sily a momenty, montážne predpätie a pod.,
4. pokles podpier, príp. základov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

III. Celkové zaťaženie

Ide o najnepriaznivejšie zoskupenie predchádzajúcich zaťažení vzhľadom na bezpečnosť konštrukcie. Toto zaťaženie sa zisťuje pre nasledujúce stavy:

1. výrobu konštrukcie,
2. skúšanie,
3. montáž,
4. prevádzku.

IV. Časový priebeh zaťaženia

1. statické,
2. dynamické - pri cyklických zaťaženiach treba zadať časový priebeh a počet cyklov za dobu životnosti zariadenia.

Z uvedeného prehľadu zaťažení je zrejmé, že konštrukcia musí byť pevnostne kontrolovaná nielen pre prevádzkové podmienky, ale aj pre výrobu, skúšanie a montáž. Pri vysokých aparátoch a destilačných zariadeniach spôsob montáže často ovplyvňuje hrúbky stien jednotlivých častí konštrukcie.

Pred začatím výpočtu treba stanoviť hľadiská na posúdenie únosnosti konštrukcie, ktoré sú typu:

1. pevnostné - statické zaťaženie, nízkocyklové namáhanie, únava materiálu, konštrukcia musí preukázať predpísanú bezpečnosť k pevnostným charakteristikám materiálu;
2. stabilné
 - a) stabilita lokálna,
 - b) stabilita celková,
 - c) stabilita proti prevráteniu,
 - d) iné druhy stability (skrútenie, vybočenie);
3. tuhostné - deformácia konštrukcie pri najnepriaznivejšom zaťažení je v predpísaných medziach.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Únosnosť konštrukčných prvkov tlakových nádob musíme posudzovať z hľadiska pevnostného, stabilitného aj tuhostného. Najmä pri stavbe veľkokapacitných zariadení veľkých celkových rozmerov (priemeru, výšky, dĺžky) sú uvedené kritéria veľmi dôležité. Pri posúdení pevnosti je nutné analyzovať jednak napätosť, ale všeobecne aj zaťaženie, tvar nádoby, pracovný a zaťažovací cyklus, vplyv plasticity, únavu materiálu a rad ďalších kritérií. Napätosť nádob navrhnutých podľa noriem alebo skrátených výpočtových metód sa posudzuje spravidla podľa dovoleného namáhania. Pri výpočte dovoleného namáhania treba dôsledne rozlišovať druh namáhania (statické, dynamické), výšku prevádzkovej teploty a vlastností použitého materiálu. Hlavným kritériom pri posudzovaní pevnosti nádob sú pevnostné hypotézy, ktoré ohraničujú oblasť výskytu porúch pri rôznych druhoch kombinovaného namáhania.

2.10.5 Skúšanie tlakových nádob

Po úplnom dokončení a zmontovaní tlakovej nádoby sa vykonáva tzv. stavebná skúška, ktorou sa zisťuje, či použitý materiál a celkové vyhotovenie nádoby zodpovedá výrobnej dokumentácii a ustanoveniam príslušných noriem. Kontrolujú sa:

- hlavné rozmery nádoby, umiestnenie hrdiel, prielezov, pätiiek, podstavcov a zmontovanie nádoby podľa dokumentácie,
- značky materiálu, čísla tavieb, vývalkov, výkovkov a ich vyznačenie na jednotlivých častiach tlakovej nádoby,
- záznamy o tepelnom spracovaní,
- zvarové spoje (vonkajšou a vnútornou prehliadkou), nedeštruktívne skúšky a ich vyhodnotenie, výsledky mechanických a technologických skúšok,
- značky zvaračov,
- údaje na štítku nádoby a údaje vyrazené na tlakových častiach.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Prvá tlaková skúška sa koná po úspešnej stavebnej skúške a preukazuje pevnosť a tesnosť tlakovej nádoby a jej častí. Na skúšku musí byť nádoba pripravená takto:

- nádoba sa prehliadne s cieľom zistenia neprípustných chýb,
- musí byť vyčistená, ak je predpísaný vnútorný náter, môže byť základný náter urobený pred skúškou,
- polohu nádoby pri skúške treba voliť tak, aby bolo možné dokonalé odvzdušnenie, tiaž skúšobnej kvapaliny nesmie spôsobiť neuvažované prídavné namáhanie nádoby,
- pri tlakovej skúške musia byť na nádobu pripojené dva tlakomery, z ktorých jeden musí byť kontrolný,
- tlakové skúšky sa musia robiť so spojovacími súčastami a tesneniami predpísanými technickou dokumentáciou.

Tlaková skúška sa robí vodou alebo inou predpísanou skúšobnou kvapalinou. Teplota tejto kvapaliny nesmie byť nižšia ako 5 °C a vyššia ako 50 °C. Tesnosť zvarových spojov privarených výstužných prstencov hrdiel sa kontroluje pneumatickou skúškou vzduchom a pretlakom do 0,6 MPa.

2.10.6 Typy poškodenia tlakových nádob

Tlakové nádoby môžu byť vyradené z prevádzky v dôsledku nasledujúcich skutočností:

- nadmernej elastickej deformácie,
- nadmernej plastickej deformácie,
- elastickej nestability - náhla strata tvaru,
- plastickej nestability - postupná strata tvaru,
- krehkého alebo únavového lomu,
- lomu za zvýšených teplôt vplyvom tečenia,
- lomov spôsobených koróziou pod napätím.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Týmto prípadom zodpovedajú jednotlivé medzné stavy konštrukcie a to:

- deformácie - deformácia prípustná sa mení na neprípustnú,
- pružnosti - deformácia pružná sa mení na pružne plastickú,
- deformačnej stability - stabilná deformácia sa mení na nestabilnú,
- únosnosti - neprípustné zväčšenie pohyblivosti sústavy v dôsledku zmien vnútorných väzieb,
- porušenia - vzniká nespojitosť (trhlina) v telese nádoby,
- trhlín - prípustné porušenie spojitosti sa mení na neprípustné,
- pevnosti - v dôsledku lomu sa jedno teleso mení na viac častí.

Porušovanie konštrukcie je veľmi zložitý proces. Z pohľadu na makroobjem materiálu môžeme porušenie deliť na etapy:

- nukleácie porušenia - počiatok vzniku trhliny,
- stabilného šírenia porušenia - miestne porušenie súdržnosti sa rozširuje, ak je zvonku dodávaná energia, pričom rýchlosť šírenia závisí od úrovne a rýchlosti zmeny vonkajšieho zaťaženia,
- nestabilného šírenia porušenia - k rozširovaniu lokálneho porušenia stačí energia akumulovaná v telese, trhlina sa šíri rýchlo, nekontrolovateľne.

Väčšina nestabilných lomov vzniká:

- z defektov, ktoré sú v konštrukcii ako dôsledok výrobného postupu (zvárania, tepelného spracovania a pod.),
- z trhlín, ktoré vznikli počas prevádzky (únavové trhliny, korózne trhliny a pod.),
- z porušenia lokálne skrehnutých oblastí.

Stabilné porušenie môže veľmi často prejsť na nestabilné.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.10.7 Kategorizácia napätí tlakových nádob

Primárne napätia – posudzuje sa statická pevnosť tlakových nádob. Sú to predovšetkým základné membránové napätia σ_m a základné ohybové napätia σ_b . Porovnávacie napätie môže dosiahnuť iba hodnotu dovoleného namáhania, ktoré určíme zo vzťahu:

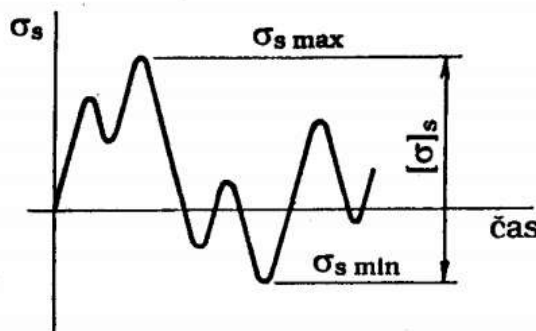
$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_e}{n_e} \mid \frac{R_m}{n_m} \right\} \quad (2.115)$$

pričom súčiniteľ bezpečnosti k medzi klzu má zvyčajne hodnotu $n_e = 1,5$ a súčiniteľ bezpečnosti k medzi pevnosti $n_m = 2,5$.

Do kategórie primárnych napätí patria tiež miestne membránové napätia σ_{ml} od vonkajších silových účinkov. Tieto vznikajú v oblasti veľkej diskontinuity tvaru. V súčte s hodnotou σ_b môžu dosiahnuť $1,3 \cdot [\sigma]$ až $1,5 \cdot [\sigma]$.

Sekundárne napätia (Obr. 2.45) – posudzuje sa rozkmit z absolútnych extrémov napätí a na základe toho schopnosť konštrukcie prispôbiť sa preťaženiu. Sú schopné vyvolať plastické deformácie v oblasti veľkej diskontinuity tvaru.

$$[\sigma]_s = \sigma_{s \max} - \sigma_{s \min} \leq 3[\sigma] \quad (2.116)$$



Obr. 2.45 Sekundárne napätia [59]

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

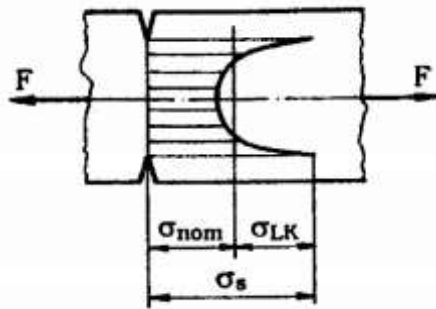
Špičkové napätia (Obr. 2.46) – napäťový stav v miestach, kde môže nastať koncentrácia napätí. Sú to rôzne technologické alebo výrobné vruby v konštrukcii, ktoré nazývame malou diskontinuitou tvaru.

Dosah pôsobenia špičkových napätí je veľmi malý, preto miestne splastizovanie spôsobené týmito napätiami nemá prakticky vplyv na pevnosť konštrukcie.

$$\sigma_{LK} = (\sigma_H - 1)\sigma_{nom} \quad (2.117)$$

kde:

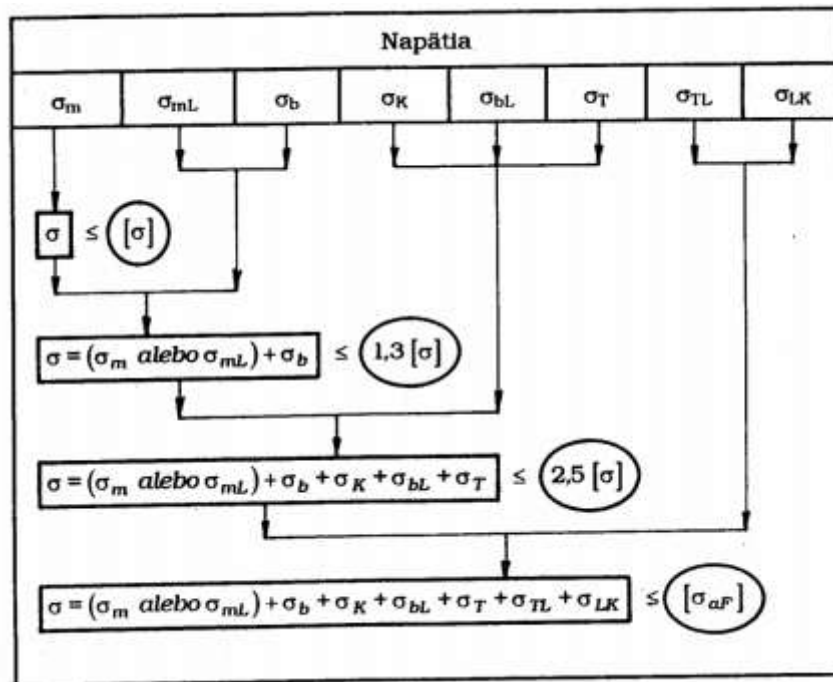
σ_H – súčiniteľ koncentrácie napätia.



Obr.2.46 Špičkové napätia [59]

Podľa STN EN 13445 je platná nasledujúca kategorizácia napätí zobrazená na Obr. 2.47.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



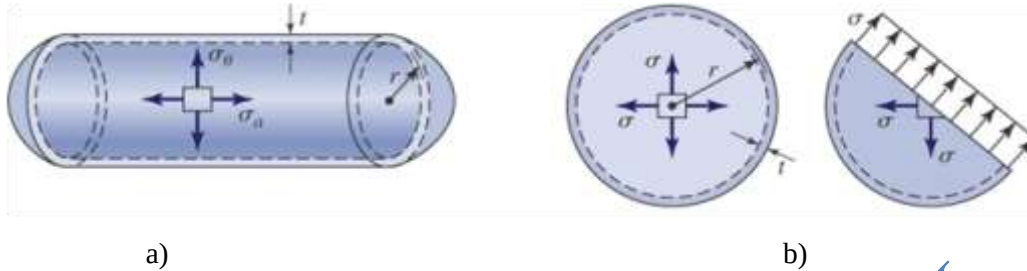
Obr. 2.47 Prehľad napätí pre normálne prevádzkové podmienky

kde:

- σ_m - membránové napätie od mechanického zaťaženia,
- σ_{mL} - miestne membránové napätie od mechanického zaťaženia,
- σ_b - ohybové napätie od mechanického zaťaženia,
- σ_K - dilatčné napätie (membránové, ohybové, krútiace),
- σ_{bL} - miestne ohybové napätie,
- σ_{TL} - miestne teplotné napätie,
- σ_{LK} - špičkové napätia v mieste koncentrácie.

Membránové napätia – pre tenkostenné nádoby (Obr. 2.48), kde platí, že pomer $r/t > 10$, za predpokladu, že sú konštantné napätia po hrúbke steny sa delia na membránové napätia v axiálnom (pozdĺžnom) a tangenciálnom (obvodovom) smere.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.48 Membránové napätia [59] a) valcová škrupina b) guľová škrupina

Dovolené namáhanie sa odvodzuje zo základných fyzikálno-mechanických vlastností materiálu, pričom sa zohľadňuje vplyv teploty na tieto vlastnosti.

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{0,2}} \mid \frac{R_m}{n_m} \right\} \quad (2.118)$$

Väčšina noriem uvažuje súčiniteľ bezpečnosti $n_{0,2} = 1,5$ a $n_m = (2,4 - 3,0)$.

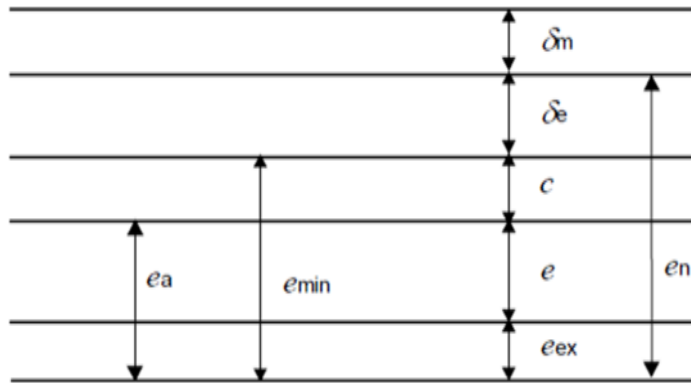
2.10.8 Tlakové nádoby – pevnostný návrh podľa STN EN 13445

Pre použitie STN EN 13445-3 musia platiť nasledujúce požiadavky:

- materiály a zvary nie sú vystavené miestnej korózii pôsobením látok, ktoré obsahuje nádoba,
- navrhovanie je mimo oblasti tečenia (krípu). Ak nie je ustanovené inak v príslušných kapitolách, možno použiť požiadavky navrhovania až do teploty 370 °C pre feritické ocele a 425 °C pre austenitické ocele,

* vzájomná súvislosť definícií hrúbok je definovaná na Obr. 2.49.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.49 Definícia hrúbky tlakovej nádoby [59]

kde:

e - požadovaná hrúbka,

e_n - nominálna hrúbka,

$e_{\min}$ - minimálna možná hrúbka ($e_{\min} = e_n - \delta_e$),

e_a - výpočtová hrúbka ($e_a = e_{\min} - c$),

c - prídavok na koróziu alebo eróziu,

δ_e - absolútna hodnota novej zápornej tolerancie na nominálnu hrúbku,

δ_m - prídavok na možné zoslabenie vo výrobnom procese,

e_{ex} - extra hrúbka na kompenzáciu nominálnej hrúbky.

Súčiniteľ zvarového spoja

Na výpočet požadovanej hrúbky určitých zvarových komponentov (napríklad valcovitých, kužeľovitých a guľovitých škrupín) navrhované vzorce obsahujú z , ktoré je súčiniteľom určujúceho (S) zvarového spoja komponentu.

Príklady určujúcich (hlavných) zvarových spojov sú:

- pozdĺžne alebo špirálové zvary vo valcovitom plášti,
- pozdĺžne zvary v kužeľovitom plášti,
- akýkoľvek hlavný zvar v guľovitom plášti alebo dne,
- hlavné zvary v klenutom dne zhotovenom z dvoch alebo viacerých plechov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Nasledujúce zvarové spoje nie sú smerodajné zvarové spoje:

- obvodový zvar medzi i-tým alebo kužeľovitým plášťom a valcom, kužeľom, prírubou alebo dnom okrem polguľovitého dna,
- zvary spájajúce hrdlá k plášťom,
- zvary vystavené výlučne tlakovému napätiu.

Pre bežné prípady prevádzkového zaťaženia hodnota z je daná v Tab. 2.13. Týka sa skúšobnej skupiny určujúcich zvarových spojov. Skúšobné skupiny sú špecifikované v norme EN 13445-5: 2002, kapitola 6.

Tab. 2.13 Súčiniteľ zvarového spoja a príslušná skúšobná skupina

Súčiniteľ zvarového spoja „ z “	1	0,85	0,7
Skúšobná skupina	1,2	3	4

Poz: V základnom materiáli mimo určujúcich spojov $z = 1$. Pre výnimočné a skúšobné podmienky sa musí použiť hodnota 1 bez ohľadu na skúšobnú skupinu.

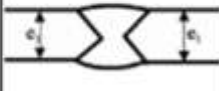
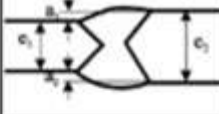
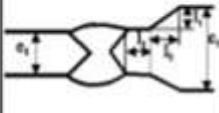
Návrhové požiadavky na zvarové spoje

Výrobca musí zvoliť najvhodnejšie spoje na splnenie požiadaviek normy. Predovšetkým musí zvážiť nasledujúce parametre:

- pevnostnú triedu a vlastnosti použitých materiálov,
- pracovné podmienky: napríklad zaťažovanie prevažne necyklickej povahy alebo cyklickej povahy,
- nebezpečnú alebo korozívnu tekutinu,
- príslušné skúšobné skupiny,
- výrobné prostriedky.

Príloha A - Obr. 2.50 udáva požiadavky na zvary a odporúčania pre zvary zaťažované tlakom.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Odv.	Typ spoja	Konštrukčné požiadavky	Použiteľná skúšobná skupina zvaru	Náchylnosť na lamelárne praskanie ²⁾	Korózia ³⁾	prEN 1708-1
M 1			1, 2, 3, 4	A	N	1.1.4
M 2		$e_2 - e_1 \leq 0,30e_1 \leq 6 \text{ mm}$ $a_2 \leq 3 \text{ mm}$	1, 2, 3, 4	A	N	1.1.4
M 3		$l_3 \geq 2e_1$ $l_1 / l_2 \leq 1/4$	1, 2, 3, 4	A	N	1.1.6

Obr. 2.50 Zvary prenášajúce namáhanie od tlaku [59] – príklad Príloha A

Komponenty valcovitých alebo kužeľovitých plášťov, guľovitých komponentov a klenuté alebo rovné dna sa musia spájať zváraním na tupo použitím zvaracieho postupu, ktorý zabezpečí plný prievar. Osi stien komponentov, ktoré tvoria pozdĺžne spoje valcovitých alebo kužeľovitých plášťov, ako aj spoje na guľovitých plášťoch, musia byť nastavené do súosovosti v blízkosti zvarového spoja v medziach výrobných tolerancií stanovených v EN 13445-4: 2002. Vplyv namáhania ohybom sa musí posúdiť pri navrhovaní.

Osi stien komponentov rovnakej hrúbky musia byť nastavené do súosovosti v medziach tolerancií uvedených v EN 13445-4: 2002.

Osi stien komponentov rozdielnych hrúbok smú byť nenastavené do súosovosti, ale odklon nesmie prevyšovať súosovosť vnútorných alebo vonkajších povrchov v medziach tolerancií stanovených v EN 13445-4: 2002.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Maximálne dovolené hodnoty nominálneho návrhového napätia pre tlakové časti

Norma špecifikuje maximálne dovolené hodnoty nominálneho návrhového napätia pre tlakové časti iné ako svorníky a fyzikálne vlastnosti ocelí - Obr. 2.51.

Označenie ocele	Případy normálneho prevádzkového zaťaženia ⁴³⁾	Skúšobné a výnimočné prípady zaťaženia ⁴⁴⁾
Ocele okrem austenitických podľa 6.2 $A < 30\%$ ⁴⁵⁾	$f_d = \min \left(\frac{R_{p0.2/T}}{1,5}, \frac{R_{m/20}}{2,4} \right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p0.2/T_{test}}}{1,05} \right)$
Ocele okrem austenitických; ocle podľa 6.3; Alternatívny spôsob $A < 30\%$ ⁴⁶⁾	$f_d = \min \left(\frac{R_{p0.2/T}}{1,5}, \frac{R_{m/20}}{1,875} \right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p0.2/T_{test}}}{1,05} \right)$
Austenitické ocele podľa 6.4 $30\% \leq A < 35\%$ ⁴⁷⁾	$f_d = \left(\frac{R_{p0.2/T}}{1,5} \right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p0.2/T_{test}}}{1,05} \right)$
Austenitické ocele podľa 6.5 $A \geq 35\%$ ⁴⁸⁾	$f_d = \max \left(\left(\frac{R_{p0.2/T}}{1,5} \right), \min \left(\frac{R_{p0.2/T}}{1,2}, \frac{R_{m/T}}{3} \right) \right)$	$f_{test} = \max \left(\left(\frac{R_{p0.2/T_{test}}}{1,05} \right), \frac{R_{m/T_{test}}}{2} \right)$
Ocele na odliatky podľa 6.6	$f_d = \min \left(\frac{R_{p0.2/T}}{1,9}, \frac{R_{m/20}}{3} \right)$	$f_{test} = \min \left(\frac{R_{p0.2/T_{test}}}{1,33} \right)$

⁴³⁾ Po skúšobnej kategórii 4 sa nominálne návrhové napätie musí vypočítať hodnotou 0,9.
⁴⁴⁾ Medzu klzu $R_{p0.2}$ možno použiť namiesto $R_{p0.2}$, ak táto druhá hodnota nie je k dispozícii z materiálovej normy.
⁴⁵⁾ Pozri 5.3.2 a 6.1.2.
⁴⁶⁾ Definíciu ťažnosti pozri v EN 13445-2: 2009, kapitola 4.

Obr. 2.51 Maximálne povolené hodnoty nominálneho návrhového napätia pre tlakové časti s výnimkou svorníkov [59]

Nominálne návrhové napätie pre bežné prípady prevádzkového zaťaženia f nesmú prevýšiť f_d , menšiu z dvoch nasledujúcich hodnôt:

- minimálna medza klzu alebo dohovorená medza klzu 0,2 % pri výpočtovej teplote, ako je udané v technickej špecifikácii pre materiál, delené bezpečnostným súčiniteľom 1,5,
- minimálna medza pevnosti v ťahu pri 20 °C, ako je udané v technickej špecifikácii pre materiál, delené súčiniteľom bezpečnosti 2,4.

Nominálne návrhové napätie pre prípady skúšobného zaťaženia f nesmie prevýšiť f_{test} , minimálnu dohovorenú medzu klzu pri 1 % pri skúšobnej teplote, ako je udané v technickej špecifikácii pre materiál delené súčiniteľom bezpečnosti 1,05.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Výpočet požadovanej hrúbky – zaťaženie vnútorným tlakom

Norma stanovuje požiadavky na navrhovanie proti vnútornému tlaku symetrických plášťov valcov, gúľ, častí guľových škrupín, klenutých dien, kužeľových škrupín a prieniky kužeľa valcom.

Pre valcové plášte sa požadovaná hrúbka vypočíta podľa vzťahov:

$$e = \frac{P \cdot D_i}{2f \cdot z - P} \quad \text{alebo} \quad e = \frac{P \cdot D_e}{2f \cdot z + P} \quad (2.119)$$

Pre guľové plášte sa požadovaná hrúbka vypočíta podľa vzťahov:

$$e = \frac{P \cdot D_i}{4f \cdot z - P} \quad \text{alebo} \quad e = \frac{P \cdot D_e}{4f \cdot z + P} \quad (2.120)$$

kde:

z – súčiniteľ zvarového spoja,

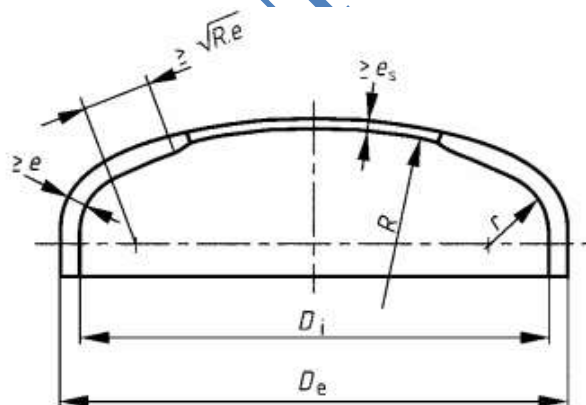
D_i – vnútorný priemer tlakovej nádoby,

D_e – vonkajší priemer tlakovej nádoby,

f – výpočtové napätie (zaťaženie),

P – výpočtový tlak.

Pre torisférické dno norma stanovuje, že požadovaná hrúbka steny musí byť najväčšia z vypočítaných hrúbok e_s , e_y a e_b (Obr. 2.52).



$$e_s = \frac{P \cdot R}{2f \cdot z - 0,5P}$$

$$e_y = \frac{\beta \cdot P (0,75R + 0,2D_i)}{f}$$

$$e_b = (0,75R + 0,2D_i) \left[\frac{P}{111f_b} \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)}$$

Obr. 2.52 Návrh torisférického dna [59]

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Norma stanovuje minimálnu hrúbku aj pre kužeľové plášte. Zároveň udáva postup, ktorým možno vypočítať dovolený tlak pre valcové tlakové nádoby, pri ktorých sa po výrobe zistilo, že ich kruhovitosť prevyšuje toleranciu 0,5 %, ako aj stanovuje požadovaný tvar a rozmery vyhrievacích a ochladzovacích kanálov tlakových nádob.

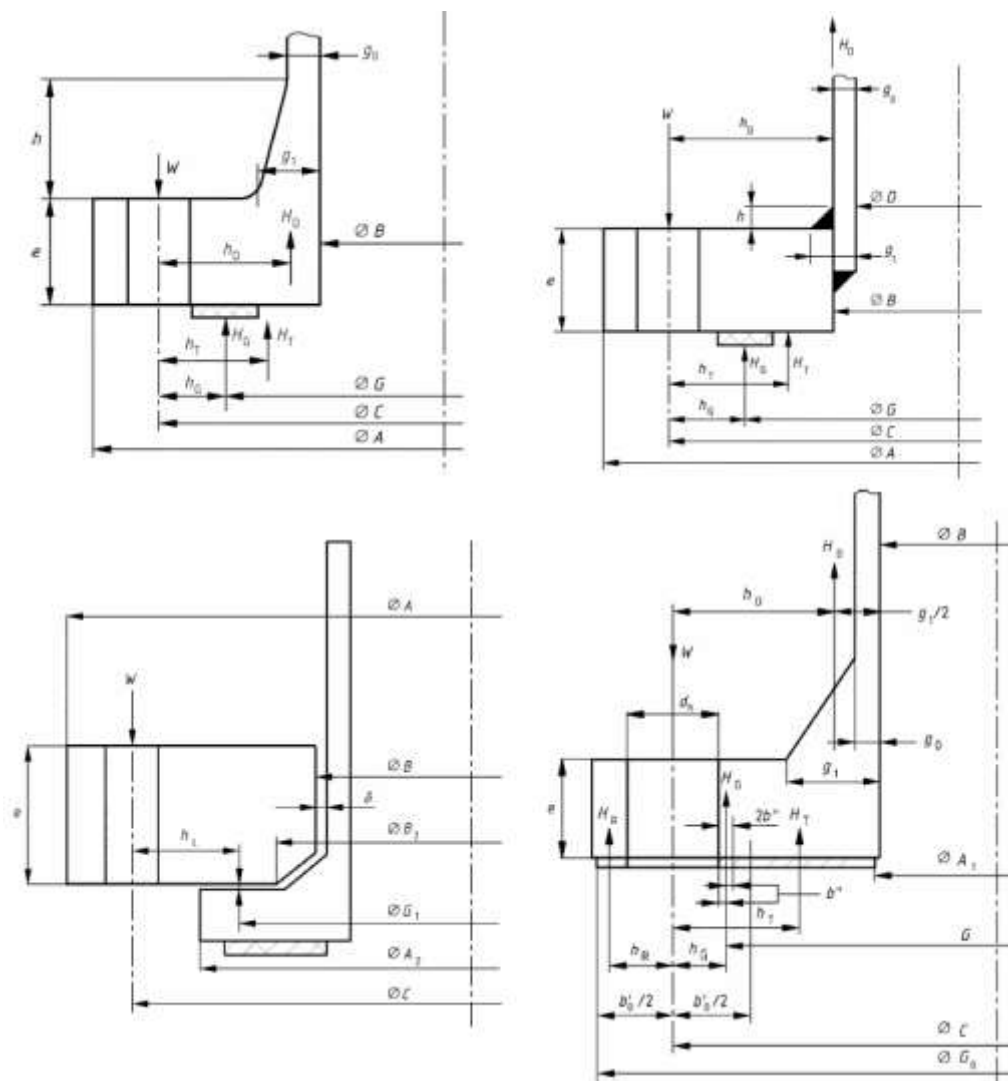
Návrh prírubových spojov tlakových nádob

Príruby Obr. 2.53 s celoplošným tesnením a s úzkym tesnením vystavené vnútornému a vonkajšiemu tlaku sú rovnako zahrnuté, ako aj vnútorné príruby a príruby s tesniacim zvarom. Požiadavky stanovené normou spočívajú na osvedčených Taylorových - Forgeových predpisoch. Príloha G normy poskytuje modernú alternatívu navrhovania úzkeho tesnenia.

Menovité návrhové napätia skrutky na stanovenie minimálneho prierezu skrutky musia byť:

- pre uhlíkové a ostatné neaustenitické ocele, menej ako $R_{p0,2}/3$ namerané pri návrhovej teplote a $R_m/4$ namerané pri izbovej teplote,
- pre austenitickú nehrdzavejúcu ocel', $R_m/4$ namerané pri návrhovej teplote.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.53 Ukážka postupu pri konštrukčnom riešení príruby podľa normy [59]

Montážny stav a prevádzkový stav predstavujú obidva bežné stavy navrhovania na stanovenie menovitých návrhových napätí. Tieto dovoľené napätia môžu byť vyššie 1,5-krát pre skúšobné alebo výnimočné podmienky.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tlakové nádoby - posúdenie únavovej životnosti

Tlakové nádoby vystavené dynamickým účinkom zaťaženia, STN EN 13445-3 umožňuje:

- zjednodušené posúdenie (odhad) únavovej životnosti – kolísanie tlaku,
- podrobné posúdenie únavovej životnosti – opakované zmeny napätia.

Posúdenie na únavu nie je nutné, ak pri zaťažovaní tlakom necyklickej povahy, t. j. keď počet plných tlakových cyklov alebo ekvivalentných plných tlakových cyklov je menší alebo sa rovná 500 ($n_{eq} \leq 500$).

Keď počet tlakových cyklov n_i pri tlaku ΔP_i je menší ako plný tlak P , počet ekvivalentných plných tlakových cyklov je daný vzťahom:

$$n_{eq} = \sum n_i \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{P_{max}} \right)^3 \quad (2.121)$$

Vo vyššie uvedenom vzťahu je P_{max} , maximálny prípustný tlak pre výpočtovú hrúbku.

Hodnota 500 ekvivalentných cyklov plného tlaku je len hrubým ukazovateľom. Možno predpokladať, že pre komponenty s nepravidelnosťami tvaru, silno sa meniacim rozložením miestnych napätí, vystavených dodatočným zaťaženiám netlakového charakteru, únavové porušenie sa môže objaviť pred dosiahnutím 500 cyklov.

Tlakové nádoby – navrhovanie proti porušeniu krehkým lomom

Požiadavky na materiály pre zabránenie krehkému porušeniu stanovuje norma STN EN 13 445-2 (Príloha B). Definujú sa tri alternatívne metódy na stanovenie kritérií na zabránenie krehkého porušenia pri nízkej teplote.

Kritériá sa zakladajú na požiadavkách na nárazovú prácu pri stanovených teplotách pre základný materiál, teplom ovplyvnenú oblasť (vrátane oblasti natavenia) a zvarové kovy.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Norma stanovuje tri metódy (Metóda 1, 2 a 3) a každá z týchto troch metód sa môže použiť samostatne. Treba len splniť požiadavku jednej z metód. Musia sa uvažovať všetky možné kombinácie teplôt T_M (minimálna teplota kovu) a T_S (korekcia teploty) a na stanovenie požadovanej teploty pre skúšku rázovej húževnatosti sa musí použiť najnižšia možná TR -hodnota (návrhová referenčná teplota).

Metóda 1

Technické požiadavky uvedené v Tab. 2.14 a Tab.2.15, sú odvodené z prevádzkovej skúsenosti a sú použiteľné pre všetky kovové materiály, ale obmedzené pre určité hrúbky, pre ktoré existujú skúsenosti.

Túto zjednodušenú metódu možno použiť pre C, CMn, jemnozrnné a 1,5÷5 % Ni ocele limitovanej hrúbky. Požadovaná nárazová práca je $KV = 27 \text{ J}$ pri referenčnej teplote TR pre základný materiál ZM, teplom ovplyvnenú oblasť TOO a zvarový kov spoja ZK. Limitné hrúbky sú:

- do 30 mm, $Re \leq 310 \text{ MPa}$ pre stav po zvarení (nežíhaný)
- do 60 mm, $Re \leq 460 \text{ MPa}$ pre stav relaxačne žíhaný

Tab. 2.14 Všeobecné požiadavky na predchádzanie krehkému porušeniu s referenčnou hrúbkou $\leq 5 \text{ mm}$ [59]

Materiál ^{a)}	Minimálna teplota kovu °C	Poznámka ^{b)}
Niklom legované ocele s menej ako 3,5 % Ni	– 60	AW PWHT
Niklom legované ocele s $\geq 3,5 \text{ % Ni}$; $< 5 \text{ % Ni}$	– 100	AW PWHT
Niklom legované ocele s $\geq 5 \text{ % Ni}$; $< 9 \text{ % Ni}$	– 120	AW PWHT
Niklom legované ocele s $\geq 9 \text{ % Ni}$	– 200	AW PWHT
Feritické ocele	Podľa skúšobnej teploty pre $KV = 27 \text{ J}$ v norme základného materiálu	nezvárané
Nehrdzavejúce austeniticko-feritické ocele	Len pre nezváraný stav a $T_M \geq -50 \text{ °C}$	nezvárané
^{a)} Obsahy niklov sú nominálne ^{b)} AW : v stave po zvarení, PWHT : tepelne spracované po zvarení		

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tab. 2.15 Všeobecné požiadavky na predchádzanie krehkému porušeniu s referenčnou hrúbkou $> 5 \text{ mm}$ [59]

Materiál	Nárazová práca KV	Teplota pri skúške rázom v ohybe T_{KV}	Referenčná hrúbka e_B	Poznámky
Feritická oceľ, 1,5 % až 5 % vrátane niklom legované ocele	27 J	T_R	Pre zvarané $\leq 30 \text{ mm}$	$R_p \leq 310 \text{ N/mm}^2$
	27 J	$T_R^{a)}$	Pre tepelne spracované po zvarení $\leq 60 \text{ mm}$	$310 \text{ N/mm}^2 < R_p \leq 460 \text{ N/mm}^2$
9 % niklom legované ocele	40 J	$-196 \text{ }^\circ\text{C}$	–	–
Zvarové kovy ^{d)} pre austenitické ocele a odliatky zhotovené z austenitických ocelí ^{b)}	40 J ^{c)}	$-196 \text{ }^\circ\text{C}$ ^{d)}	akákoľvek	–
Nehrdzavajúce austeniticko-feritické ocele	40 J	T_M	$\leq 30 \text{ mm}$ ^{e)}	Limitované na $T_M \geq -30 \text{ }^\circ\text{C}$

^{a)} Výrobné skúšobné vzorky sa musia skúšať pri $T_{KV} = T_R$. Hodnoty nárazovej práce 27 J sa požadujú vo zvaroch, TOO a základnom materiáli. Pre oblasť nedeštruktívneho skúšania pozri skúšobnú skupinu 1, EN 13445-5.

^{b)} Pre najnižšie minimálne teploty kovu T_M rozpúšťacieho žihania austenitických ocelí pozri tabuľku B.2-2.

^{c)} Ak sa v špecifikácii materiálu požadujú vyššie hodnoty nárazovej práce, tak tieto požiadavky sa musia splniť na zvarový kov pri $T_{KV} = -196 \text{ }^\circ\text{C}$, ak $T_R \leq -196 \text{ }^\circ\text{C}$.

^{d)} Pre $T_R \leq -196 \text{ }^\circ\text{C}$ sa musí skúška vykonať pri $T_{KV} = -196 \text{ }^\circ\text{C}$. Podmienky pre základný materiál musia zodpovedať príslušnej materiálovej norme.

^{e)} Skutočná hrúbka.

Metóda 2

Technické požiadavky odvodené na základe princípu lomovej mechaniky a na základe skúsenosti, ale použiteľné len pre C, CMn a nízkolegované feritické ocele so zaručenou minimálnou medzou klzu $R_e \leq 460 \text{ MPa}$. Možno ju použiť pre väčší rozsah hrúbok v porovnaní s metódou 1 a je menej obmedzujúca ako metóda 1 pre tenšie materiály.

Požadovaná nárazová práca je uverená v Tab. 2.16.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tab. 2.16 Požadovaná nárazová práca pri navrhovaní proti porušeniu krehkým lomom metódou 2. [59]

Menovitá medza klzu základného materiálu	Nárazová práca KV (na skúšobnej tyči 10 mm × 10 mm)	Obrázok na stanovenie požadovanej T_{KV}	
		Nezvárané a žíhané po zvárení	Ako zvarené
$R_e \leq 310$	27	B.4-1	B.4-2
$310 < R_e \leq 360$	40	B.4-1	B.4-2
	27	B.4-3	B.4-4
$360 < R_e \leq 460$	40	B.4-1	B.4-2
	27	B.4-3	B.4-5

Metóda 3

Používa analýzy lomovej mechaniky. Tento všeobecný postup je použiteľný pre prípady, pre ktoré nemožno použiť metódu 1 alebo 2.

Tento postup sa smie použiť aj na zdôvodnenie odchýlok od požiadaviek metódy 1 a metódy 2. Pre túto metódu sa predkladá len všeobecný návod na použitie, ktorý sa smie použiť len po dohode zúčastnených strán.

2.10.9 Inšpekcia a skúšanie tlakových nádob podľa STN EN 13445

Táto časť uvedenej európskej normy stanovuje kontrolu a skúšanie jednotlivo a sériovo vyrábaných tlakových nádob zhotovených z ocelí v súlade s EN 13445-2 za predpokladu, že prevažne nie sú cyklicky namáhané (t.j. nádoby pracujúce pri plnom ekvivalentnom tlakovom cykle pod 500).

Osobitné opatrenia pre cyklickú prevádzku sú uvedené v EN 13445-3 a v prílohe G tejto časti. Táto časť sa nevzťahuje na kontrolu a skúšanie nádob navrhovaných spôsobom DBA (navrhovanie na základe analýzy – priamy postup) podľa EN 13445-3:2002 príloha B.

Norma stanovuje štyri skúšobné skupiny pre oceľové tlakové nádoby - Tab. 2.17.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tab. 2.17 Skúšobné skupiny pre oceľové tlakové nádoby [59]

Požiadavky	Skúšobná skupina ^a						
	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4 ^{b,j}
Povolené materiály ^g	1 až 10	1.1, 1.2, 8.1	8.2, 9.1, 9.2, 9.3, 10	1.1, 1.2, 8.1	8.2, 9.1, 9.2, 10	1.1, 1.2, 8.1	1.1, 8.1
Rozsah NDT na hlavných zvarových spojov ^{e,h}	100 %	100 %	100 % - 10% ^d	100 % - 10% ^d	25 %	10 %	0 %
NDT ostatných zvarov	Definované pre každý typ zvaru v tabuľke 6.6.2-1						
Súčiniteľ zvarového spoja	1	1	1	1	0,85	0,85	0,7
Maximálna hrúbka pre ktorú je povolené použiť dané materiály	Bez obmedzenia ^f	Bez obmedzenia ^f	30 mm pre skupiny 9.1, 9.2 16 mm pre skupiny 9.3, 8.2 ⁱ , 10	50 mm pre skupiny 1.1, 8.1 30 mm pre skupinu 1.2	30 mm pre skupiny 9.2, 9.1 16 mm pre skupiny 8.2, 10	50 mm pre skupiny 1.1, 8.1 30 mm pre skupinu 1.2	12 mm pre skupiny 1.1, 8.1
Spôsob zvarovania	Bez obmedzenia ^f	Bez obmedzenia ^f	Len <u>plnomechanizované</u> zvarovanie ^e		Bez obmedzenia ^f	Bez obmedzenia ^f	Bez obmedzenia ^f
Rozsah prevádzkovej teploty	Bez obmedzenia ^f	Bez obmedzenia ^f	Bez obmedzenia ^f	Bez obmedzenia ^f	Bez obmedzenia ^f		Obmedzené (-10 až +200) °C pre skupinu 1.1 (-50 až +300) °C pre skupinu 8.1

^a Všetky skúšobné skupiny vyžadujú 100% vizuálnu kontrolu v maximálnom možnom rozsahu
^b Skúšobnú skupinu 4 možno použiť len na:
- tekutiny skupiny 2; a
- $P_S \leq 20$ bar; a
- $P_S V \leq 20\,000$ bar.L nad 100 °C; alebo
- $P_S V \leq 50\,000$ bar.L, ak je teplota rovná alebo nižšia ako 100 °C;
- vyšší skúšobný tlak (pozri kapitolu 10);
- maximálny počet cyklov pri plnom tlaku nižší ako 500;
- nižšia hladina nominálneho návrhového napätia (pozri EN 13445-3).
^c Plnomechanizovaný a/alebo automatizovaný proces zvarovania (pozri EN 1418:1997).
^d Prvý vzor: počiatočný, druhý vzor: po dostatočnej skúsenosti. Definícia „dostatočnej skúsenosti“ je v 6.6.1.1.4
^e Podrobné údaje o skúškach sú uvedené v tabuľke 6.6.2-1.
^f „Bez obmedzenia“ znamená, že nie sú dodatočné obmedzenia ohľadom skúšania. Obmedzenia vyplývajúce z tabuľky sú obmedzenia vyvolané skúšaním. Ostatné obmedzenia uvedené v rôznych častiach tejto normy (ako navrhovanie, alebo materiálové obmedzenia, a pod.) sa musia taktiež zohľadniť.
^g Pozri EN 13445-2 pre povolené materiály.
^h Percenta sa vzťahujú na percenta zvarov na každej jednotlivej nádobe
ⁱ Pre materiály skupiny 8.2 sa povoľuje 30 mm v prípade, keď sa používajú prídavné materiály s zaručeným obsahom delta feritu na výplňové vrstvy ale nezahŕňujú kryciu vrstvu.
^j Obmedzené pre jednotlivé časti nádob a jednotlivé skupiny materiálov.

Rozsah nedeštruktívnych skúšok musí byť v súlade s Tab. 2.17, ako percentuálne hodnoty.

Keď podľa tabuľky sa požaduje menej ako 100 % skúšanie povrchu, musia sa vopred vybrať skúšané miesta. Pre skúšobnú skupinu 2 je percento zníženia NDT dané v Tab. 2.17 dvomi údajmi (napríklad 100 % - 10 %). Prvý údaj sa vzťahuje na

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

počiatočný požadovaný rozsah, pokiaľ nie sú dostatočné vyhovujúce skúsenosti, kde je stanovené, kedy možno použiť druhé nižšie údaje.

V prípade, keď sa požaduje menej než 100 % skúšok, rozsah a miesto nedeštruktívnych skúšok sa musí stanoviť podľa nasledujúcich kritérií:

1. Pre plášte, klenuté dna, rozvážacie komory a duplikátorové plášte:

- nedeštruktívne skúšky musia byť vykonané na všetkých stykoch pozdĺžnych a obvodových tupých zvarových spojoch. Minimálna dĺžka filmu musí byť 200 mm alebo dĺžka snímky 200 mm.
- otvory v hlavných zvaroch (pozdĺžnych alebo obvodových) alebo vzdialené do 12 mm od hlavných zvarov sa musia skúšať po dĺžke nie menšej ako je priemer otvoru na obidve strany od otvoru.

2. Pre hrdlá a odbočky pripojené k nádobe (tupé zvary):

- na stanovenie rozsahu nedeštruktívneho skúšania sa musia vytvoriť skupiny z celkového počtu hrdiel a odbočiek s tupými zvarmi s plným prievarom.

Viacnásobné, systematické alebo procesné nedokonalosti sa musia preskúmať, opraviť a opakovať preukázanie skúsenosti so zvaraním. Nedokonalosti (defekty) majú tendenciu sa opakovať a majú podobný charakter. Môžu byť spôsobené nevhodnými parametrami zvarovania (napríklad spôsobené zlou činnosťou zariadenia, príliš širokého rozsahu parametrov, nesprávne použitých parametrov v schválenom rozsahu), alebo chyby operátora. V prípade nevhodných parametrov treba posúdiť rekvalifikáciu stanovených postupov zvarovania WPS.

Evidencia dokumentov a postupov preukazovania skúseností musí byť uložená u výrobcu.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.11 Zvárané konštrukcie zo zliatin hliníka

Hliníkové konštrukcie sú po ocelových najviac používané konštrukcie. Uplatnenie hliníkových konštrukcií je až 12-krát menšie ako ocelových. Vyplýva to predovšetkým z doterajšieho vývoja v oblasti konštruovania, výroby a ich prevádzky. Rozvoj hliníkových konštrukcií začal oveľa neskôr, ako ocelových konštrukcií. S tým súvisia aj existujúce rozdiely v zodpovedajúcich materiálových, výrobných a technických základniach, ktoré sa na ocelové a hliníkové konštrukcie orientujú. Ďalšia relácia, ktorá na to vplýva, je ekonomická, ktorá je pre ocelové konštrukcie priaznivejšia.

Hliníkové konštrukcie, vďaka hliníku, ale najmä vďaka hliníkovým zliatinám, ktoré sa na ich výrobu používajú, majú viaceré špecifické vlastnosti. Účelné a efektívne využitie týchto vlastností môže byť rozhodujúce pre konečný výber a návrh konštrukcie. Zefektívňovanie výroby a rozširovanie hliníkových materiálov a výrobkov, vhodných aj pre zhotovovanie náročnejších nosných konštrukcií, môže vyplývajúce špecifické prednosti hliníkových konštrukcií umocniť. V súčasnej dobe sa stretávame s čoraz častejším používaním hliníkových konštrukcií v praxi.

Všeobecne známe je používanie hliníkových zliatin na výrobu rozmanitých úžitkových a ozdobných predmetov, okrem toho sa hliníkové zliatiny vo veľkej miere výhodne používajú najmä v dopravných prostriedkoch, ťažkých zariadeniach, energetických a telekomunikačných prenosových zariadeniach a sústavách, budovách a mostoch rôzneho druhu a účelu, najmä:

- v bicykloch na konštrukčné súčiastky a nosné rámy,
- v motocykloch na konštrukčné súčiastky a nosné rámy a motory,
- v osobných automobiloch na konštrukčné súčiastky, nosné rámy a podvozky, karosérie, disky kolies a najmä motory (motorové bloky, chladiče, valce, piesty a ojnice),
- v koľajnicových vozidlách na konštrukčné súčiastky a nosné konštrukcie,
- v lanovkách a vlekoch na osobnú a nákladnú prepravu,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- v plavidlách a lodiach na osobnú a nákladnú prepravu (konštrukčné súčiastky, motory),
- v lietadlách a raketách na konštrukčné súčiastky, motory a chladiace nádrže, nosné konštrukcie, opláštenia a rôzne technické vybavenia,
- v ťažných vežiach a plošinách na konštrukčné súčiastky, nosné konštrukcie a rôzne technické vybavenia,
- v elektrických a telekomunikačných zariadeniach a sústavách na konštrukčné súčiastky, nosné konštrukcie, stožiare a rôzne technické vybavenia,
- v budovách na nosné i nenosné hlavné doplnkové prvky a konštrukcie,
- v mostoch na nosné i nenosné hlavné a doplnkové prvky a konštrukcie.

Norma pre navrhovanie hliníkových zliatin, ktorá sa používa je EN 1999: Design of aluminium structures (Navrhovanie hliníkových konštrukcií), predovšetkým jej prvá časť: EN 1999-1-1:2003 General structural rules (Všeobecné pravidlá pre konštrukcie).

2.11.1 Hliník a hliníkové zliatiny

Hliník (Al) patrí medzi najrozšírenejšie chemické prvky zemskej kôry. Vyskytuje sa však iba v zlúčeninách s inými prvkami. Ruda najbohatšia na Al je bauxit. Priemyselná výroba hliníka začala koncom 19. storočia. Samotný hliník je striebristý kov čistoty 99,0 až 99,9 %, preto sa nazýva tiež čistý hliník. Hliník má viaceré veľmi dobré technické vlastnosti:

- malá objemová hustota,
- vysoká odolnosť voči korózii,
- vysoká ťažnosť,
- výborná tvarovateľnosť,
- dobrá zvariteľnosť,
- dobrá tepelná a svetelná odrazivosť,
- je ľahko a lacno recyklovateľný.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Základné fyzikálne a mechanické vlastnosti čistého hliníka sú:

- hustota $\rho = 2\,700\text{ kg/m}^3$,
- teplota tavenia $t_t = 660\text{ }^\circ\text{C}$,
- súčiniteľ dĺžkovej tepelnej rozťažnosti $\alpha = 24 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,
- tepelná vodivosť $\lambda = 240\text{ W/m.K}$,
- pevnosť v ťahu $f_u = 90 - 140\text{ MPa}$,
- modul pružnosti v ťahu $E = 69\,000\text{ MPa}$,
- modul pružnosti v šmyku $G = 25\,900\text{ MPa}$,
- ťažnosť $A_5 = 4\text{ až }40\%$,
- súčiniteľ priečnej deformácie $\nu = 0,33$.

Závažnou nevýhodou samotného hliníka je pomerne malá pevnosť a sťažená najmä triesková obrábateľnosť. Kvôli malej pevnosti sa hliník používa iba na nenosné alebo málo nosné konštrukčné časti, ako sú napríklad okenné rámy, stenové obklady, krytiny a rôzne dekoračné prvky. Tieto nevýhody vieme odstrániť vhodnými legujúcimi prvkami, ktoré vytvoria rôzne druhy zliatin hliníka. Hliníkové konštrukcie sa teda vyrábajú zo zliatin hliníka.

Najbežnejšími a najdôležitejšími legujúcimi prvkami – prísadami hliníkových zliatin sú kremík (Si), horčík (Mg), mangán (Mn), meď (Cu) a zinok (Zn), zriedkavejšie sa používajú aj iné prísady, napríklad nikel (Ni), titan (Ti). Tieto prísady sú obvykle určujúce pre celkové vlastnosti hliníkových zliatin. Mala by sa použiť iba jedna prísada, v praxi sa ale najčastejšie kombinácia prísad. Okrem prísad sú v hliníkových zliatinách v malom množstve aj iné prvky (nečistoty) z výroby.

Existuje pomerne široký sortiment hliníkových zliatin. V materiálových normách sa hliníkové zliatiny označujú prostredníctvom chemických značiek najdôležitejších prísad, ako napríklad Dural (AlCuMg), Silumín (AlSiMg).

Podľa spôsobu ďalšieho spracovania a používania sa zliatiny hliníka delia na:

- zlievarenské zliatiny hliníka,
- tvarovateľné zliatiny hliníka (hliníkové konštrukcie).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Zo *zlievarenských zliatin hliníka* sa do foriem odlievajú resp. vstreknú zliatiny, z ktorých sa následne vyrábajú najmä málo namáhané doplnkové predmety a ozdobné prvky. Majú obsah prísad spravidla vyšší ako 10% a ich štruktúra je pomerne heterogénna. Pri ich výrobe nie je rozhodujúca pevnosť, majú byť predovšetkým dobre odlievateľné a povrchovo upravovateľné, patrí sem napríklad zliatina Al-Si a zliatina AlSiMg.

Tvarovateľné zliatiny hliníka sa najprv lejú do kokíl v tvare predvalkov. Majú obsah prísad spravidla menší ako 10 % a ich štruktúra je pomerne homogénna. Predvalky následne slúžia na výrobu širokého sortimentu plechov, pásov, tyčí rôznych tvarových profilov a rúr valcovaním za tepla, valcovaním za studena, pretláčaním a ťahaním. Z naznačeného sortimentu výrobkov je zrejmé, že pre výrobu hliníkových konštrukcií sú rozhodujúce tvarové zliatiny. Pri ich výrobe je preto rozhodujúca pevnosť, ale nasledujú aj ďalšie, pre konštrukcie významné mechanické a technologické vlastnosti. Takýmito zliatinami sú napríklad zliatina AlMgSi, ktorá má strednú pevnosť, dobrú odolnosť pri korózii a priemernú zvariteľnosť, alebo zliatina AlCuMg, ktorá má vysokú pevnosť ale zníženú odolnosť pri korózii a zníženú zvariteľnosť.

Mechanické a technologické vlastnosti konštrukčných výrobkov z tvarovateľných hliníkových zliatin závisia od:

- chemického zloženia (použitých prísad),
- tepelného spracovania,
- postupu výroby.

Dôležitý je preto konečný chemicko-technologický stav zliatiny a výrobku, ktorý sa po celom predchádzajúcom procese výroby dosiahol.

Za základný stav hliníkovej zliatiny možno považovať tzv. **mäkký stav**. Vyznačuje sa malou pevnosťou a vysokou ťažnosťou. Závisí predovšetkým od mechanického zloženia zliatiny a vzniká tvárnením za tepla (valcovanie, pretláčanie). Mäkký stav je vhodný pre polotovary určené na ďalšie tvárnenie.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pri tvárnení za studena (valcovanie, lisovanie, ťahanie) dochádza k spevňovaniu hliníkovej zliatiny. V závislosti od intenzity tvárnenia možno dosiahnuť tzv. **polotvrдый stav** alebo **tvrdý stav**. Polotvrдый stav sa vyznačuje vyššou pevnosťou a menšou ťažnosťou. Pri tvrdom stave má zliatina a výrobok vysokú pevnosť, ale aj veľmi malú ťažnosť. Pre nedostatočnú ťažnosť (nedostatočné plastické vlastnosti) sa hliníkové zliatiny a výrobky v tvrdom stave na nosné konštrukcie nepoužívajú.

Pri pôvodne spevnených zliatinách a výrobkoch tvarovaných za studena je možné získať polotvrдый alebo mäkký stav tzv. **rekryštalizačným žiňaním**, ktoré pozostáva z ohrevu na rekryštalizačnú teplotu a následného ochladenia. Mäkký stav pri pôvodne spevnených zliatinách a výrobkoch je možné získať aj tvarovaním za tepla. Takéto tvárnenie prebieha pri teplote podstatne vyššej ako je rekryštalizačná teplota. Pri tvárnení sa zrná deformujú (v smere tvárnenia), ale vplyvom vysokej teploty dochádza k následnej rekryštalizácii, pri ktorej vznikajú nové, jemnejšie, nedeformované zrná. Ide tu vlastne opäť o rekryštalizačné žiňanie spojené s tvárnením.

Chemicko-mechanický stav tvarovateľných hliníkových zliatin sa často upravuje aj tzv. **vytvrdzovaním**. Pozostáva z ohrevu zliatiny na teplotu, pri ktorej sa legujúce prísady v hliníku úplne rozpustia a vytvoria s ním tuhý homogénny roztok. Pri následnom rýchlom ochladení (najčastejšie vodou) sa legujúce prísady nemôžu vylúčiť tak, aby vznikol rovnovážny stav, preto vzniká presýtený roztok. Po ochladení je zliatina mäkká a málo pevná. Následne v priebehu času sa legujúce prísady vylučujú v jemných čiastkách, ktoré zostávajú vnútri zŕn hliníka. Dochádza tým k tzv. **starnutiu**, pri ktorom sa pevnosť hliníkovej zliatiny zvyšuje a ťažnosť znižuje. Vytvrdzovanie má teda na vlastnosti hliníkových zliatin podobný vplyv ako tvárnenie za studena. Proces starnutia závisí od teploty prostredia. Pri izbovej teplote starnutie prebieha pomaly, trvá niekoľko dní i mesiacov. Ide o **prirodzené starnutie** a celý proces je označovaný ako **vytvrdzovanie za studena**.

Pri zvýšenej teplote 100 až 200 °C starnutie prebieha podstatne rýchlejšie, trvá iba 4 až 30 hodín. Ide potom o **umelé starnutie** a celý proces je označovaný ako **vytvrdzovanie za tepla**.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Hliníkové zliatiny majú viaceré fyzikálne a mechanické vlastnosti rovnaké alebo veľmi málo rozdielne ako samotný čistý hliník, naproti tomu, niektoré majú zámerne odlišné, aby boli výhodne použiteľné aj na nosné prvky a konštrukcie tak, ako sa používajú zodpovedajúce konštrukčné ocele. Z porovnania vybraných fyzikálnych a mechanických vlastností hliníka, hliníkových zliatin a zodpovedajúcich konštrukčných ocelí vyplývajú nasledovné zistenia.

Hustota hliníka a hliníkových zliatin je prakticky rovnaká ($\rho = 2\,700\text{ kg/m}^3$). Naproti tomu hustota konštrukčných ocelí ($\rho = 7\,850\text{ kg/m}^3$) je približne 2,9-krát vyššia ako hliníka a hliníkových zliatin. Vyplývajú z toho zásadné výhody hliníkových konštrukcií, predovšetkým malá hmotnosť a ľahká manipulácia pri výrobe, doprave a montáži.

Teplota tavenia hliníka a hliníkových zliatin je len málo rozdielna ($t_f = 630 - 660\text{ }^\circ\text{C}$). Naproti tomu teplota tavenia konštrukčných ocelí ($t_f = 1500\text{ }^\circ\text{C}$) je približne 2,3-krát vyššia ako hliníka a hliníkových zliatin. Vyplýva z toho, že hliníkové konštrukcie sú náchylnejšie na nepriaznivé teplotné účinky. Pevnosť hliníkových konštrukcií v závislosti od teploty klesá rýchlejšie ako pevnosť ocelových konštrukcií. S nepriaznivými teplotnými účinkami je potrebné počítať tak pri hliníkových, ako aj pri ocelových konštrukciách, už pri teplote väčšej ako je $100\text{ }^\circ\text{C}$. Nepriaznivé teplotné účinky na hliníkové i ocelové konštrukcie sa môžu zmeniť, prípadne i eliminovať, zodpovedajúcou povrchovou ochranou. Správanie sa hliníkových zliatin pri nízkych záporných teplotách sa líši od správania sa konštrukčných ocelí, je podstatne priaznivejšie. Mechanické vlastnosti pri statickom i dynamickom zaťažení sa prakticky nemenia. Ťažnosť a vrubovú húževnatosť si hliníkové zliatiny zachovávajú aj pri veľmi nízkych teplotách.

Súčiniteľ dĺžkovej teplotnej rozťažnosti hliníka a hliníkových zliatin je len málo rozdielny ($\alpha = 22\text{ až }24 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$). Naproti tomu súčiniteľ dĺžkovej teplotnej rozťažnosti konštrukčných ocelí ($\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) je približne 1,9-krát menší ako u hliníka a hliníkových zliatin. Vyplýva z toho opäť, že hliníkové konštrukcie sú citlivejšie na nepriaznivé teplotné účinky, ktoré sa v závislosti od teploty prejavujú väčšími pretvoreniami, najmä pri staticky určitých konštrukciách. Je potrebné s tým

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

počítať pri podperách, spojoch a dilatáciách jednotlivých konštrukčných častí. Pri staticky neurčitých konštrukciách v dôsledku menšieho modulu pružnosti E , vplyv teploty na veľkosť vnútorných síl hliníkových konštrukcií je menší ako pri zodpovedajúcich oceľových konštrukciách.

Tepelná vodivosť hliníka a hliníkových zliatin je $\lambda = 144$ až 240 W/m.K . Tepelná vodivosť konštrukčných ocelí je ($\lambda = 53 \text{ W/m.K}$) čo je 4,5 až 2,7-krát menšia ako u hliníka a hliníkových zliatin. Vyššia tepelná vodivosť hliníka a hliníkových zliatin môže vytvárať tepelné mosty a pri vyšších teplotných rozdieloch aj zrážanie vodných pár. Môže sa tomu zabrániť najmä vhodným konštrukčným riešením - prerušením teplotného mosta.

Pevnosť v ťahu hliníkových zliatin môže byť, v závislosti od predchádzajúceho tvárnenia a vytvrdzovania, zásadne odlišná od pevnosti hliníka ($f_u = 90 - 550 \text{ MPa}$). Pevnosť hliníkových zliatin môže byť porovnateľná alebo aj vyššia, ako je pevnosť bežne používaných konštrukčných ocelí (napr. S235 - $f_u = 360 \text{ MPa}$, S355 - $f_u = 510 \text{ MPa}$). Zvýšená pevnosť v ťahu hliníkových zliatin je však podmienená obmedzením nepriaznivých teplotných účinkov, a to tak pri výrobe, ako aj prevádzke hliníkových konštrukcií.

Pevnosť hliníkových zliatin a konštrukcií ovplyvňuje aj zaťažovanie. Pri premennom, často opakovanom zaťažení, môže dôjsť, obdobne ako pri oceľových konštrukciách, k únave materiálu. Hliníkové konštrukcie sú však náchylnejšie na únavové porušenie ako oceľové konštrukcie. Medza únavy vytvrdzovaných i nevytvrdzovaných hliníkových zliatin je pomerne veľmi nízka. Vysoko spevnené zliatiny sú veľmi citlivé na výrubové účinky, napríklad zliatina AlCuMg vytvrdená (Dural) má medzu pevnosti v ťahu $f_u = 420$ až 440 MPa , pritom medza únavy zliatiny ako základného materiálu $f_{fat} = 157 \text{ MPa}$ a medza únavy zliatiny v mieste zvarového spoja $f_{fat,w} = 80 \text{ MPa}$.

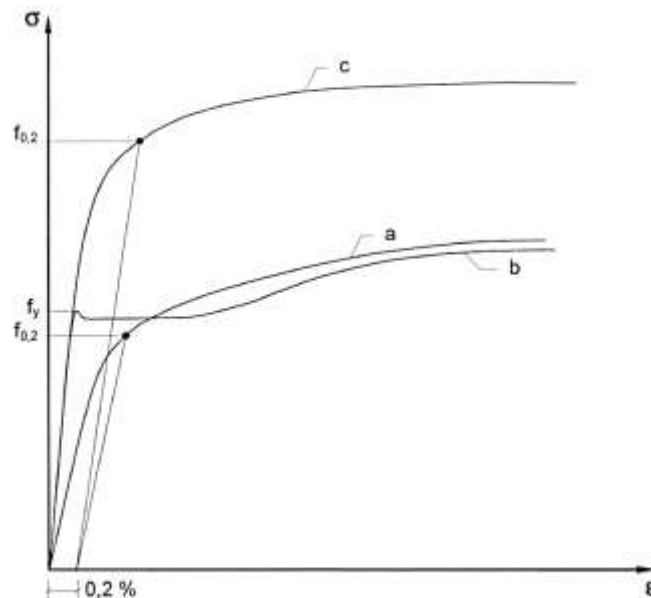
Modul pružnosti v ťahu hliníka a hliníkových zliatin je iba veľmi málo rozdielny $E = 69\,000$ až $72\,000 \text{ MPa}$. Modul pružnosti v ťahu konštrukčných ocelí ($E = 210\,000 \text{ MPa}$) je prakticky 3-krát väčší ako hliníka a hliníkových zliatin. V dôsledku toho, pri hliníkových konštrukciách, majú podstatne závažnejší význam

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

celkové i lokálne pretvorenia (závislé a vodorovné priehyby). Výrazne menší modul pružnosti hliníkových zliatin sa nepriaznivo prejavuje aj na celkovej a lokálnej stabilite hliníkových konštrukcií (porušenie vybočením, skrútením a vydutím). Neprimerané pretvorenia a stabilitné vplyvy možno eliminovať primeraným zvýšením tuhosti prierezov jednotlivých prvkov.

Modul pružnosti v šmyku hliníka a hliníkových zliatin je iba veľmi málo rozdielny $G = 25\,900$ až $27\,100$ MPa. Súčiniteľ priečnej deformácie hliníka a hliníkových zliatin je prakticky rovnaký $\nu = 0,33$. Súčiniteľ priečnej deformácie konštrukčných ocelí je iba málo rozdielny ($\nu = 0,3$). Vzhľadom na všeobecnú viazanosť modulu pružnosti v šmyku na modulu pružnosti v ťahu a súčiniteľ priečnej deformácie kovových materiálov je aj modul pružnosti v šmyku konštrukčných ocelí ($G = 80\,800$ MPa) prakticky 3-krát väčší ako hliníka a hliníkových zliatin. V dôsledku toho pri hliníkových konštrukciách, majú podstatne závažnejší význam aj zodpovedajúce šmykové pretvorenia, ktoré je možné opäť eliminovať predovšetkým zvýšením tuhosti prierezov jednotlivých prvkov.

Ťažnosť hliníka a hliníkových zliatin môže byť veľmi rozdielna $A_5 = 1$ až 40%. Závisí od ich chemicko-mechanického stavu. Všeobecne možno konštatovať, že hliník a hliníkové zliatiny v mäkkom stave majú ťažnosť pomerne vysokú. Tvárnením za studena alebo vytvrdzovaním sa ťažnosť hliníkových zliatin znižuje. V závislosti od použitých prísad, ako aj pevnosti, môže byť toto zmenšenie prijateľné, ale aj veľmi významné - nevhodné pre nosné hliníkové konštrukcie. Ťažnosť konštrukčných ocelí taktiež závisí od ich chemického zloženia a pevnosti. Obvyklá mäkká nízkouhlíková oceľ S235 má ťažnosť $A_5 = 25\%$. Ocele vyšších pevností majú ťažnosť menšiu, ťažnosť konštrukčných ocelí však nemá byť menšia ako 15 %.



Obr. 2.54 Diagramy napätia - predĺženie hliníkových zliatin a konštrukčných ocelí [60]

(a - hliníkové zliatiny, b - mäkké nízkouhlíkové ocele, c - ocele vyšších pevností)

Mechanické vlastnosti hliníkových zliatin a obvykle nízkouhlíkovej konštrukčnej ocele dobre vyjadrujú príslušné pracovné diagramy získané ťahovými skúškami - Obr. 2.54. Pre hliníkové zliatiny je charakteristické, že oblasť tečenia prakticky nemajú. Po prekročení lineárnej pružnej oblasti nasleduje plynule oblasť spevňovania a oblasť prerušovania. Preto sa pri hliníkových zliatinách vždy uvažuje s konvenčnou medzou klzu $f_{0,2}$, zjednodušene tiež označovanej ako f_0 .

2.11.2 Konštrukčné hliníkové zliatiny

V súčasnosti existuje pomerne veľa konštrukčných hliníkových zliatin v závislosti od chemického zloženia a spôsobu ich predchádzajúceho spracovania, respektíve stavu, v ktorom sa nachádzajú. Dôležité je preto ich označovanie z materiálového hľadiska. Vo všeobecnosti sa uplatňuje takzvané chemické označovanie hliníkových zliatin, ktoré pozostáva z chemického označenia použitých hlavných prísad, pričom obsah rozhodujúcich prísad sa vyznačuje aj číselne, napríklad:

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- zliatina AlMg1 obsahuje 1 % mangánu,
- zliatina AlMgSi0,5 obsahuje 0,5 % kremíka,
- zliatina AlZn4Mg1 obsahuje 4 % zinku a 1 % mangánu.

Medzinárodne prijaté označovanie hliníkových zliatin, uplatňované v Európskej norme EN 1999 -1-1:2003, pozostáva z písomného rozlíšenia:

- tvarovateľných zliatin AW (Aluminium Wrought) (Obr. 2.55),
- zlievarenských zliatin AC (Aluminium Casting) (Obr. 2.56),
- a číselné označenie, ktoré charakterizuje chemické zloženie.

Napríklad: EN AW – 3004 (chemické označenie: EN AW – Al Mn1Mg1)

EN AC – 42100 (chemické označenie: EN AC – Al Si7Mg0,3)

Označenie zliatiny		Druh výrobku	Trvanlivosť
číselné	chemické		
EN AW-3004	EN AW-Al Mn1Mg1	SH, ST, PL	A
EN AW-3005	EN AW-Al Mn1Mg0,5	SH, ST, PL	A
EN AW-3103	EN AW-Al Mn1	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B	A
EN AW-5005	EN AW-Al Mg1(B)	SH, ST, PL	A
EN AW-5049	EN AW-Al Mg2Mn0,8	SH, ST, PL	A
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2,5	SH, ST, PL, ET, SEP, ER/B	A
EN AW-5083	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7	SH, ST, PL, ET, SEP, ER/B, DT,FO	A
EN AW-5454	EN AW-Al Mg3Mn	SH, ST, PL, ET, SEP, ER/B	A
EN AW-5745	EN AW-Al Mg2	SH, ST, PL, ET, SEP, ER/B, DT,FO	A
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	ET, EP, ER/B,DT	B
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	SH, ST, PL,ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	ET, EP, ER/B,DT	B
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg(A)	ET, EP, ER/B	B
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	SH, ST, PL, ET, SEP, ER/B, DT,FO	B
EN AW-6106	EN AW-Al MgSiMn	EP	B
EN AW-7020	EN AW-Al Zn4,5Mg1	SH, ST, PL,ET, EP, ER/B, DT	C
Vysvetlivky: SH – tenký plech SEP – jednoduché pretláčané profily ST – pás ER/B – pretláčané tyče a prúty PL – hrubý plech DT – ťahaná rúrka ET – pretláčaná rúrka FO – výkovky EP – pretláčané profily			

Obr. 2.55 Tvarovateľné hliníkové zliatiny [60]

(A - trvanlivosť výborná, B,C - trvanlivosť znížená)

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Označenie zliatiny		Trvanlivosť
číselné	chemické	
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	B
EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	B
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	B
EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	B
EN AC-44200	EN AC-Al Si12Mg(a)	B
EN AC-51300	EN AC-Al Mg	A

Obr. 2.56 Zlievarenské hliníkové zliatiny [60]

(A - trvanlivosť výborná, B - trvanlivosť znížená)

Pre navrhovanie hliníkových konštrukcií sú dôležité konečné vlastnosti jednotlivých konštrukčných zliatin a výrobkov, ktoré závisia od stavu, v ktorom sa dodávajú. Preto úplné označenie konštrukčných zliatin musí obsahovať aj takéto informácie.

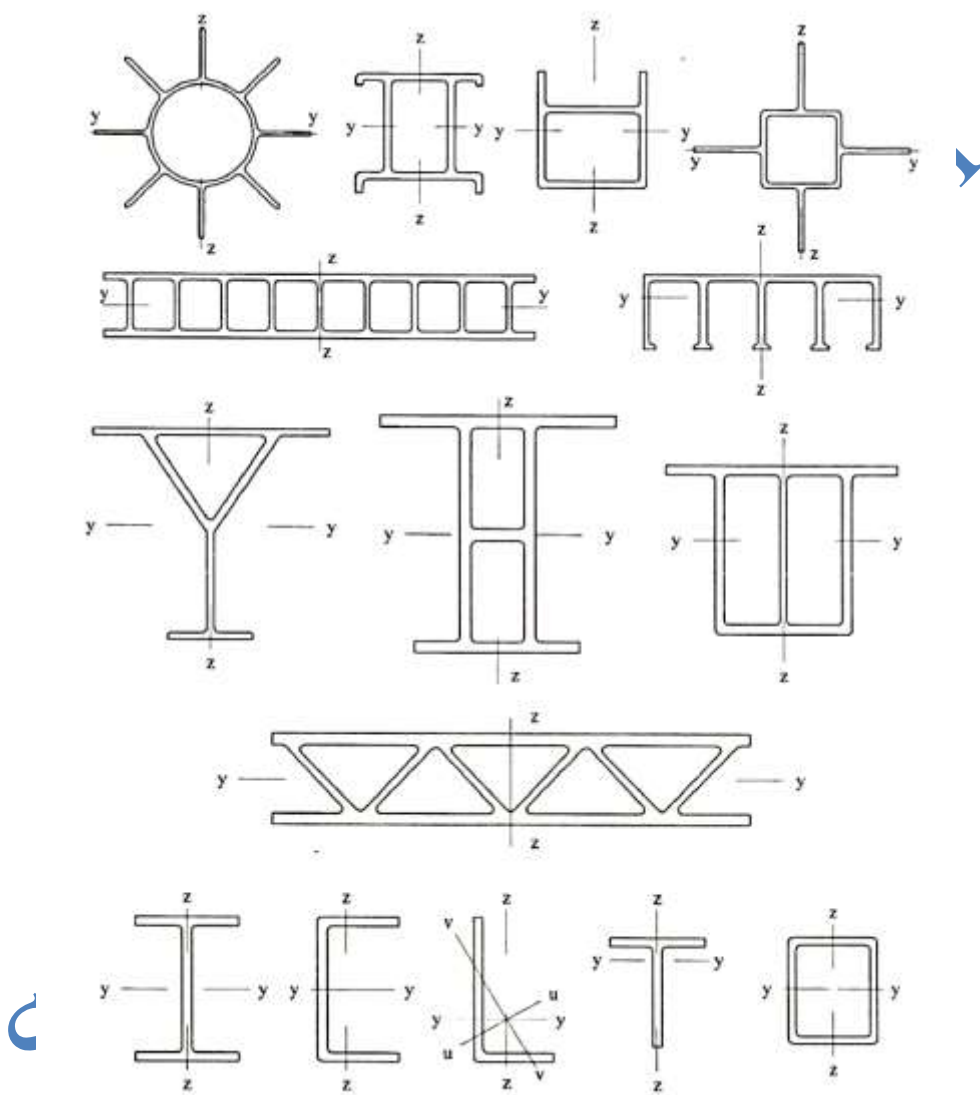
Tvarovateľné zliatiny tepelne vytvrdzované majú podľa spôsobu tepelného spracovania dodatočné označenie T1 až T10. Z hľadiska navrhovania konštrukcií sú najdôležitejšie tieto označenia T4 - rozpúšťacie žihanie a prirodzené starnutie, T5 - ochladzovanie z teploty tvarovania na umelé starnutie, T6 - rozpúšťacie žihanie a umelé starnutie. Príklad označenia tvarovateľnej vytvrdzovanej zliatiny EN AW – 6063-T5.

Tvarovateľné zliatiny tepelne nevytvrdzované, ktoré sú tvarované za studena, majú dodatočné označenie pozostávajúce z písmena veľké H a dvojčísla, pričom prvé číslo označuje spôsob spracovania po predchádzajúcom tvárnení za studena (napríklad 2 - požadovaná tvrdosť dosiahnutá žihamím) a druhé číslo označuje stupeň tvrdosti. Príklad označenia tvarovateľnej nevytvrdzovanej zliatiny EN AW-5083-H22.

Tvarovateľné zliatiny tepelne nevytvrdzované podľa stavu spracovania, v ktorom sa dodávajú, môžu mať ešte dodatočné označenie pozostávajúce z písmena O - označuje materiál plne žihaný ohrevom, alebo F - označuje materiál formovaný do konečného tvaru (valcovaním alebo pretláčaním za tepla). Príklad označenia tvarovateľnej nevytvrdzovanej zliatiny: EN AW – 5083-O.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Na Obr. 2.57 sú uvedené príklady rúrok rôznych profilov, ktoré môžu byť použité pri návrhu konštrukcií z hliníkových zliatin.



Obr. 2.57 Ilustrácia prierezov konštrukčných výrobkov z hliníkových zliatin [60]

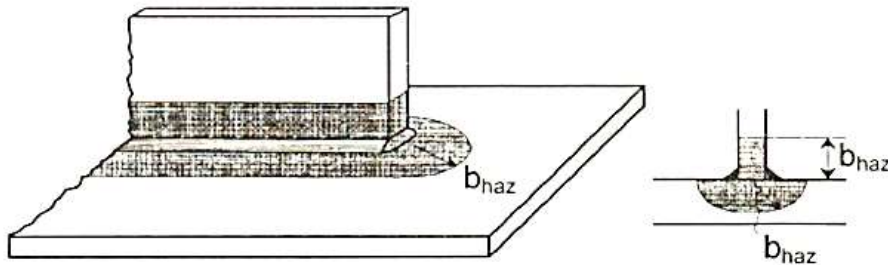
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.11.3 Zváranie hliníkových zliatin

Zliatiny majú všeobecne dobrú zvariteľnosť. Rýchlosť zvárania je vyššia ako pri konštrukčných oceliach. Pri zváraní hliníkových zliatin vznikajú však určité ťažkosti, ktoré sú spôsobené najmä ich pomerne nízkou teplotou tavenia. Roztavené hliníkové zliatiny sú veľmi tekuté, čo spôsobuje problémy pri zváraní v niektorých polohách. Na povrchu hliníkových zliatin sa tvorí malá vrstva oxidu hlinitého, ktorý má teplotu tavenia podstatne vyššiu ($t_t = 2050\text{ }^{\circ}\text{C}$), preto ju treba pred zváraním odstrániť a brániť jej vzniku počas zvárania. V dôsledku nepriaznivého vplyvu teploty je zváranie vhodné najmä pri nevytvrdzovaných zliatinách (AlMn, AlMg). Zváranie je vhodné aj pri samovyvodzovateľných zliatinách (AlZnMg), pri ktorých bezprostredne po zváraní dôjde k poklesu pevnosti, avšak po určitom čase (3 mesiace) sa pevnosť opäť zvýši na 90 % ich pôvodnej pevnosti. Vzhľadom na dobrú tepelnú vodivosť sú na zváranie hliníkových zliatin vhodné spôsoby so sústrednými zdrojmi tepla, ako je elektrické oblúkové a odporové zváranie. Hliníkové zliatiny majú pri teplotách 300 až 350 $^{\circ}\text{C}$ veľmi nízku pevnosť, napätie vznikajúce pri chladnutí preto môže spôsobiť v zvaroch trhliny. Všeobecne majú hliníkové zvárané spoje v porovnaní s oceľovými spojmami nižšiu únosnosť.

Pri návrhu zváraných hliníkových konštrukcií je potrebné zobrazit' aj redukciu pevnostných vlastností materiálu v dôsledku zmäknutia v blízkosti zvarov. Vo väčšej miere sa pritom táto redukcia prejavuje na medzi klzu f_y ako na pevnosti v ťahu f_u . Ide o pomerne úzku ovplyvnenú oblasť, ktorá sa v norme EN 1999 -1-1:2003 označuje ako oblasť HAZ. Mimo tejto oblasti má materiál pôvodné - neovplyvnené pevnostné vlastnosti. Predpokladá sa, že oblasť HAZ sa rozprestiera do vzdialenosti b_{haz} v ľubovoľnom smere od zvaru (Obr. 2.58).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.58 Zvarovým teplom ovplyvnená oblasť (HAZ) [60]

Pre účely navrhovania sa predpokladá, že v celej oblasti HAZ sa pevnosti redukujú faktorom, ktorý je pre jednotlivé materiály a ich pevnosti normovaný, v závislosti od stavu spôsobu zvarovania (MIG, TIG) a hrúbky materiálu – t .

V prípade viacvrstvého zvaru MIG (Metal Inert Gas) položeného na materiál bez predhrevu a s ochladením medzivrstvy na teplotu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ alebo menšiu, sú hodnoty nasledovné:

$t \leq 6\text{ mm}$	$b_{haz} = 20\text{ mm},$
$6 < t \leq 12\text{ mm}$	$b_{haz} = 30\text{ mm},$
$12 < t \leq 25\text{ mm}$	$b_{haz} = 35\text{ mm},$
$t > 25\text{ mm}$	$b_{haz} = 40\text{ mm}.$

V prípade zvarov TIG je oblasť HAZ väčšia, pretože vnesené teplo je väčšie, ako pri zvaroch MIG, napríklad pri tupých zvaroch konštrukčných zliatin v spevnenom stave s hrúbkou $t \leq 6\text{ mm}$ je $b_{haz} = 30\text{ mm}$.

Hliníkové zliatiny sa zvarujú striedavým prúdom. Dôvodom je vrstvička Al_2O_3 na povrchu ktorej je teplota vysoká.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

2.11.4 Zásady, pravidlá a metódy výpočtu a navrhovania konštrukcií zo zliatín hliníka

Pre navrhovanie hliníkových konštrukcií platia obdobné zásady ako pre navrhovanie oceľových konštrukcií, ale i konštrukcií z iných materiálov, ktoré sú súhrnne uvedené v EN 1900. Zaťaženia na konštrukcie sú definované v EN 1991. Špecifické zásady, pravidlá a požiadavky sú obsiahnuté v EN 1999 -1-1:2003.

Základnou požiadavkou je, aby konštrukcia pre daný účel a predpokladanú životnosť, bola navrhnutá i zhotovená s primeranou spoľahlivosťou, trvanlivosťou a hospodárnosťou, vo vzťahu k všetkým možným zaťaženiám a vplyvom, ako aj nákladom na jej zhotovenie i nákladom na jej údržbu.

Splnenie všetkých požiadaviek sa musí zaistiť voľbou vhodného materiálu, primeraným návrhom a zodpovednou kontrolou pri navrhovaní, zhotovovaní a užívaní konštrukcie.

Na Obr. 2.59 a Obr. 2.60 sú v súlade s normou EN 1999 -1-1:2003 uvádzané minimálne zaručené hodnoty základných mechanických vlastností pre vybrané konštrukčné výrobky a odliatky, v závislosti od hrúbky a stavu, v ktorom sa dodávajú.

Zliatina	Spôsob odlievania	Stav	$f_{0,2}$ (f_0) MPa	f_u (f_a) MPa	A_{50} %
EN AC-42100	do stálych foriem	T6	147	203	2
		T64	126	175	4
EN AC-42200	do stálych foriem	T6	168	224	2
		T64	147	203	3
EN AC-43000	do stálych foriem	F	63	126	2
EN AC-43300	do stálych foriem	T6	147	203	2
	do piesku	T6	133	161	2
	do stálych foriem	T64	126	175	3
EN AC-44200	do stálych foriem	F	56	119	3
	do piesku	F	49	105	2,5
EN AC-51300	do stálych foriem	F	70	126	2
	do piesku	F	63	112	2

Obr. 2.59 Minimálne zaručené hodnoty konvenčnej medze klzu $f_{0,2}$, medze pevnosti f_u a ťažnosti A_{50} pre odliatky vyrobené zo zlievarenských hliníkových zliatin [60]

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Zliatina	Stav	t v mm od do		$f_{0,2}(f_0)$ MPa	$f_u(f_a)$ MPa	A_{50} %	$f_{0,haz}$ MPa	$f_{a,haz}$ MPa
EN AW-3004	H14	0,2	6	180	220	1	75	155
	H16	0,2	4	200	240	1		
EN AW-3005	H16	0,2	4	175	195	1	56	115
	H18	0,2	3	200	220	1		
EN AW-3103	H14	0,2	25	120	140	2	44	90
	H16	0,2	4	145	160	1		
EN AW-5005	O/H111	0,2	50	35	100	15	35	100
	H12	0,2	12,5	95	125	2		
	H14	0,2	12,5	120	145	2		
EN AW-5052	H12	0,2	4	160	210	4	80	170
	H14	0,2	2	180	230	3		
EN AW-5049	O	0,2	100	80	190	12	80	190
	H14	0,2	25	190	240	3		
EN AW-5454	O/H111	0,2	8	85	215	12	85	215
	H24/H34	0,2	25	200	270	4		
EN AW-5754	O/H111	0,2	100	80	190	12	80	180
	H24/H34	0,2	25	160	240	6		
EN AW-5083	O/H111	0,2	50	125	275	11	125	275
		50	80	115	270	14		
	H24/H34	0,2	25	250	340	4		
EN AW-6061	T4	0,4	12,5	110	205	12	95	150
	T6	0,4	12,5	240	290	6		
EN AW-7020	T6	0,4	12,5	280	350	7	205	280
	T651	12,5	40			9		

Obr. 2.60 Minimálne zaručené hodnoty konvenčnej medze klzu $f_{0,2}$, medze pevnosti f_u a ťažnosti A_{50} pre pretláčané profily, tyče a rúrky, ako aj rúrky vyrobené ťahaním z tvarovateľných hliníkových zliatin [60]

Pri určovaní vnútorných síl a momentov sa používa postup výpočtu v oblasti pružnosti alebo plasticity, podľa teórie pružnosti a plasticity.

Výpočet v oblasti pružnosti sa môže použiť v každom prípade. V prípade splnenia určitých požiadaviek možno pritom využívať aj plastickú únosnosť najviac namáhaných prierezov.

Výpočet v oblasti plasticity sa môže použiť iba pri statickom, respektíve tlakom kvázi statickom zaťažení, ktoré nespôsobuje únavové vplyvy a postupný rozvoj plastických deformácií pri opakovanom zaťažení konštrukcie. Pri plastickom výpočte sa uvažuje so vznikom izolovaných plastických kĺbov v najviac namáhaných

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

prierezoch a so vznikom plastického mechanizmu porušenia konštrukcie. V miestach plastických kĺbov nemá byť materiál ovplyvnený teplom od zvárania.

Pri výpočte v oblasti plasticity, musia byť zabezpečené aj viaceré ďalšie požiadavky a to:

- rovinné zaťažovanie konštrukcie najmä v oblasti predpokladaných plastických kĺbov,
- materiál s dostatočnou ťažnosťou,
- lokálna stabilita najviac namáhaných prierezov a oblastí,
- celková stabilita jednotlivých prvkov a konštrukcie,
- malé trvalé pretvorenie jednotlivých prvkov a konštrukcie.

Pri výpočte vnútorných síl a momentov sa obvykle uvažuje s idealizovaným pružnoplastickým pracovným diagramom materiálu. Zjednodušene sa teda neuvažuje s nelineárnym pôsobením a spevňovaním materiálu. Pri presnejších výpočtoch však možno uvažovať aj s linearizovaným spevnením materiálu.

Pri navrhovaní konštrukcií sa všeobecne uplatňuje metóda medzných stavov. Všetky prúty konštrukcie majú vyhovovať jednotlivým medzným stavom únosnosti a medzným stavom použiteľnosti. K medzným stavom únosnosti konštrukcie sa vzťahujú stavy porušovania, poškodenia a zrútenia. Z tohto hľadiska sa musí predchádzať:

- strate stability polohy,
- vyčerpaniu pevnosti,
- strate stability tvaru,
- únavovému lomu,
- krehkému lomu,
- nadmerným plastickým deformáciami konštrukcie.

K medzným stavom použiteľnosti konštrukcie sa vzťahujú stavy, pri ktorých nie sú splnené podmienky pre používanie. Z tohto hľadiska sa musí predchádzať:

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- pretvoreniam a priehybom, ktoré ovplyvňujú vzhľad a účelné využívanie konštrukcie, alebo spôsobujú poškodenie povrchových úprav alebo nenosných prvkov,
- kmitaniu, ktoré spôsobuje nepohodu ľudom, poškodenie zariadení alebo inak obmedzuje funkčnosť konštrukcie.

Charakteristické hodnoty pevnosti materiálu pre jednotlivé konštrukčné hliníkové zliatiny a materiály sú normované. Pri výpočte odolnosti prierezov a prútov sa uplatňujú nasledujúce charakteristické hodnoty pevnosti materiálu:

- $f_0 = f_{0,2}$ - charakteristická hodnota pevnosti materiálu pre posúdenie celkovej a lokálnej pevnosti prierezov a prútov v ťahu, tlaku a ohybe (medza klzu v ťahu),
- $f_a = f_u$ - charakteristická hodnota pre posúdenie lokálnej pevnosti prierezov oslabených otvormi pre spojovacie prostriedky (medza pevnosti v ťahu),
- f_v - charakteristická hodnota pevnosti materiálu v šmyku (medza klzu v šmyku).

Pri výpočte odolnosti prierezov a prútov sa počíta s takzvanými návrhovými hodnotami pevnosti materiálu, ktoré sa určujú z príslušných charakteristických hodnôt pevnosti prostredníctvom **parciálnych súčiniteľov spoľahlivosti materiálu**.

Používajú sa nasledujúce súčinitele:

- γ_{M0} pre posúdenie pevnosti prostej pevnosti, odporúčaná hodnota je 1,1,
- γ_{M1} pre posúdenie celkovej a lokálnej stabilitej pevnosti, odporúčaná hodnota je 1,1,
- γ_{M2} pre posúdenie pevnosti oslabených prierezov, odporúčaná hodnota je 1,25.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pri výpočte odolnosti respektíve únosnosti prierezov sa počíta:

- s plnou - menovitou plochou prierezu A_g ,
- pri prierezoch oslabených otvormi pre spojovacie prostriedky sa počíta s oslabenou prierezovou plochou A_{net} , ktorá sa stanovuje z plnej prierezovej plochy zmenšením o plochy príslušných otvorov.

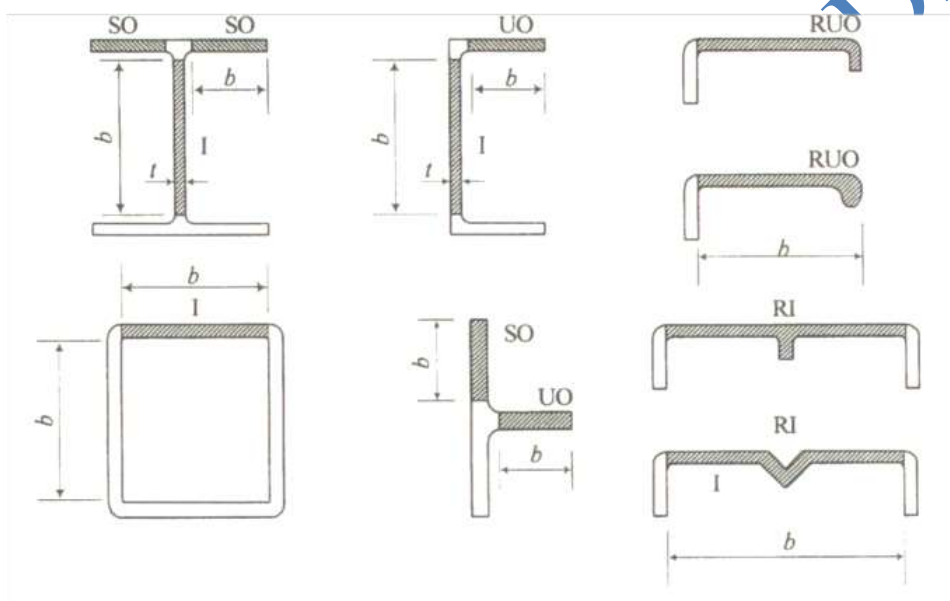
Prierezy namáhané ohybom a tlakom sa klasifikujú z hľadiska lokálnej stability ich tlačných častí - elementov (pásnice a steny). Obdobne ako v prípade oceľových konštrukcií sa definujú 4 triedy prierezov:

- prierezy triedy 1 s plnou plastickou ohybovou únosnosťou definovanou momentom M_{pl} a dostatočnou kapacitou pootáčania pre výpočet v oblasti plasticity,
- prierezy triedy 2 s plnou plastickou ohybovou únosnosťou definovanou momentom M_{pl} , ale obmedzenou kapacitou pootáčania pre výpočet v oblasti plasticity,
- prierezy triedy 3 s plnou pružnou ohybovou únosnosťou definovanou momentom M_{el} , bez možnosti využívania plastických vlastností materiálu,
- prierezy triedy 4, pri ktorých treba pohybovú únosnosť definovanú momentom M_{el} , alebo tlakovú únosnosť definovanú ohybovou silou N_{el} , primerane redukovať dôsledkom lokálneho vydúvania ich tlačných častí.

Prierezy sa klasifikujú podľa klasifikácie ich jednotlivých elementov. Tlačené elementy v priereze môžu byť vo všeobecnosti v rôznych triedach. Prierez sa klasifikuje podľa najnepriaznivejšieho elementu. Pritom rozlišujeme nasledujúce elementy prierezu - Obr. 2.61:

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- SO odstávajúci element symetrického prierezu (jednostranné podopretie),
- UO odstávajúci element nesymetrického prierezu (jednostranné podopretie),
- I vnútorný element prierezu (obojsstranné podopretie),
- RI vnútorný vystužený element symetrického prierezu,
- RO odstávajúci vystužený element nesymetrického prierezu.



Obr. 2.61 Charakteristické prierezy a ich jednotlivé elementy [60]

Odolnosť ťahaných prútov

Prúty namáhané osovým ťahom sa môžu porušiť:

- celkovou plastizáciou, v prípade plných prierezov,
- lokálnym porušením, v prípade oslabených prierezov.

Prúty namáhané osovým ťahom musia spĺňať podmienku:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd} \quad (2.121)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

kde:

N_{Ed} - návrhová ťahová osová sila,

$N_{t,Rd}$ - návrhová ťahová odolnosť prierezu.

Pri prútoch s plnými prierezmi:

$$N_{t,Rd} = A_g f_0 / \gamma_{M1} \quad (2.122)$$

kde:

A_g - plocha plného prierezu, alebo redukovaného prierezu v dôsledku zmäknutia teplom ovplyvnenej oblasti (HAZ).

Pri prútoch s oslabenými prierezmi:

$$N_{t,Rd} = A_{net} f_a / \gamma_{M2} \quad (2.123)$$

kde:

A_{net} - oslabená plocha prierezu, s uvažovaním oslabenia otvormi pre spojovacie prostriedky a oslabenia v dôsledku zmäknutia teplom ovplyvnenej oblasti (HAZ).

Odolnosť tlačných prútov - stĺpov

Prúty namáhané osovým tlakom sa môžu porušiť:

- lokálnym plastickým tečením pod tlakovou silou,
- celkovým ohybom,
- celkovým skrútením.

Prúty namáhané osovým tlakom musia spĺňať podmienku:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (2.124)$$

kde:

N_{Ed} - návrhová tlaková osová sila,

$N_{b,Rd}$ - návrhová tlaková odolnosť prierezu.

Pre porušenie lokálnym plastickým tečením pod tlakovou silou:

$$N_{b,Rd} = N_{0,Rd} = A_{eff} f_0 / \gamma_{M1} \quad (2.125)$$

$$N_{b,Rd} = N_{a,Rd} = A_{net} f_a / \gamma_{M2} \quad (2.126)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

kde:

A_{eff} - efektívna plocha prierezu zohľadňujúca lokálne vydúvanie jednotlivých elementov i prípadné zmäknutie teplom ovplyvnených oblastí (HAZ),

A_{net} - oslabená prierezová plocha zohľadňujúca oslabenie nevyplnenými otvormi, lokálne vydúvanie jednotlivých elementov i prípadné zmäknutie teplom ovplyvnenej oblasti (HAZ).

Pre porušenie ohybom - rovinným vzperom:

$$N_{b,Rd} = \chi \eta k_1 k_2 A f_0 / \gamma_{M1} \quad (2.127)$$

kde:

χ - súčiniteľ vzperu pre príslušný smer vybočenia ($\chi \leq 1$),

η - tvarový súčiniteľ ($\eta = A_{\text{eff}}/A$),

k_1 - faktor zohľadňujúci nesymetriu prierezu,

k_2 - faktor zohľadňujúci teplom ovplyvnené oblasti.

Pre porušenie skrútením - priestorovým vzperom sa návrhová tlaková odolnosť určí podobne ako v predchádzajúcom prípade pre porušenie ohybom. Rozdielnu odolnosť má však súčiniteľ vzperu χ .

Odolnosť ohýbaných prútov - nosníkov

Nosníky sú obvykle namáhané ohybom a šmykom. V závislosti od podopretia, zaťaženia, prierezových rozmerov a rozpätia sú určité časti nosníka namáhané prevažne ohybom (stredové časti), alebo prevažne šmykom (podporové časti). Ostatné časti sú namáhané kombináciou ohybu a šmyku. Vo všeobecnosti pritom nie je jednoznačné, ktoré namáhanie je pre porušenie nosníka rozhodujúce. Preto je obvykle potrebné posúdiť odolnosť nosníka proti porušeniu ohybom, šmykom i ohybom aj šmykom.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Namáhanie ohybom

Nosníky namáhané prevažne ohybom musia spĺňať podmienku:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} \quad (2.128)$$

kde:

M_{Ed} - návrhový ohybový moment,

$M_{b,Rd}$ - návrhová ohybová odolnosť nosníka, pričom

$$M_{b,Rd} = M_{c,Rd} = f_0 \alpha W_{el} / \gamma_{M1}, \text{ pre prierezy neoslabené otvormi}$$

$$M_{b,Rd} = M_{a,Rd} = f_a \alpha W_{net} / \gamma_{M2}, \text{ pre prierezy oslabené otvormi,}$$

kde:

α - je tvarový faktor zohľadňujúci triedu prierezu i prípadne zvarovým teplom ovplyvnený materiál (W_{pl} alebo $W_{pl,haz}$, W_{eff} alebo $W_{eff,haz}$),

W_{net} - pružný prierezový modul prierezu oslabeného otvormi i prídavným zvarom.

Namáhanie šmykom

Nosníky namáhané prevažne šmykom musia spĺňať podmienku:

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} \quad (2.129)$$

kde:

V_{Ed} - návrhová priečna sila,

$V_{c,Rd}$ - návrhová šmyková odolnosť nosníka, pričom

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_V f_V / \gamma_{M1}, \text{ pre kompaktné prierezy a vystužené polia,}$$

$$V_{c,Rd} = \rho_V V_{pl,Rd} = \rho_V A_V f_V / \gamma_{M1}, \text{ pre štíhle prierezy a vystužené polia,}$$

kde:

A_V - plocha prierezu efektívne pôsobiaca na šmyk,

ρ_V - redukčný súčiniteľ zohľadňujúci vplyv vydúvania tenkej steny.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Namáhanie ohybom a šmykom

V prípade všeobecného namáhania nosníka ohybom a šmykom, je vplyv šmyku možné zanedbať, pokiaľ pôsobiaca priečna sila je vyjadrená:

$$V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd} \quad (2.130)$$

V opačnom prípade, ak táto podmienka nie je splnená, sa v časti prierezu ovplyvnenej šmykom uvažuje s redukovanou medzou klzu f_{0v} , pričom:

$$f_{0v} = 1,15 f_0 \{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2\} \quad (2.131)$$

Pomocou medzi klzu f_0 a redukovanej medze klzu f_{0v} sa určí redukovaná ohybová odolnosť nosníka $M_{c,Rd,V}$, ktorá zohľadňuje jej vplyv šmyku.

Klopenie nosníkov

S klopením netreba uvažovať, pokiaľ je nosník:

- dostatočne tuhý v krútení (uzavreté prierezy),
- ohýbaný v rovine menšej tuhosti, alebo ak je
- dostatočne postranne zabezpečený – podopretý.

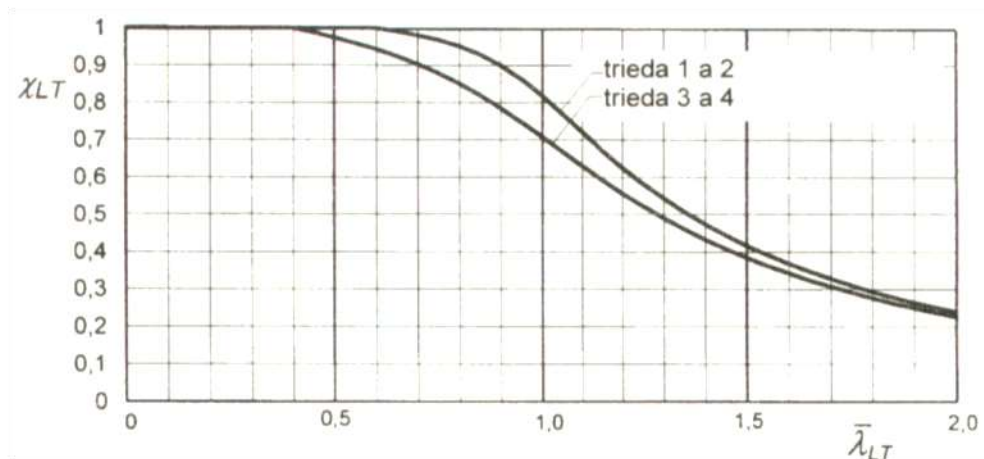
Z hľadiska klopenia musia nosníky spĺňať podmienku:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} = \chi_{LT} f_0 \alpha W_{el} / \gamma_{M1} \quad (2.132)$$

kde:

χ_{LT} - súčiniteľ vzperu pri vyklopení (pozri Obr. 2.62).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 2.62 Závislosti súčiniteľa vzperu χ_{LT} pri klopení od porovnávacej štíhlosti ohýbaných nosníkov $\bar{\lambda}_{LT}$ [60]

Výhody používania hliníka a hliníkových zliatin oproti používaniu konštrukčných ocelí spočívajú najmä v podstatne menšej hmotnosti a vysokej odolnosti proti korózii. Pri zabezpečení požadovanej pevnosti, spoľahlivosti a životnosti môžu tieto výhody ovplyvniť špecifické technické riešenia ako aj významné výrobné, dopravné, montážne a prevádzkové úspory, ktoré nakoniec prinášajú celkové ekonomické efekty.

3 Nitované spoje

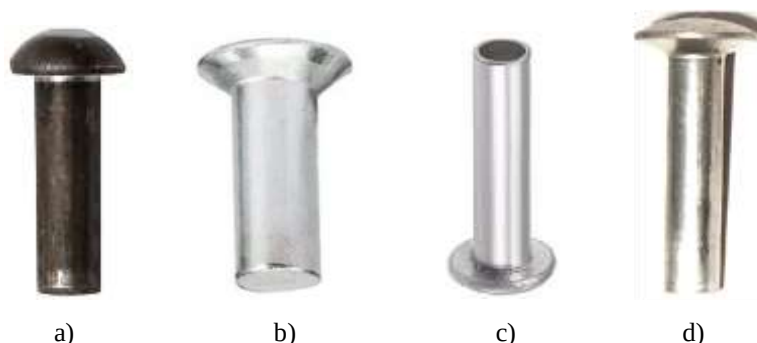
Nitované spojenie sa považuje za nerozoberateľné spojenie a teda je nevyhnutné, aby životnosť nitov bola rovnaká, ako životnosť celej nitovanej konštrukcie. Existujú však prípady z praxe, kedy si predĺženie životnosti konštrukcie vyžaduje výmenu nitov alebo nahradenie nitov v konštrukcii skrutkami.

Nity sú upevňovacie prvky, ktoré môžeme použiť na spojenie dvoch alebo viacerých vrstiev materiálov, ako sú železné aj neželezné materiály, plasty, drevo, koža a aj textílie. Pomocou nitov je možné spájať rôzne druhy materiálov o rozličných vlastnostiach. Sú považované za trvalé spojovacie prvky, ktoré sa používali v mnohých aplikáciách veľkého rozsahu, ako bola stavby lodí, kotlov, tlakových nádob, mostov, budov, atď. Aj napriek tomu, že v období po druhej svetovej vojne boli nitované spoje plošne nahradzované spojmi zváranými, lepenými a skrutkovými, sa v súčasnosti nitované spoje uplatňujú stále viac.

Nitované konštrukcie vyrábané vo výrobných halách vo väčších množstvách sú niekedy lacnejšie ako zvárané konštrukcie. Nitované konštrukcie sú pružnejšie a nespôsobujú zmeny v štruktúre spájaných materiálov. Nevýhodou nitovaných spojov je koncentrácia napätia v miestach, kde sú nity umiestnené a zložitejšie konštrukcie je potrebné vytvárať pomocou podporných prvkov, ako sú styčnikové plechy, spojovacie rebrá, spojovacie vzpery a pod. Nitované konštrukcie majú vo všeobecnosti vyššiu hmotnosť ako zvárané konštrukcie.

Podľa účelu použitia môžu byť nity vyrobené z tvárnych ocelí, hliníka, zliatin hliníka, medi, mosadze a iných materiálov. Rozmery, tvar a materiál nitov vo väčšine prípadov definuje norma. Na Obr. 3.1 sú zobrazené názorné príklady základných normalizovaných nitov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.1 Názorné príklady vybraných normalizovaných nitov

- *nity s polguľovou hlavou* - Obr. 3.1a) - sú základným typom nitu. Vyrábajú sa v bežnom prevedení (STN 02 2301) v rozsahu priemeru drieku 1 - 36 mm a presnom prevedení (STN 02 2302, STN 02 2304/a) v rozsahu 1,6 - 10 mm.
- *nity s plochou guľatou hlavou* - vyrábajú sa v bežnom (STN 02 2303) a presnom (STN 02 2304, STN 02 2304/a) prevedení. Používajú sa do drevených konštrukcií.
- *zápustné nity* - Obr. 3.1b) - používajú sa tam, kde by vystupujúca dosadacia hlava prekážala a je možné zoslabiť prierez spájanej súčiastky vytvorením zapustenia.

Základný tvar nitov určuje STN 02 2311. Existuje viacero variantov:

- *zápustné nity s veľkou hlavou* - používajú sa pre spájanie popruhov, remeňov, a materiálov s mäkkším povrchom (STN 02 2313),
- *zápustné nity so šošovkovitou hlavou s uhlom 100°* - STN 02 2317,
- *presné nity zápustné so šošovkovitou hlavou* - Obr. 3.1d) - STN 02 2320, STN 02 2320/a, STN 02 2320/b.
- *duté nity s plochou hlavou* - Obr. 3.1c) - používajú sa na pripevnenie spojkových a brzdových obložení. Vyrábajú sa ako bežné (STN 02 2330) v rozsahu priemeru drieku 1,4 - 8 mm a navítané (STN 02 2331).
- *rúrkové nity* - používajú sa na pripevnenie spojkových a brzdových obložení:
 - rúrkové nity tenkostenné valcové - STN 02 2380,
 - nity rúrkové s lisovanou hlavou - STN 02 2381,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- nity rúrkové s lemovanou hlavou - STN 02 2382.
- *nity s trňom* - nazývané aj trhacie (český normovaný názov) alebo slepé (blind - anglický názov). Základné vyhotovenie podľa STN EN ISO 14588, ďalšie podľa iných noriem.

Nity špecificky určené pre letecký priemysel:

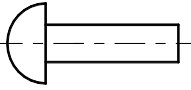
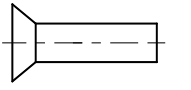
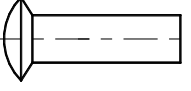
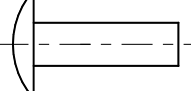
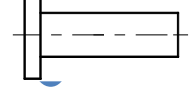
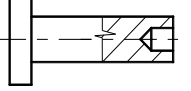
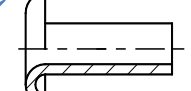
- plné nity s univerzálnou hlavou - vyrábajú sa z hliníka a zliatin hliníka podľa viacerých noriem (STN EN 214x), z nehrdzavejúcej ocele (STN EN 3135, STN EN 3136), zo zliatin niklu (STN EN 3141, STN EN 3142), titánu (STN EN 3644),
- plné nity so 100° normálnou zapustenou hlavou - z hliníka (STN EN 2551), titánu (STN EN 3643),
- plné nity so 100° normálnou zapustenou polguľovou hlavou zo zliatin hliníka podľa viacerých noriem (STN EN 255x),
- plné nity s normálnou vypuklou hlavou zapustenou pod uhlom 100° - z titánu (STN EN 3642).

Iné nity na špeciálne použitie ako sú:

- nity špecificky určené kozmický priemysel,
- nity so zápusťou hlavou s uhlom 100°, z nehrdzavejúcej ocele - STN EN 3139, STN EN 3140, aj vo vyhotovení s klenbovou hlavou (STN EN 3138),
- zaslepovacie nity so 100° zapustenou hlavou - vysokopevné (STN EN 6128),
- rozštiepené nity,
- rúrkové nity tenkostenné, kužeľovité,
- dvojdielne nity - otvorené aj uzavreté,
- výbušné nity - používajú sa pre nitovanie konštrukcií, ktoré sú dostupné len z jednej strany,
- špeciálne nity, ktoré plnia aj (alebo len) ozdobný účel sa používajú aj pri výrobe odevov, obuvi a iných doplnkov.

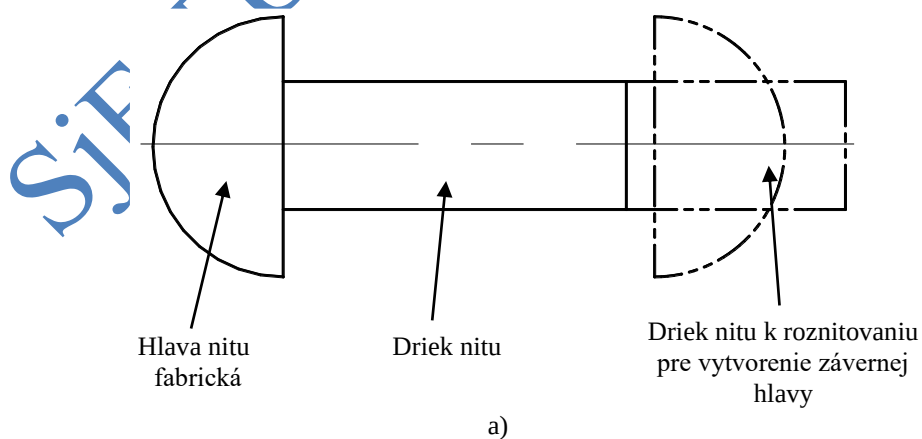
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tab. 3.1 Vybrané druhy nitov.

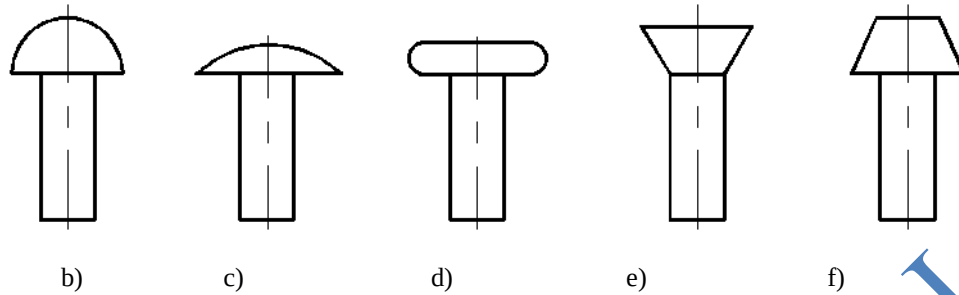
Názov	Zobrazenie	Názov	Zobrazenie
Nit s polguľovou hlavou		Zápustný nit	
Zápustný nit so šošovkovitou hlavou		Kotlový nit	
Presný nit s plochou polguľovou hlavou		Nit s plochou hlavou	
Navítaný nit s plochou hlavou		Rúrkový nit s lemovanou hlavou	

V minulosti boli nitovaním vyrábané kotly, lode a iné konštrukcie, pre ktoré sa používali kotlové a lodné nity a patrili tiež k normalizovaným nitom na Slovensku.

Hlavnými časťami nitu, zobrazené na Obr. 3.2a), sú hlava, ktorej tvar je už predvyrobený (preto sa táto hlava nazýva výrobná alebo fabrická, v niektorých zdrojoch sa označuje aj ako podporná), driek a zaverný driek (tail), ktorý je použitý na vytvorenie závernej časti (hlavy) nitu.



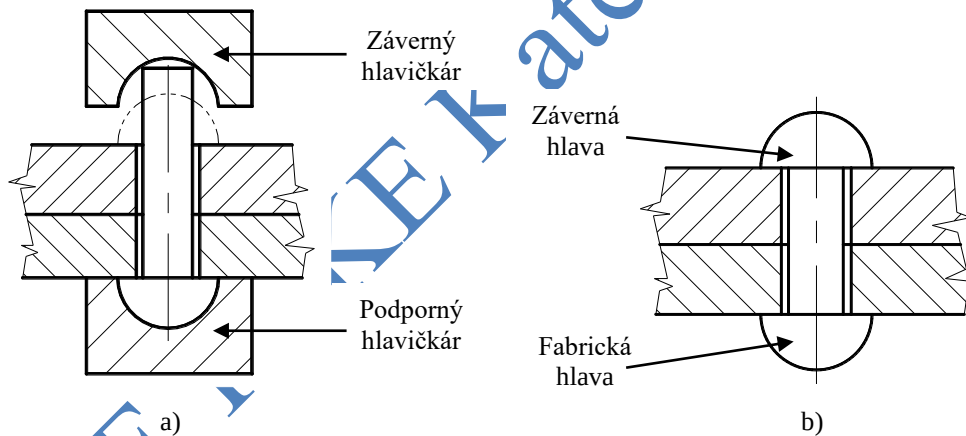
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.2 Hlavné časti nitu a tvary záverných hláv

(b - polguľová, c - vypuklá veľká, d - plochá, e - zápustná, f - kužeľová)

Podstatou nitovaného spoja je zovretie spojovaných súčiastok pomocou nitu. Montáž nitu a vytvorenie nitovaného spoja sa uskutoční pomocou závernej hlavy, ktorá sa dosiahne roznitovaním drieku nitu do požadovaného tvaru závernej hlavy - Obr. 3.2.



Obr. 3.3 Spojenie nitovaním

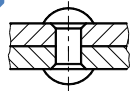
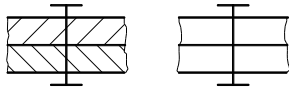
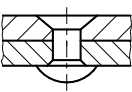
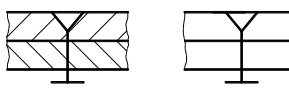
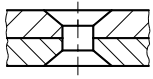
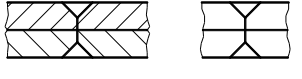
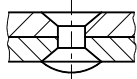
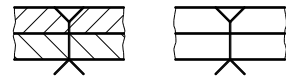
Proces nitovania (alebo výroby nitovaného spoja) zahŕňa vytvorenie celku minimálne z dvoch spojovaných súčiastok, vyrovnanie otvoru pre nit a následné vloženie nitu cez otvor s vyčnievajúcim hladkým koncom drieku - Obr. 3.3a). Pôsobením sily na vyčnievajúcu časť drieku nitu sa nit zdeformuje o približne 1,5-násobok svojho pôvodného priemeru, čo spôsobí vytvorenie novej tzv. závernej hlavy - Obr. 3.3b). Hotový nit je schopný prenášať strihové a ťahové namáhanie.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tvar závernej hlavy definuje tvar hlavičkára, ktorým je vytváraná. Na hlavičkár je možné pôsobiť kontinuálnou lisovacou silou pri strojnom nitovaní, alebo údermi ručným alebo pneumatickým kladivom pri ručnom nitovaní. Proces nitovania je možné realizovať za studena alebo za tepla. Nitovanie za studena sa realizuje do priemeru nitu $d < 10\text{mm}$ ručne, ak sa nituje strojne, je možné nitovať za studena aj väčšie priemery nitov. Pri nitovaní za tepla je nit predhriaty na teplotu vyššiu ako $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri strojnom nitovaní. Pri ručnom nitovaní je potrebné nit resp. jeho časť drieku predhriať na teplotu $1000\div 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Počas procesu nitovania za tepla nesmie teplota nitu poklesnúť pod teplotu $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nitovaním za tepla sa dosiahne väčšia zverná (uťahovacia) sila, ktorá sa vyvinie v dôsledku zmršťovania materiálu pri chladnutí nitu. Samotný nit je potom namáhaný v ťahu, pričom napätie v ťahu je približne rovnaké ako medza klzu materiálu nitu.

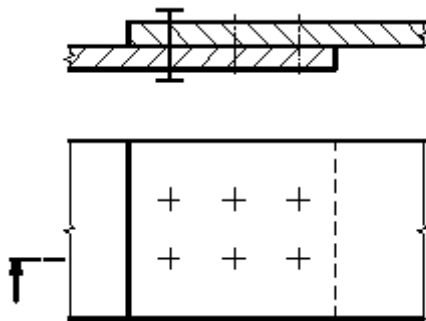
V technickej dokumentácii sa zvyčajne nity a nitované spoje zobrazujú zjednodušene. Na výkresoch kovových konštrukcií sa nity kreslia zjednodušene – hrubou súvislou čiarou Tab.3.2 podľa STN 01/3152 (*Technické výkresy. Zjednodušené zobrazovanie nerozoberateľných spojov*).

Tab. 3.2 Zjednodušené zobrazovanie nitovaných spojov

Spojenie	Zobrazenie	Označenie na výkresoch
nitom s polgulovou hlavou na oboch koncoch		
zápustným nitom so závernou hlavou polgulovou		
zápustným nitom so závernou hlavou zapustenou		
zápustným nitom so závernou hlavou šošovkovitou		

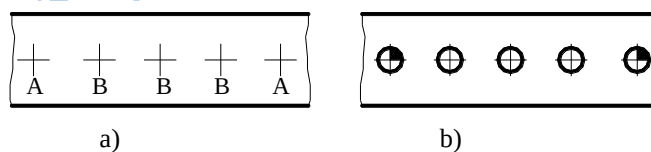
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Ak je v rade viac nitov, zjednodušene sa zobrazí len jeden nit a ostatné sa zobrazia tenkými súvislými čiarami. V pohľade, v smere osi nitov, sa nit označí krížikom tenkými súvislými čiarami - Obr. 3.4.



Obr. 3.4. Zjednodušené zobrazenie viacradového nitového spoja

Ak je na výkrese niekoľko rôznych druhov alebo veľkostí nitov, možno ich navzájom odlíšiť písmenami veľkej abecedy umiestnenými vedľa zjednodušeného zobrazenia - Obr. 3.5a) alebo grafickými značkami - Obr. 3.5b). Význam písmen alebo grafických značiek sa vysvetlí na výkrese v poznámke umiestnenej v blízkosti titulného bloku.



Obr. 3.5 Zjednodušené zobrazenie niekoľkých skupín nitov na výkrese

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

3.1 Rozdelenie nitovaných spojov

Rozdelenie nitovaných spojov nie je presne definované. Pre lepšie porozumenie procesu nitovania a návrhu nitovaných spojov bude použité základné rozdelenie nasledovne:

- a) podľa účelu použitia nitovaného spoja,
- b) podľa polohy spájaných materiálov,
- c) podľa usporiadania nitov.

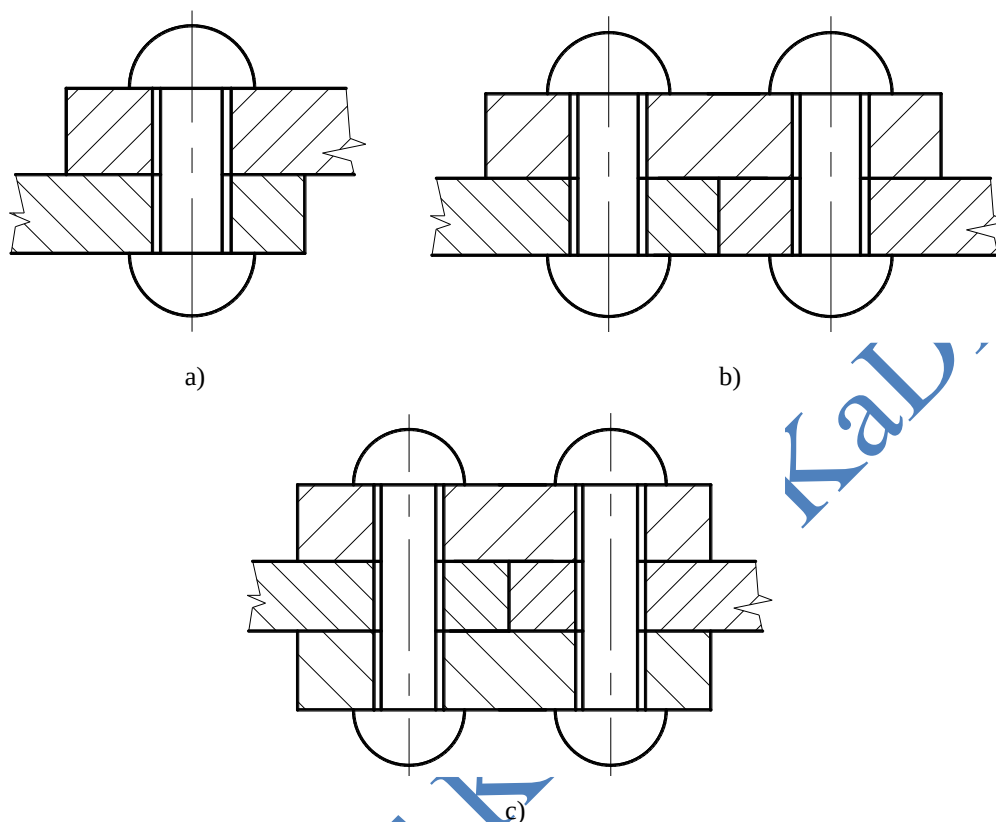
Rozdelenie nitovaných spojov **podľa účelu použitia**:

- *nitované spoje pevné (konštrukčné)*: v týchto spojoch je jediným kritériom pevnosť konštrukcie. Používajú sa v nosných konštrukciách, ako sú nosníky, priehradové nosníky a rámy strojov, a pod.
- *nitované spoje pevné a nepriepustné (kotlové)*: ide o spoje, používané pri výrobe tlakových parných kotlov a tlakových nádob, ktoré zaisťujú pevnosť a vysokú tesnosť.
- *nitované spoje nepriepustné (tesné)*: tieto spoje poskytujú pevnosť a zároveň sú nepriepustné voči nízkym tlakom. Do tejto skupiny patria spoje v nádržiach, kontajneroch, zásobníkoch a silách.

Rozdelenie nitovaných spojov **podľa polohy spájaných materiálov**:

- *preplátované nitové spoje* - Obr. 3.6a): sú spoje, kedy spájané materiály sú preložené cez seba, vzájomne zacentrované a spoločne znitované,
- *nitovaný spoj s jednou stykovou doskou* - Obr. 3.6b): spájané materiály sú k sebe priložené a na ich spojenie je použitá pomocná styková doska, ktorá je k spájaným materiálom pripevnená pomocou nitov.
- *nitovaný spoj s dvoma stykovými doskami* - Obr. 3.6c): spájané materiály sú k sebe priložené a z oboch strán spájaných materiálov je použitá styková doska, ktorá je vzájomne so spájanými materiálmi spojená pomocou nitov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

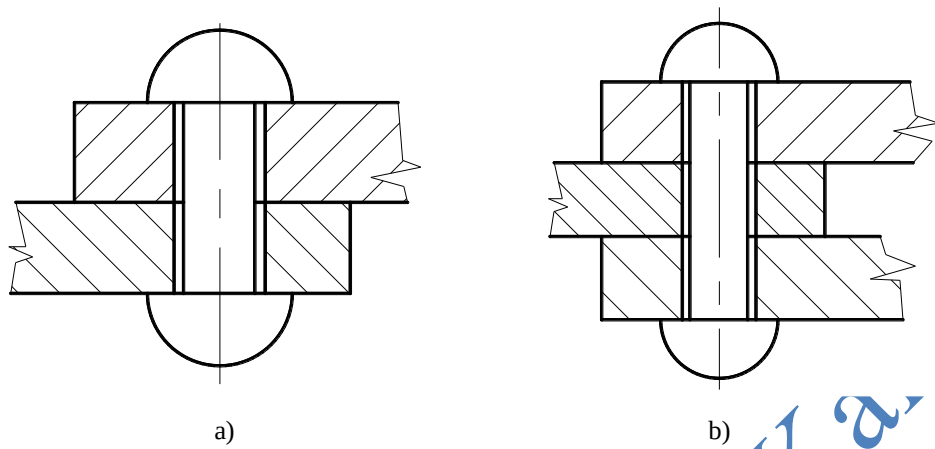


Obr. 3.6 Spôsoby nitovaného spojenia podľa vzájomnej polohy spojovaných častí

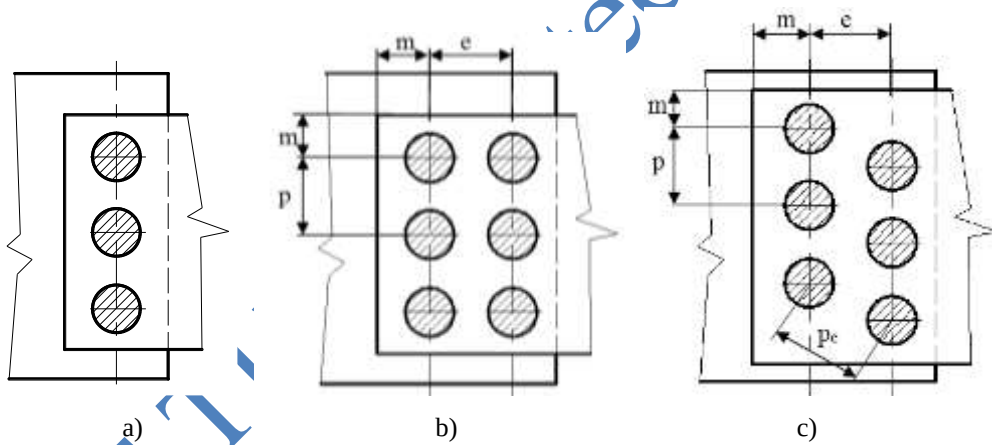
Rozdelenie nitovaných spojov podľa usporiadania nitov:

- *jednostrižné nity* - Obr. 3.7a),
- *dvojestrižné nity* - Obr. 3.7b),
- *jednoradové nitované spoje* - Obr. 3.8a),
- *dvojradowé nitované spoje reťazové* - Obr. 3.8b),
striedavé (cik cak) - Obr. 3.8c),
- *viacradové nitované spoje reťazové* - Obr. 3.8d),
striedavé (cik cak) - Obr. 3.8e),
- *skupinové nitované spoje* (diamantový tvar usporiadania nitov) - Obr. 3.8f).

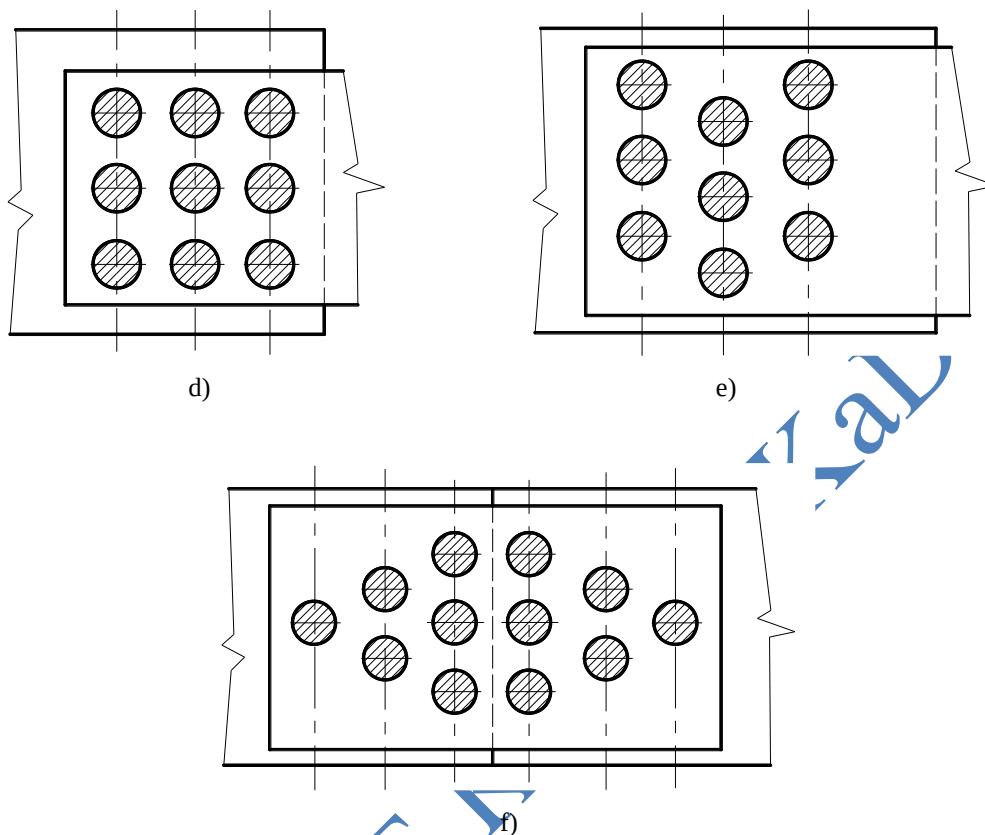
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.7 Jednostrižný a dvojstrižný nitovaný spoj



Konštruovanie nerozoberateľných spojov

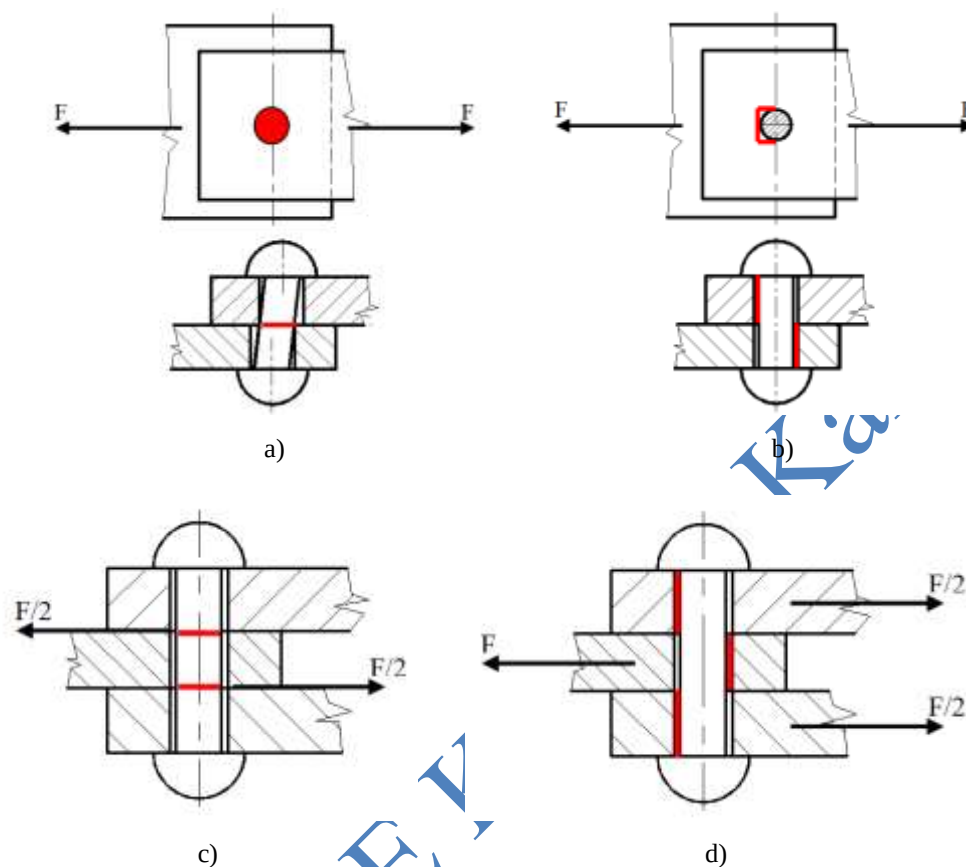


Obr. 3.8. Jednoradový a viacradový nitovaný spoj

3.2 Konštruovanie nitovaných spojov

Namáhanie nitovaného spoja môže byť niekoľkými spôsobmi. Každý jeden zo spôsobov namáhania môže spôsobiť okamžitú poruchu nitovaného spoja. Všeobecná kontrola nitovaného spoja pozostáva z troch pevnostných kontrol časti nitovaného spoja, konkrétne z pevnostnej kontroly nitu na strih - Obr. 3.9a),c), pevnostnej kontroly nitovaného materiálu na porušenie ťahom - Obr. 3.10b),c) a pevnostnej kontroly na otláčenie v mieste kontaktu medzi materiálom a nitom - Obr. 3.9b),d).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.9 Miesta pevnostnej kontroly nitovaného spoja

Porucha nitovaného spoja môže nastať v dôsledku pretrhnutia materiálu v rovine nitov. Finálny konštrukčný návrh nitovaného spoja by mal zahŕňať kontrolu spájaného materiálu pred pretrhnutím a kontrolu nitu.

Kontrola napätia v nite pozostáva z pevnostnej kontroly nitu na strih a na otláčenie.

1. V prípade kontroly jednostrizného nitu **na strih** platí:

$$\tau = \frac{F}{n\pi \frac{d^2}{4}} = \frac{4F}{n\pi d^2} \leq \tau_{Ds} \quad (3.1)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pre dvojstrižný nit platí:

$$\tau = \frac{F/2}{n \cdot \pi \frac{d^2}{4}} = \frac{2F}{n\pi d^2} \leq \tau_{Ds} \quad (3.2)$$

kde:

τ - napätie v strihu,

d - priemer nitu,

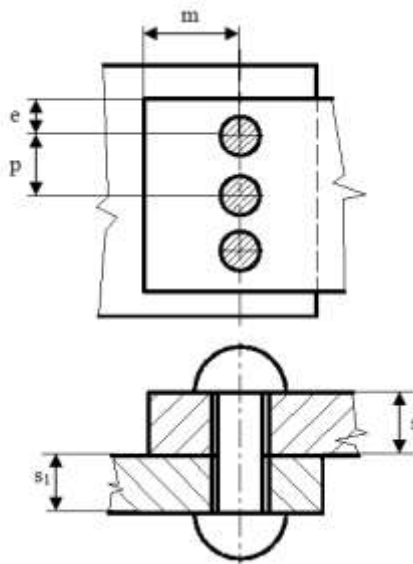
F – sila kolmá na os nitu,

n - počet nitov.

2. Kontrola nitovaného spoja na otláčenie:

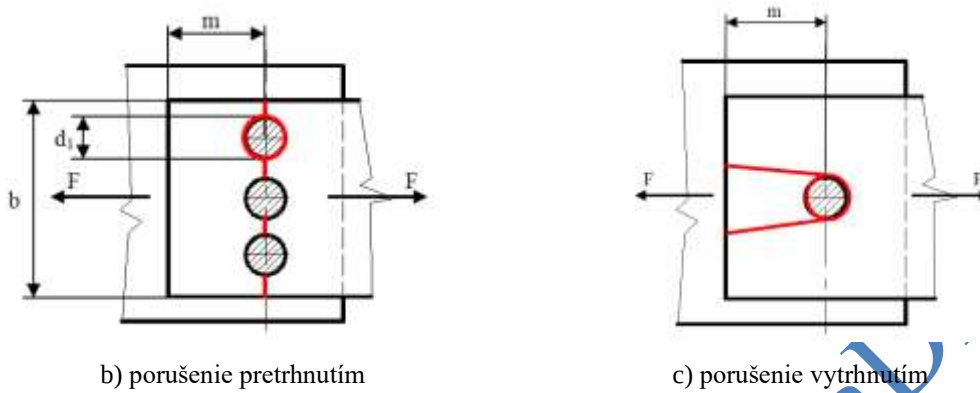
$$p = \frac{F}{n \cdot d \cdot s} \leq p_D \quad (3.3)$$

Kontrola napätia v spájanom materiáli (Obr. 3.10b),c), pozostáva z kontroly proti pretrhnutiu a kontroly proti vytrhnutiu.



a) hlavné rozmery nitovaného spoja

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.10 Hlavné rozmery nitovaného spoja a spôsoby jeho porušenia

Porušenie pretrhnutím spájaných materiálov v dôsledku pôsobenia sily sa definuje:

$$\sigma_t = \frac{F}{[s \cdot (b - n_r \cdot d_1)]} \leq \sigma_{Dt} \quad (3.4)$$

kde:

σ_t – napätie v ťahu v nitovanom materiáli,

d_1 – priemer otvoru pre nit v nitovanom materiáli,

s – hrúbka spájaného materiálu, kontroluje sa tenší zo spájaných materiálov,

b – šírka nitovaných materiálov,

m – rozmer podľa Obr. 3.10a), odporúčaný rozmer $m = 1,5 \cdot d$,

n_r – počet otvorov pre nity.

Porušenie v dôsledku vytrhnutia podľa Obr. 3.10c) je definované:

$$\tau_v = \frac{F}{2 \cdot m \cdot s} \leq \tau_{Ds} \quad (3.5)$$

Pre nitované spoje používané vo vyhradených technických zariadeniach ako konštrukcie mostov, tlakové nádoby a pod., sú príslušné dovolené napätia uvedené v normách pre vyhradené technické zariadenia.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pre nity používané v bežnom strojárstve sú dostupné hodnoty v príručkách a tabuľkách pre bežné napäťové stavy. Pre niektoré typy oceľových konštrukcií pre ručné realizované nitovanie je možné dosadiť za dovolené napätie nasledovné hodnoty vzťahované k medze klzu: dovolené napätie v ťahu (40 % z R_e), dovolené napätie v strihu (36 % z R_e), dovolené napätie na otláčenie (80 % z R_e).

Strojnícke tabuľky a technické tabuľky obsahujú dovolené hodnoty pre oceľové nity. Pre nity z tvárnej ocele sa ku kontrole napätí v prípade prvého priblíženia používajú nasledovné hodnoty: dovolené napätie v ťahu (75 MPa), dovolené napätie v strihu (60 MPa), a dovolené napätie na otláčenie (130 MPa).

Pri voľbe nitov je vo všeobecnosti snahou navrhnúť ich správnu veľkosť tak, aby nedošlo k porušeniu nitu ani nitovaného spoja. Z rozmerov nitu je dôležité správne určiť jeho dĺžku a priemer. Stanovenie rozmerov nitu vychádza z hrúbky spájaných materiálov, konkrétne z najväčšej hrúbky materiálu. Minimálny priemer nitu d_{min} bude definovaný ako 3-násobok maximálnej hrúbky spájaných materiálov s_{max} .

$$d_{min} = 3 \cdot s_{max} \quad (3.6)$$

Podľa minimálneho priemeru nitu sa zvolí najbližší normalizovaný priemer nitu. Dĺžka drieku nitu musí byť dostatočná, aby na jej konci bolo možné vyhotoviť plnohodnotnú závernú hlavu, ale dĺžka drieku nitu nesmie byť príliš dlhá, aby nedošlo k deformácií prídavným ohybom drieku nitu v spájaných materiáloch. Pre stanovenie dĺžky drieku nitu existuje niekoľko metódik stanovených na základe praktických skúseností, ktoré budú postupne uvedené. Pre všeobecné prevedenie nitového spoja je odporúčaná dĺžka drieku nitu L určená na základe nasledovnej rovnice:

$$L = s + d \cdot c \quad (3.7)$$

kde:

d – normalizovaný priemer nitu,

s – celková hrúbka spájaných materiálov,

c – objemová a tvarová konštanta pre vytvorenie závernej hlavy nitu, ktorá je nasledovná:

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pre polguľovú závernú hlavu vo všeobecnej nitovanej konštrukcii:

- $c = 1,5$ ak $d \leq 20$ mm
- $c = 1,6$ ak $d > 20$ mm

Pre polguľovú závernú hlavu v tlakovej a kotlovej konštrukcii:

- $c = 1,7$ ak $d \leq 20$ mm
- $c = 1,8$ ak $d > 20$ mm

Pre zapustnú uzatváraciu závernú hlavu pre odľahčené použitie:

- $c = 0,5$ pre všetky d .

Výsledná dĺžka drieku nitu sa zaokrúhli na najbližšiu normalizovanú hodnotu.

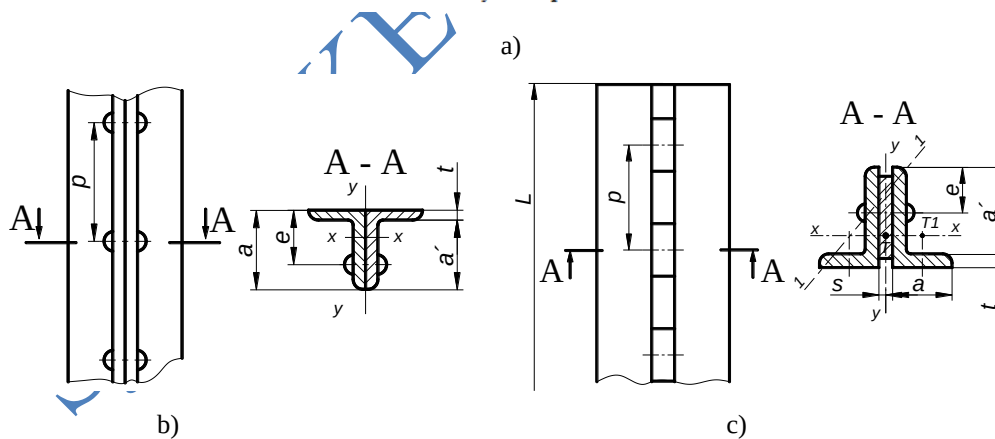
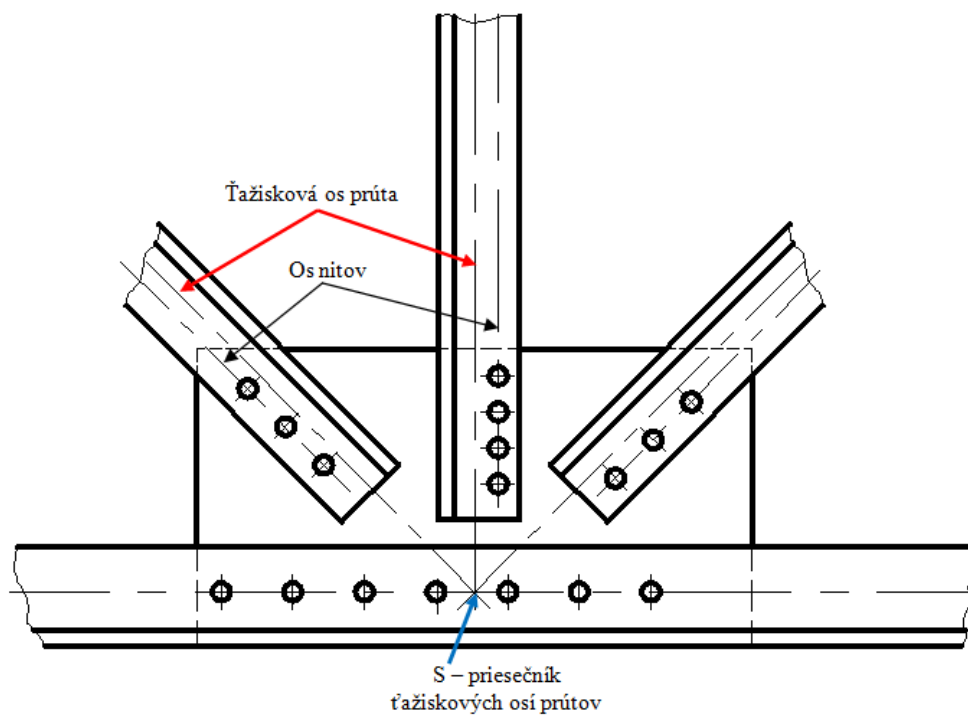
3.2.1 Navrhovanie nitov pre konštrukčné nitovanie

Pri návrhu priemeru nitov pre pevné nitované spoje sa vychádza z predpokladu, že driek nitov bude prenášať vonkajšie zaťaženie a nity budú namáhané na strih a otláčenie. Pre prvotný návrh je možné stanoviť priemer nitu z hrúbky hrubšieho zo spájaných materiálov ako $1,2 \cdot \sqrt{s_{max}} \div 1,4 \cdot \sqrt{s_{max}}$. Priemer otvoru pre nit v materiáli musí byť pri nitovaní za tepla o 1,5 mm väčší, aby zohriaty nit bolo možné vložiť do otvoru v materiáli. V prípade nitovania za studena sa otvory pre nity navráťujú - vystružia a navrhujú sa s vôľou v k priemeru nitu $d_1 = d + v$. Vôľa pre nit pre studené nitovanie je maximálne $0,3 \div 0,5$ mm v závislosti od priemeru nitu, pre väčšie priemery nitu d , sa odporúča väčšia vôľa v .

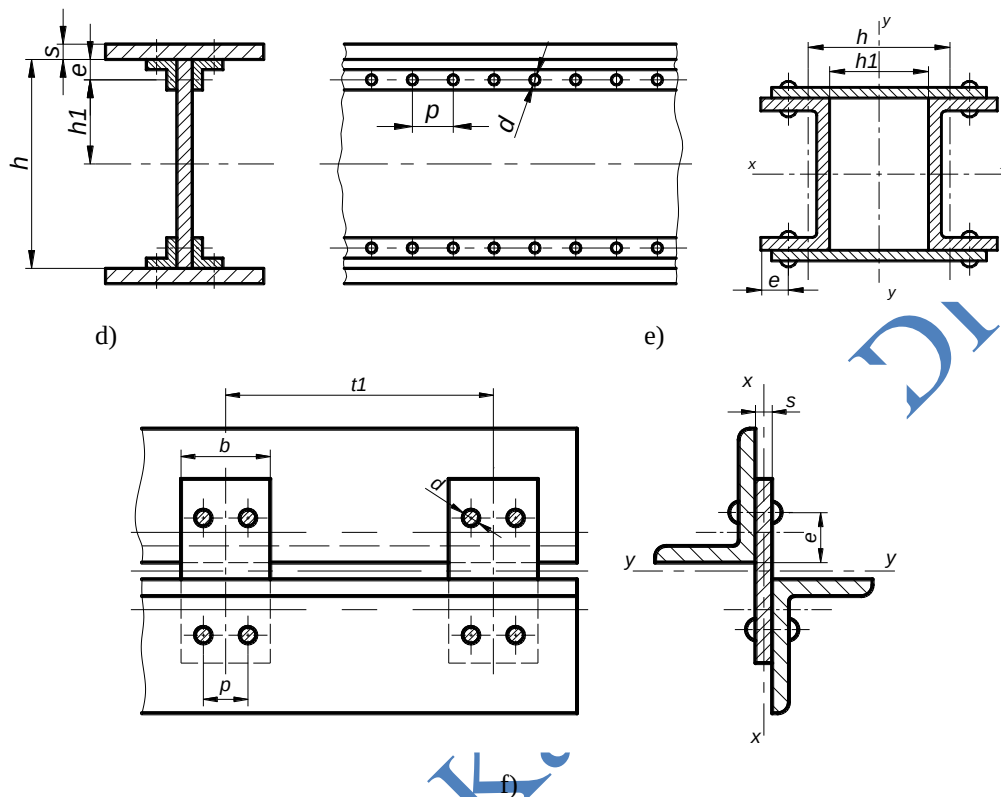
Umiestnenie nitov m a rozstup nitov p - Obr. 3.10a) nesmie byť príliš blízko okraja materiálu, odporúča sa aby $m > 1,5 \cdot d$ a $p > 3 \cdot d$. V prípade dvojstrižných nitov sa odporúča, aby sa priemer nitu určil na základe hrubšieho zo spojovaných materiálov $d = 1,5 \cdot s$, (zároveň musí platiť podmienka pre hrubší materiál $s > s_1$ a $s < 2 \cdot s_1$) a umiestnenie od okraja spájaných materiálov $m_{min} = 2 \cdot d$. V prípade nitovania profilov prúťových konštrukcií - Obr. 3.11a) namáhaných na ťah alebo tlak vyhotovených z profilov L, T, U, I - Obr. 3.11b),c) sa odporúča voliť priemer nitu podľa podmienok $d \leq a'/3$ a pre profily väčších rozmerov podľa podmienok $d \leq a'/4$, ak $a' = a - t$, (a - rozmer podľa Obr. 3.11b), t - hrúbka profilu).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Rozostup nitov sa definuje spravidla ako $p = 4.d$ resp. v rozmedzí $p = 3.d \div 6.d$. Rozmiestnenie nitov musí umožniť vyhotoviť závernú hlavu.



Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.11 Nitované konštrukcie a nitované nosníky

Ak je šírka ramien L profilu $a > 4 \cdot d$, nity sa umiestňujú v striedavých radoch. Prúty z profilu L je možné vyhotoviť bez medzery - Obr. 3.11b) a potom rozstup nitov $p = (8 \div 10) \cdot d$, alebo s medzerou (vločkou) - Obr. 3.11c) a potom rozstup nitov $p = (25 \div 30) \cdot d$, ak bude prút namáhaný na ťah. V prípade namáhania prútu na tlak bude rozstup $p \leq 30 \cdot i_1$, kde i_1 je minimálny polomer zotrvačnosti k osi 1-1 podľa Obr. 3.11c). V prípade prútových konštrukcií je nevyhnutné rozoznávať dva dôležité pojmy. Prvým pojmom je *os nitov* – jedná sa o spojnicu osí nitov. Druhým pojmom je *ťažisková os profilu*, ktorá prechádza ťažiskom profilu prúta a v ťažiskovej osi je koncentrovaná osová sila, ktorú prút prenáša - Obr. 3.11a). V styčníkoch prútových konštrukcií sa musia ťažiskové osi pretínať v spoločnom bode S, ako je zobrazené na Obr. 3.11a). Ak ťažiskové osi nebudú mať spoločný priesečník v styčníku, dôjde k dodatočnému ohybovému namáhaniu prútov, ktoré je nežiadúcim efektom.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pri navrhovaní nitov nosných konštrukcií, ktoré sa vyhotovujú ako nitovaný nosník alebo stĺp, vytvorený spájaním plechov a valcovaných profilov T, L, U - Obr. 3.11d),e),f), sa odporúča priemer nitov d pri pevnom (konštrukčnom) nitovaní voliť v závislosti od najmensej hrúbky spájaných častí s , pričom platí:

- $d = 2s$ pre hrúbky plechu $s < 12$ mm,
- $d = s + 10$ pre hrúbky plechu $s > 12$ mm.

V prípade dvojstrižných nitov sa odporúča voliť priemer nitu $d = 1,5 \cdot s$. Vypočítané priemery nitov sa zaokrúhľia a vyberie sa najbližší normalizovaný priemer nitu.

Hrúbka nitovaných spojov vyhotovených s nitmi s polguľovitou hlavou by nemala presiahnuť 4-násobok priemeru nitu a v prípade nitov so zápustnou hlavou by nemala presiahnuť hrúbku 6,5-násobku priemeru nitu. V prípade nedodržania týchto podmienok vzniká riziko ohybu drieku nitu po jeho zaťažení.

Optimálna dĺžka nitu s polguľovitou hlavou použitého na konštrukčné nitovanie by mala byť $L = 1,25 \cdot s + (0,9 \div 1,0) \cdot d$, a zaokrúhlená na najbližšiu normalizovanú hodnotu.

Počet nitov použitých na vytvorenie konštrukčného nitového spojenia sa stanoví na základe pevnostných podmienok namáhania nitu v strihu a v otláčení.

Pevnostná podmienka v strihu v prípade jednostrážného nitu je definovaná:

$$\tau = \frac{F}{n\pi \frac{d^2}{4}} = \frac{4F}{n\pi d^2} \leq \tau_{Ds} \quad (3.8)$$

Počet nitov z pevnostnej podmienky v strihu bude:

$$n \geq \frac{4F}{\tau_{Ds}\pi d^2} \quad (3.9)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pevnostná podmienka na otláčenie v prípade jednostrizného nitovaného spoja je definovaná:

$$p = \frac{F}{n \cdot d \cdot s} \leq p_D \quad (3.10)$$

Počet nitov z pevnostnej podmienky v otláčení bude:

$$n \geq \frac{F}{p_D \cdot d \cdot s_{min}} \quad (3.11)$$

kde:

τ_{Ds} - dovoľené namáhanie v strihu,

- pre statické namáhanie (60÷80 MPa),
- pre dynamické namáhanie (40÷60 MPa),

p_D - dovoľené namáhanie na otláčenie,

- pre statické namáhanie (120÷150 MPa),
- pre dynamické namáhanie (80÷100 MPa),

s_{min} - menšia z hrúbok spájaných materiálov,

d - priemer nitu,

F - zaťažujúca sila,

n - počet nitov.

Z oboch vypočítaných pevnostných podmienok sa za smerodajný (navrhovaný) počet nitov bude považovať ten počet nitov, ktorý bude vyšší.

V prípade dvojstrižných nitov sa postupuje obdobným spôsobom, s použitím vzťahov (3.8 ÷ 3.11).

Finálny konštrukčný návrh pevného nitovaného spoja by mal zahŕňať aj kontrolu materiálu pred pretrhnutím v ťahu a kontrolu materiálu pred vytrhnutím.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

3.2.2 Navrhovanie nitov pre kotlové nitovanie

Nitované spoje, u ktorých sa požaduje nepriepustnosť a pevnosť, sa vyrábajú tzv. *kotlovým nitovaním* a zvyčajne sa používajú na výrobu tlakových nádob, nádrží, síl, zásobníkov, kotlov a lodí. Pri kotlovom nitovaní sa preplátované materiály k sebe pritláčajú osovou silou v nite F_o . Osová sila v nite vyvinie medzi spájanými materiálmi treciu silu F_T pre zabezpečenie tesnosti a pevnosti tak, aby platilo, že trecia sila je väčšia ako prenášaná sila v spoji $F_T > F$ - Obr. 3.12a). Potrebnú osovú silu v nite je možné vyvinúť pri nitovaní za tepla. Nit sa predhreje na nitovaciu teplotu, vytvorí sa nitovaný spoj a pri chladnutí nitu dochádza k zmršťovaniu jeho dĺžky. Zmršťovanie dĺžky drieku vyvodí osovú silu v nite, ktorú je možné definovať z ťahového napätia nasledovne:

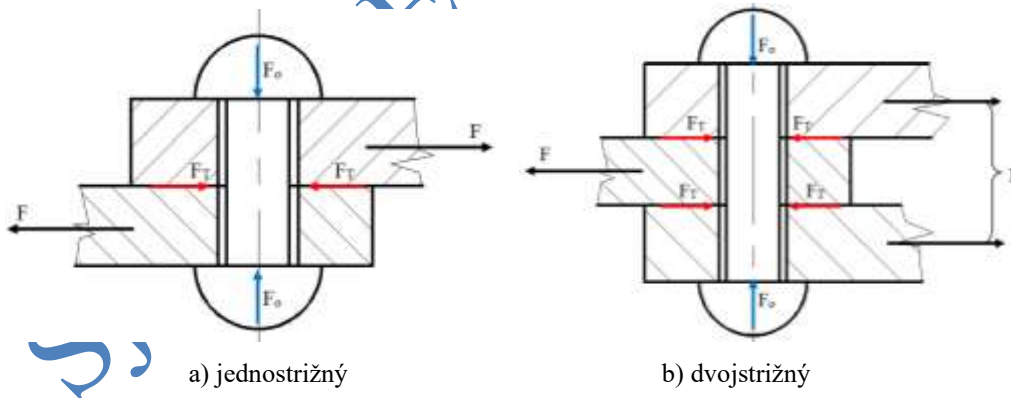
$$F_o = \sigma_{tn} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.12)$$

kde:

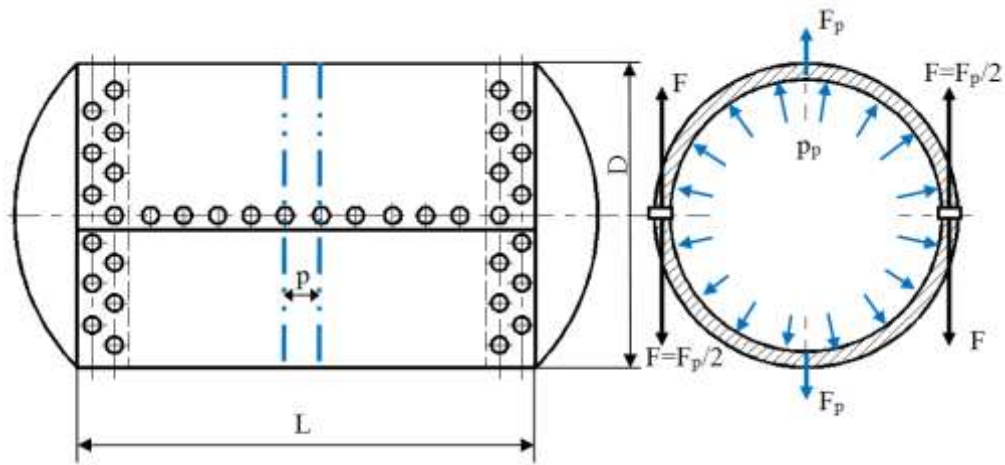
F_o – osová sila v nite,

d – priemer nitu,

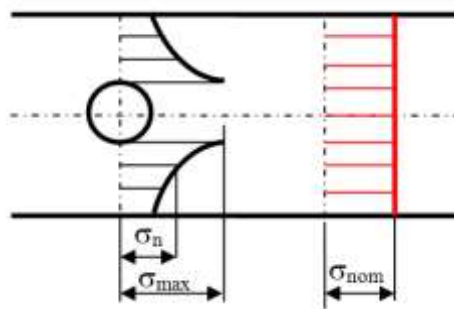
σ_{tn} – ťahové napätie v nite, po správnom nitovaní (170÷200 MPa).



Konštruovanie nerozoberateľných spojov



c) nitovaný kotol



d) vplyv otvoru pre nit na rozloženie napätia v nitovanom materiáli

Obr. 3.12. Kotlové nitovanie

Prenos sily v kotlovom nitovanom spoji s dvojstrižným nitom - Obr. 3.12b) je účinnejší, lebo nit je dlhší a pri zmrštení sa vyvolá väčšia osová sila, nit je zároveň súmernejšie namáhaný zaťažujúcou silou.

Pri použití kotlového nitovania sa vychádza z podmienky, že zaťaženie musí byť prenášané trením medzi spojovanými plechmi - Obr. 3.12c) a táto podmienka je definovaná nasledovne:

$$F_T = i \cdot F_o \cdot f \geq F = p_p \cdot D \cdot L \quad (3.13)$$

$$F_T = i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sigma_{tn} \cdot f \geq F \quad (3.14)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Ťahové napätie v nite sa stanoví nasledovne:

$$\sigma_{tn} \geq \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2 \cdot i \cdot f} = \frac{4 \cdot p_p \cdot D \cdot L}{\pi \cdot d^2 \cdot i \cdot f} \quad (3.15)$$

Ak napätie v nite nebude dosahovať potrebnú odporúčanú hodnotu (170÷200MPa), je nutné urobiť úpravu počtu nitov i , alebo úpravu veľkosti priemeru nitov d . Vhodné je stanoviť jednotkové zaťaženia nitu pri namáhaní na strih podľa vzorca nižšie, a porovnať ho s dovolenou hodnotou $\sigma_{Dn} = (76 \div 90)$ MPa.

$$\sigma_{tn} \cdot f = \sigma_n = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2 \cdot i} \leq \sigma_{Dn} \quad (3.16)$$

Materiál, z ktorého je vyhotovený nitovaný kotlový spoj, je namáhaný na ťah a musí byť skontrolovaný na pretrhnutie. Podľa Obr. 3.12c) sa kontrola na pretrhnutie vykoná na kruhovom segmente kotla o šírke rozstupu nitov p (modré čiary). Segment kotla je oslabený o otvor pre nit s veľkosťou d .

Pevnostná kontrola na pretrhnutie materiálu o hrúbke s sa vykoná podľa nasledovnej rovnice:

$$\sigma_{tp} = \frac{\alpha_\sigma \cdot F_i}{(p - d) \cdot s} = \frac{\alpha_\sigma \cdot p_p \cdot D \cdot p}{(p - d) \cdot s} \leq \sigma_{Dt} = \frac{R_m}{k_r} \text{ resp. } \frac{R_m}{k_s} \quad (3.17)$$

kde:

f - súčiniteľ trenia medzi preplátovanými plechmi, zvyčajne $f = 0,45$,

D - priemer tlakovej nádoby,

L - dĺžka tlakovej nádoby,

p_p - tlak v tlakovej nádobe,

α_σ - tvarový súčiniteľ koncentrácie napätia na okraji otvoru nitu,

$\alpha_\sigma = \sigma_{\max} / \sigma_n = (2,4 \div 2,7)$ - Obr. 3.12d),

σ_{Dt} - dovolená hodnota materiálu,

k_r - bezpečnosť pri ručnom nitovaní, $k_r = 4,75$ preplátovaný, $k_r = 4,25$ s dvoma stykovými doskami,

k_s - bezpečnosť pri strojnom nitovaní, $k_s = 4,5$ preplátovaný, $k_s = 4,0$ s dvoma stykovými doskami,

p - rozstup nitov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Hrúbka materiálov s použitých na konštrukciu kotla sa určí podľa vzorca (3.18) a k hrúbke materiálu sa pripočítava tzv. *súčiniteľ oslabenia vplyvom korózie*, ktorého hodnota je $(1 \div 2)$ mm.

$$s = \frac{D \cdot p_p}{2\varphi \cdot \sigma_{Dt}} + (1 \div 2); \quad \text{kde: } \varphi = \frac{p - d}{p} \quad (3.18)$$

V prípade nepriepustných nitovaných spojov existuje niekoľko praktických odporúčaní. Utesnenie nitovaného spoja je jednoduchšie realizovateľné s použitím menších rozstupov a s menšími priermi nitov. Je tiež požadované, aby okraj preplátovaného plechu bol maximálne $m = 1,5 \cdot d$. Praktickou sa javí aj voľba priemeru nitu podľa podmienky $d = 6\sqrt{s}$, pre hrúbku plechu väčšiu ako 8 mm a následný výpočet potrebného počtu nitov.

Pri tepelnom nitovaní musí byť vytvorený dostatočný priestor pre nástroj tvoriaci závernú hlavu nitu. Z tohto dôvodu sa odporúča, aby rozstup medzi nitmi bol podľa podmienky $p \geq 3 \cdot d$.

Ak sú nitované spoje vyhotovené priebežne, ako je to v prípade tlakových nádob, kotlov a pod., tzn. nitovanie je po obvode, je výhodné stanoviť namáhanie na jednotku dĺžky vzťahujúcu sa na rozstup nitov. Stanoví sa veľkosť sily F_1 na segment kotla o šírke 1mm podľa vzorca:

$$F_1 = p_p \cdot D \cdot 1 \quad (3.19)$$

Podľa veľkosti sily F_1 sa následne z Tab. 3.3 zvolí priemer nitu, rozstup nitu, vzdialenosť radov nitov a ďalšie parametre nitovaného kotlového spoja.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Tab. 3.3 Konštrukčné údaje kotlového nitovaného spoja

Druh nitovania	Preplatovaný nitovaný spoj, striedavé rady nitov			S dvoma stykovými doskami, striedavé rady nitov		
	jednoradový	dvojradowý	trojradowý	jednoradový	dvojradowý	trojradowý
F_1 [N/mm]	do 500	390÷950	700÷1350	350÷850	650÷1350	1100÷2400
i_p	1	2	3	1	2	3
d [mm]	$s+8$	$s+8$	$s+8$	$s+7$	$s+6$	$s+5$
p [mm]	$2d+8$	$2,6d+15$	$3,6d+22$	$2,6d+10$	$3,5d+15$	$3d+10$
ϕ	0,58	0,69	0,74	0,68	0,76	0,81
m [mm]	$1,5d$	$1,5d$	$1,5d$	$1,5d$	$1,5d$	$1,5d$
e [mm]	-	$0,6p$	$0,5p$	-	$0,5p$	$0,6p$

Vysvetlivky:
 F_1 – sila prepočítaná na šírku 1 mm segmentu kotla,
 i_p – počet nitov na rozstup,
 d – priemer nitu,
 p – rozstup nitov v rade,
 ϕ – rozmerová konštanta vzorec 3.18,
 m – vzdialenosť radu nitov od okraja materiálu - Obr. 3.8b)c),
 e – vzdialenosť medzi radmi nitov.

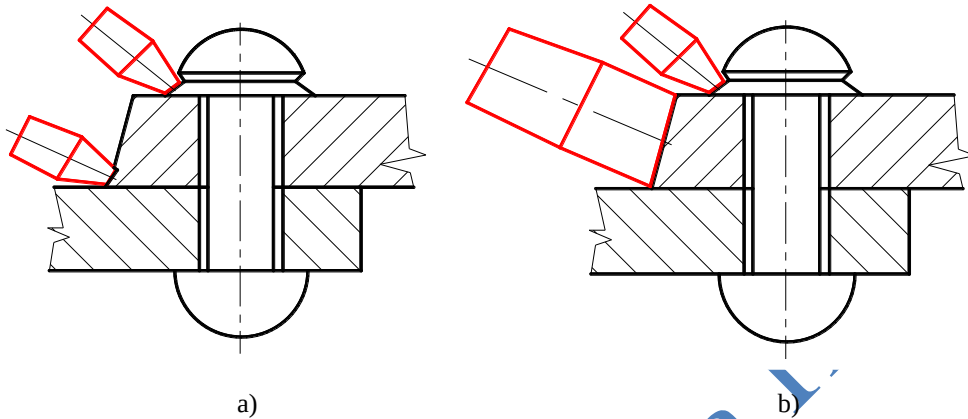
V prípade výroby nepriepustných nádrží, sil a zásobníkov nitovanými spojmi, ktoré nebudú namáhané veľkým pretlakom, je možné použiť nitovanie za studena, a nevyžaduje sa dosiahnutie trecej sily medzi spájanými materiálmi. Spájané materiály sú k sebe pripájané preplatovaním a medzi materiálmi môže byť umiestnené tesnenie.

Tesnosť nitovaného spoja je možné zvýšiť pomocou spevňovania a utesňovania (z angl. caulking a fullering, resp. z češt. temování, tužení) nitovaných materiálov a hláv nitov.

Pri spevňovaní dochádza k zaklepávaniu hlavy nitu - Obr. 3.13a) pomocou nástroja, ktorého hrúbka je cca 5mm. Tým istým nástrojom na spevňovanie hláv nitov je možné spevňovať aj spájané materiály s cieľom zvyšovať tesnosť spojovaných materiálov - Obr. 3.13a). V prípade utesňovania nitovaného spoja sa teda okraje spájaných materiálov zaklepávajú spevňovacím nástrojom - Obr. 3.13a) alebo utesňovacím nástrojom - Obr. 3.13b). Utesňovací nástroj má tvar tupého sekáča. Utesňovanie otvoru je možné utesňovacou operáciou po okraji hlavy nitu. Hrúbka utesňovacieho nástroja je približne rovnaká ako hrúbka utesňovaného materiálu. Na

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

uľahčenie týchto operácií sú okraje dosiek pred ich spojením zvyčajne opracované do uhla asi 80°. Tento uhol sa po procese zhutňovania zväčší na približne 85°.



Obr. 3.13 Spevňovanie a utesňovanie nitovaných spojov

3.3 Účinnosť nitovaných spojov

Otvory pre nity narušujú celistvosť materiálu, ktorým sa má prenášať zaťaženie. Pri vyhotovení nitovaného spoja, nity nenahrádzajú plnohodnotne materiál, ktorý bol v podobe otvorov pre nity odobratý. Ideálny stav, kedy je zaťaženie v ťahu materiálu rovnaké ako zaťaženie od rôznych spôsobov namáhania sa v nitovanom spoji nedosiahne, aj keď sú priemery otvorov pre nity a priemery nitov normalizované - Obr. 3.12d). Účinnosť nitovaného spoja vyjadruje schopnosť nitov prenášať požadované zaťaženia v porovnaní so zaťažením v ťahu materiálu bez otvorov pre nity a je ho možné jednoducho vyjadriť nasledovným vzťahom:

$$\eta = \frac{\text{maximálne zaťaženie prenášané nitovým spojom}}{\text{zaťaženie v ťahu prenášané materiálom bez otvorov pre nity}} \quad (3.20)$$

Zaťaženie v ťahu prenášané materiálom bez otvorov pre nity je možné vyjadriť ako jednotkové zaťaženie F_i na rozstupe p pre materiál hrúbky s a dá sa definovať:

$$F_i = p \cdot s \cdot \sigma_t \quad (3.21)$$

Účinnosť nitovaného spoja nemôže nikdy dosiahnuť 100 %, ale je ju možné vhodne zvýšiť použitím viacradových spojov nitov. Maximálne zaťaženie je najmenšie

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

prípustné zaťaženie stanovené z pevnostných podmienok v nitovom spoji v strihu, ťahu a v otláčení.

V Tab. 3.4 sú uvedené účinnosti nitovaného spoja pre rôzne spôsoby prevedenia. Maximálna účinnosť je predpokladaná pri podmienkach: dovolené napätie v ťahu (76 MPa), dovolené napätie v strihu (60 MPa), a dovolené napätie na otláčenie (130 MPa).

Tab. 3.4 Účinnosti kotlových nitovaných spojov

Preplátovaný spoj	Účinnosť (%)	Maximálna účinnosť (%)	S dvoma stykovými doskami	Účinnosť (%)	Maximálna účinnosť (%)
Jednoradový	45÷60	63,3	Jednoradový	55÷60	63,3
Dvojradowý	63÷70	77,5	Dvojradowý	70÷83	86,6
Trojradowý	72÷80	86,6	Trojradowý	80÷90	95
			Viacradowý	85÷94	98,1

3.4 Jednostranné nitované spoje

Pre vyhotovenie nitovaného spoja sa vyžaduje prístup z oboch strán t.j. zo strany fabrickej hlavy nitu aj zo strany drieku, aby bolo možné vyhotoviť závernú stranu nitu. Existujú však prípady v praxi, kedy je obojstranný prístup k nitu obmedzený alebo nemožný. Na vyriešenie týchto nedostatkov sa používajú tzv. *slepé nity*, ktoré umožňujú jednostranné nitovanie.

Slepé nity - Obr. 3.14 sa vyrábajú v rôznych tvaroch ako otvorené, uzavreté, rozvidlené a výbušné s hlavou polguľovou, zapustenou a kužeľovitou a z materiálov ako hliník, oceľ, meď, plast a nehrdzavejúca oceľ.

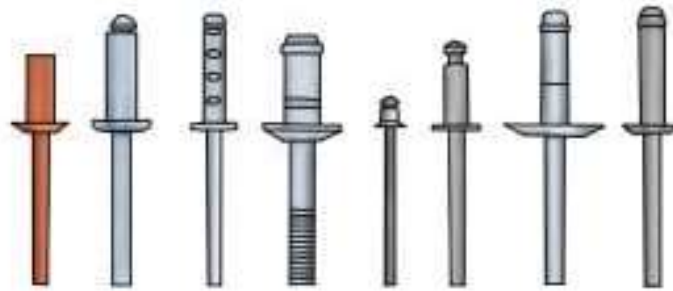
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.14 Slepé nity [53]

Trhacie slepé nity

K najpoužívanejším slepým nitom patria *trhacie slepé nity*. Trhacie nity sa bežne dodávajú vo veľkostiach do 8 mm a sú schopné upnúť dve dosky s celkovou hrúbkou do 25 mm (normálne) a 50 mm (špeciálne). Trhacie slepé nity sú v prevedení s rôznymi tvarmi drieku a hlavy - Obr. 3.15, a vyrábajú sa z rôznych materiálov.

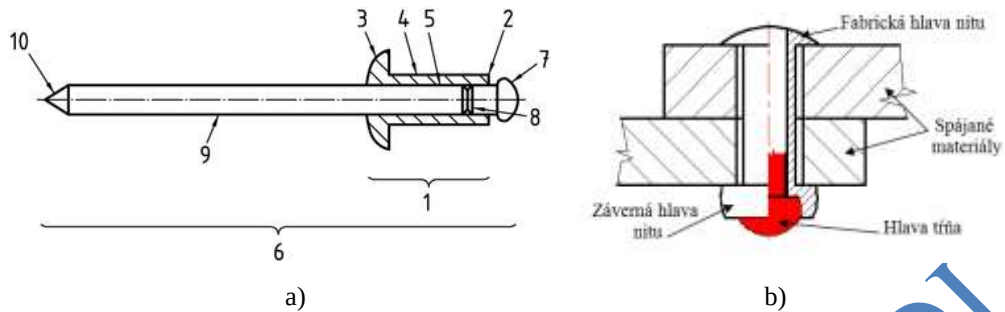


Obr. 3.15 Trhacie slepé nity [52]

Pre oceľové nity, ktoré nie sú také húževnaté ako medené/hliníkové nity, je limit veľkosti priemeru drieku obmedzený na cca 6 mm.

Trhací slepý nit má dutý valcový driek pripevnený k hlave. Dutinou drieku prechádza trň – dlhý úzky čap s hlavičkou, pričom hlavička funguje ako záverná hlava na opačnom konci drieku, ako je hlava nitu - Obr. 3.16b).

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



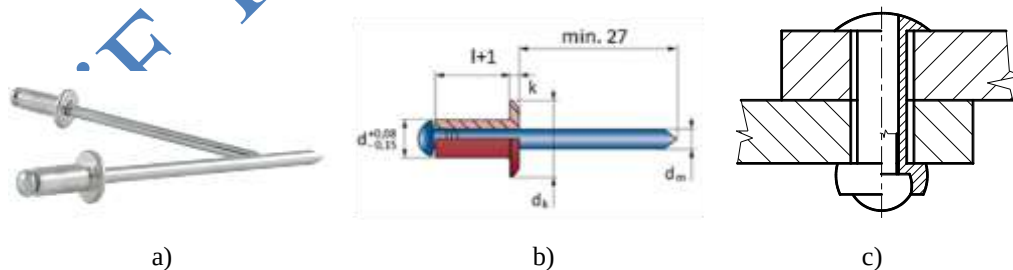
Obr. 3.16 Trhacie slepé nity - základné pojmy

a) Časti trhacieho slepého nitu podľa normy ISO 14588:2000 (en)

(1- dutý slepý nit, 2 - koniec slepého nitu, 3 - hlava slepého nitu, 4 - dŕiek slepého nitu, 5 - dutina slepého nitu, 6 - trŕň, 7 - hlava trŕňa, 8 - oblasť odtrhnutia trŕňa, 9 - oblasť uchopenia, 10 - zakončenie trŕňa)

Trhací slepý nit je mechanický upevňovací prvok so schopnosťou spájať komponenty zostavy aj v prípadoch, ak je prístup na jeho inštaláciu a nitovanie obmedzený len na jednu stranu. Trhací slepý nit obsahuje trŕň alebo kolík, ktorý počas nitovania deformuje koniec slepého nitu. Tiež môže rozšíriť dŕiek. Časti slepého nitu sú znázornené na Obr. 3.16.

Štandardný slepý nit

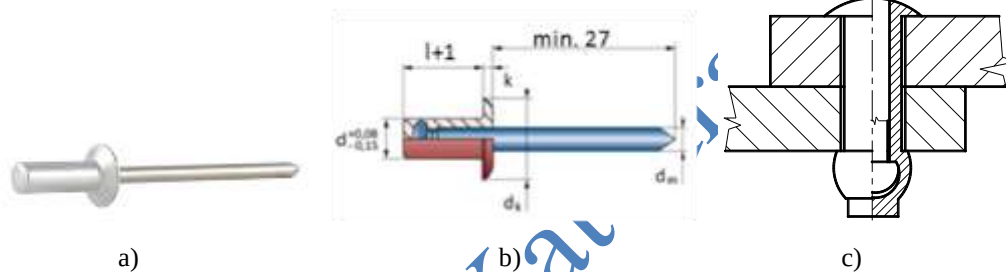


Obr. 3.17 Štandardný slepý nit [51, 52]

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Na spojenie kovových materiálov sa zvyčajne používajú *štandardné slepé nity* - Obr. 3.17a). Majú klenuté hlavy a hladké drieky. Potiahnutím trňa cez driel nity sa driel roztiahne na jeho „slepom“ konci, čím sa vytvorí druhá hlava a trvalo spojí materiály - Obr. 3.17c). Štandardné nity sa používajú v celom rade priemyselných odvetví vrátane automobilového priemyslu, stavebníctva, výroby elektrických spotrebičov, kontajnerov, nábytku, klimatizácie a kúrenia.

Utesnené slepé nity



Obr. 3.18 Utesnený slepý nit [51]

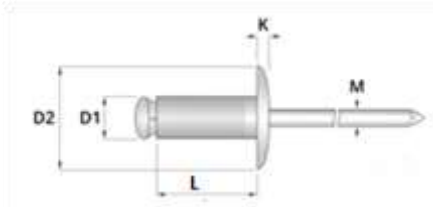
Tento typ slepého nity sa dodáva s utesneným koncom - Obr. 3.18. Hlava trňa nevyčnieva z konca nity ako pri iných typoch slepých nitov – je obsiahnutá v utesnenom drieku. Utesnené nity neumožňujú prenikaniu alebo prestupovaniu kvapalín a sú určené na vytváranie tesných spojov materiálov. Hlava trňa sa nachádza vo vnútri drieku nity a driel je utesnený. Tým sa zabráni prenikaniu kvapaliny cez nitový spoj.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

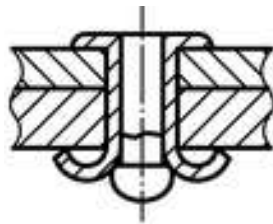
Lupeňové slepé nity



a) názorný tvar nitu



b) technický popis nitu



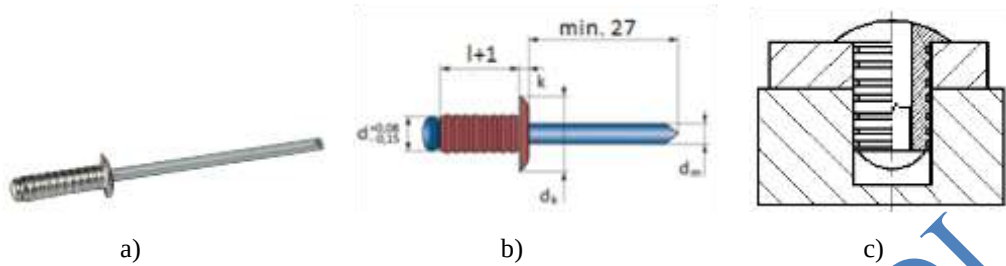
c) technické a názorné vyhotovenie lupeňového nitu

Obr. 3.19 Lupeňový slepý nit

Lupeňové nity vytvárajú závernú hlavu s väčším priemerom a vytvárajú tým väčšiu nosnú plochu (spodná strana hlavy). Keď sa trň pretiahne, driek sa roztiahne a vytvorí sa záverná hlava v tvare kvetu so štyrmi okvetnými lístkami (lupeňmi). Tento typ nitov je najvhodnejší na upevnenie kovu na mäkkšie materiály. Boky (lupene) nitu sa prehnú a vytvorí sa hlava na spojenie materiálov. Lupeňové nity sú ideálne pre použitie v automobilovom priemysle, pri stavebných prácach (sadrokartón a izolácie) a možno ich použiť na plastové komponenty, elektrospotrebiče a čalúnenie resp. potáhy nábytku.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Drážkovaný slepý nit

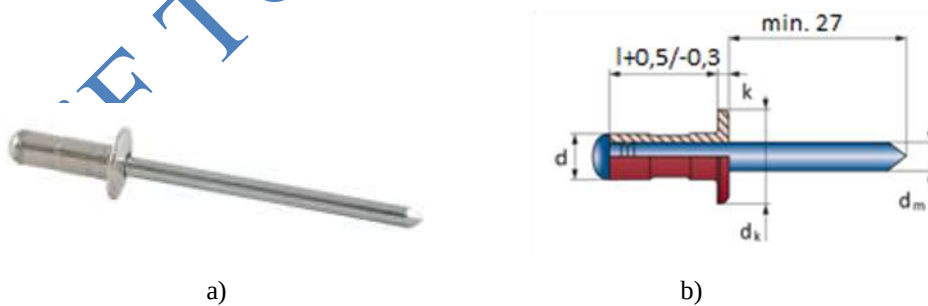


Obr. 3.20 Drážkovaný slepý nit

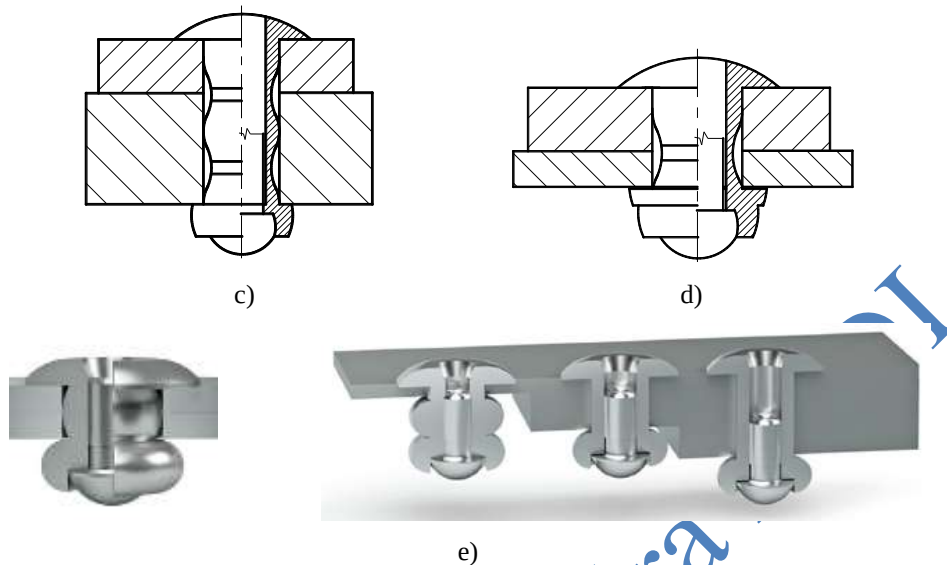
Tento typ nitu je dodávaný s drážkami drieku - Obr. 3.20a), ktoré poskytujú nitu vynikajúcu príľnavosť pri spájaní mäkkších materiálov, ako je plast a drevo. Drážkované nity sú ideálne na upevnenie kovu na drevo a kovu na stavebné materiály, ako je cement, tehly a drevo.

Drážky umiestnené na drieku nitu zapadajú do materiálu a držia ho pohromade, takmer ako skrutka. Drážkovaný nit je možné použiť aj v kombinácii so slepou dierou, ako je znázornené na Obr. 3.20c). Keď sa trn vytiahne, koncová časť drážkovaného nitu sa roztiahne vo vnútri materiálu, namiesto toho, aby sa na druhej strane materiálu vytvorila záverná hlava. Takže nit zvierá materiál trením, nie druhou hlavou, zatiaľ čo fabrická hlava na druhom konci zvierá predmet, ktorý sa spája s materiálom.

Multi kontaktné slepé nity



Konštruovanie nerozoberateľných spojov



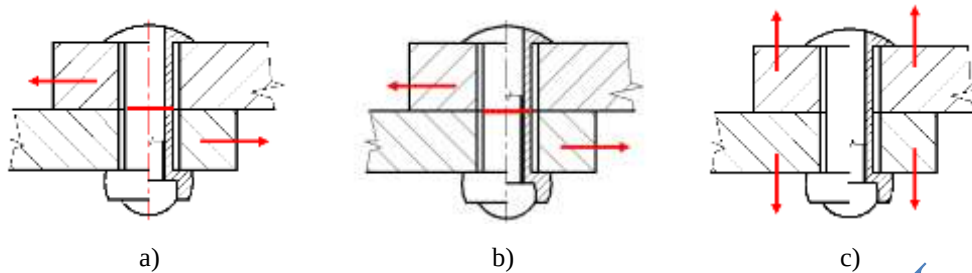
Obr. 3.21 Multi kontaktný slepý nit

Multi kontaktné nity sú podobné štandardným nitom, ale majú driek rozdelený na viacero segmentov. Segmenty drieku sa rozširujú a poskytujú viackontaktné spojenie, keď sa trň pretiahne cez driek. Tieto nity slúžia na upevnenie kovu k plastu a plastu k plastu. Segmenty drieku nitu sú pri preťahovaní trňa tlačené proti nitovanému materiálu.

3.4.1 Pevnosť slepých nitov

Pevnosť ťhacích nitov uvedená v tabuľkách dodávateľov je vo všeobecnosti maximálnou pevnosťou pri porušení. Pri porovnaní pevnosti slepých nitov s konvenčnými plnými nitmi (rovnaký materiál) sú plné nity vo všeobecnosti pevnejšie ako slepé nity, kde sa trň slepého nitu odtrhne v mieste prasknutia trňa a rovina strihu nitu sa teda nachádza nad miestom odtrhnutia trňa - Obr. 3.22a). Pri slepých nitoch, kde sa trň odtrhne nad hlavou nitu a v mieste strihu nitu sa nachádza aj trň - Obr. 3.22b), sú slepé nity vo všeobecnosti pevnejšie. Vyššiu pevnosť teda podporuje trň, ktorý sa stane súčasťou nitu a vyplní dutinu drieku nitu.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.22 Namáhanie slepého nitu.

V prípade odtrhnutia trňa pod strihovou rovinou - Obr. 3.22a,c), sa predpokladá, že priemer dutiny nitu d bude totožný s priemerom trňa d_m . Napätie v strihu sa určí nasledovne:

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi}{4}(d^2 - d_m^2)} \quad (3.22)$$

V prípade odtrhnutia trňa nad strihovou rovinou - Obr. 3.22b) sa predpokladá, že na prenose zaťaženia sa bude podieľať aj trň. Napätie v strihu v drieku nitu sa určí nasledovne:

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d^2} \quad (3.23)$$

Pri namáhaní nitu na ťah - Obr. 3.22.c) je driek nitu namáhaný v ťahu a napätie v drieku nitu sa určí:

$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi}{4}(d^2 - d_m^2)} \quad (3.24)$$

kde:

d – priemer drieku nitu,

d_m – priemer dutiny v drieku nitu.

Ako príklad je možné uviesť porovnanie troch nitov z oceleového materiálu. Slepý nit s priemerom 4 mm bude schopný preniesť silu spôsobujúcu namáhanie v strihu o veľkosti $F_s = 3,1$ kN, ak trň nie je v rovine strihu, a strižnú silu $F_s = 6,7$ kN,

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

ak trň sa nachádza v rovine strihu. Strižná sila, ktorá namáha driek plného nitu z rovnakého materiálu, s priemerom 4 mm za predpokladu medze pevnosti v strihu $\tau_{Rm} = 335 \text{ MPa}$, bude $F_s = 4,2 \text{ kN}$. Schopnosť prenášať zaťaženie v podobe strihovej sily alebo ťahovej sily je značne závislé od samotného materiálu nitu a od tvaru hlavy nitu - Tab. 3.5.

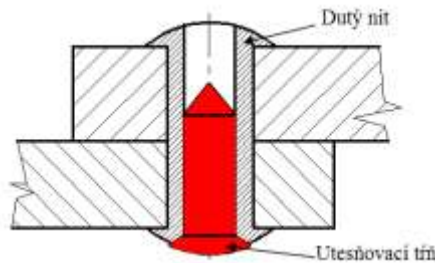
Tab. 3.5 Porovnávacie údaje štandardného slepého nitu priemeru drieku $d = 4 \text{ mm}$. [50]

Materiál nitu	Hlava nitu					
	Štandardná $d_k=8 \text{ mm}$		Zapustená 120° $d_k=7,5 \text{ mm}$		Veľká $d_k=12 \text{ mm}$	
	Strih [N]	Ťah [N]	Strih [N]	Ťah [N]	Strih [N]	Ťah [N]
Hliník AIMG 3,5	1100	1400	1100	1400	1180	1500
Meď	1000	1500	neuvádza	neuvádza	neuvádza	neuvádza
Oceľ pozinkovaná	1550	1990	1550	1990	1550	1990
Oceľ nerezová AISI 304	3100	3800	3100	3800	2895	3650

Treba poznamenať, že slepý nit sa bežne používa pre ľahšie konštrukcie z materiálov s tenšími hrúbkami. Všeobecne sa predpokladá, že správne nainštalovaný pevný nit je spoľahlivejší v porovnaní so slepým nitom, ale jeho montáž je značne nákladnejšia.

Slepé nity je možné s vhodnou úpravou využiť aj pre konštrukciu tesných spojov. Jednou z možností je použitie utesneného trhacieho slepého nitu, ako to už bolo uvádzané. Ďalšou z možností je použitie zablendovaného rúrkového nitu, ktorý sa dá používať tam, kde musí byť nitovaný spoj tesný. Zo strany materiálu, kde sa požaduje tesnosť, sa aplikuje utesňovací trň - Obr. 3.23. Utesňovací trň pokryje cca 100 % hlavy nitu a driek trňa rozširuje driek nitu. Táto kombinácia vlastností utesňovacieho trňa v kombinácii so skutočnosťou, že nit sa bude radiálne zväčšovať aby vyplnil otvor, zabezpečí, že nitovaný spoj je utesnený až do tlaku 3,5 MPa.

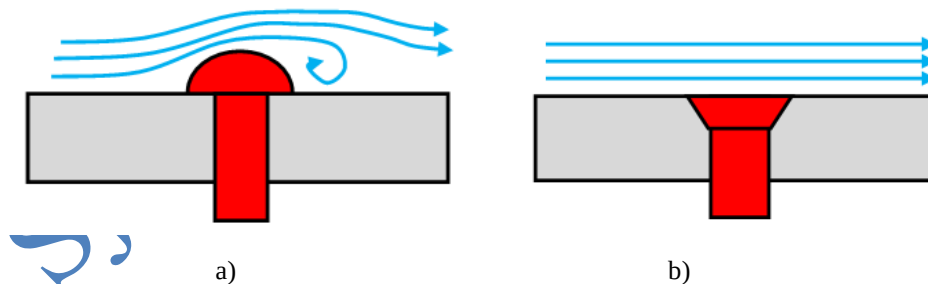
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.23 Utesnenie nitu pomocou utesňovacieho trňa

3.5 Nitované spoje s nitmi so zápusťou hlavou

Nitované spoje s nitmi so zápusťou hlavou majú všeobecne plnohodnotné použitie. Čas prípravy nitovania je dlhší, lebo je nevyhnutné v nitovanom materiáli vyhotoviť upravený otvor pre zápusťnú hlavu. Zápusťná hlava zapadá do materiálu bez toho, aby vyčnievala, pričom zachováva rovný povrch. Zápusťná hlava nitu je vhodná skôr pre hrubšie materiály alebo tam, kde je potrebné aby bola hlava po zanitovaní v rovine s materiálom. S výhodou sa zapustené hlavy nitov používajú v takých podmienkach, kde je potrebné zabezpečiť súvislú plochu bez výstupov v podobe hláv nitov, alebo v prípadoch, kedy okolo hlavy nitov prúdi vzduch alebo kvapalina. Hlava nitu potom nevytvára prekážku v prúde - Obr. 3.24.

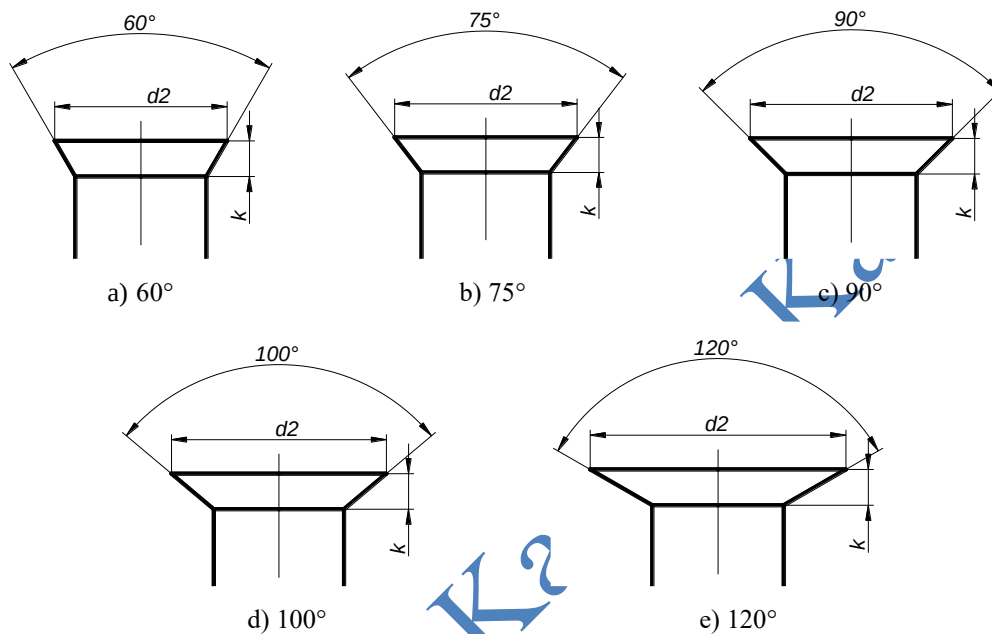


Obr. 3.24 Rozdiel v prúde (obtekaní) okolo nitu s polguľovou a zapustenou hlavou

Nity so zápusťou hlavou sa vyhotovujú v rôznom uhlovom prevedení tvaru hlavy - Obr. 3.25. Známe sú tvary zápusťnej hlavy s uhlom 60° , 75° , 78° , 90° , 100° , 120° . Zápusťné hlavy od uhla 90° , sa používajú na spájanie tenších materiálov. Veľmi

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

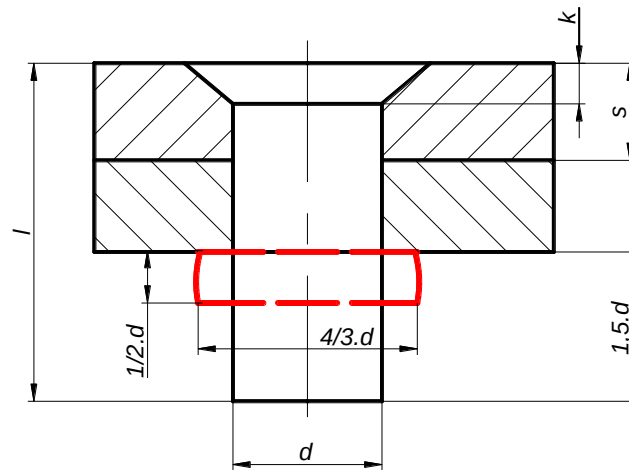
dôležitým rozmerom je výška hlavy k , pretože na základe tejto hodnoty sa vyhotoví zapustený otvor v spájanom materiáli.



Obr. 3.25 Tvary zápustných hláv

Pri vyhotovení nitovaného spoja s nitom so zápustnou hlavou je vhodnejšie hrubší z materiálov použiť ako materiál, v ktorom bude umiestnená hlava nitu, aby bolo možné v ňom vyhotoviť upravený otvor pre zápustnú hlavu, zobrazený na Obr. 3.26. Na Obr. 3.26 sú zakótované aj základné rozmery nitu so zápustnou hlavou. Úprava otvoru pre hlavu nitu oslabuje prierez spájaného materiálu a zároveň vytvára hranu s koncentráciou napätia. Z tohto dôvodu hĺbka zapustenia hlavy nitu nesmie byť viac ako 50 % z hrúbky materiálu - Obr. 3.26. V ojedinelých prípadoch pre hlavy s väčším uhlom môže zapustenie hlavy tvoriť 60 % z hrúbky materiálu [49]. Hrúbka spájaných materiálov nitovanými spojmi vyhotovených s nitmi so zápustnou hlavou by nemala presiahnuť 6,5-násobku priemeru nitu. Dĺžka nitu sa definuje tak, aby časť drieku určená na vytvorenie závernej hlavy bola $(1,3 \div 1,5) \cdot d$. Správne vytvorená záverná hlava má tvar valcovej hlavy s rozmermi - Obr. 3.26.

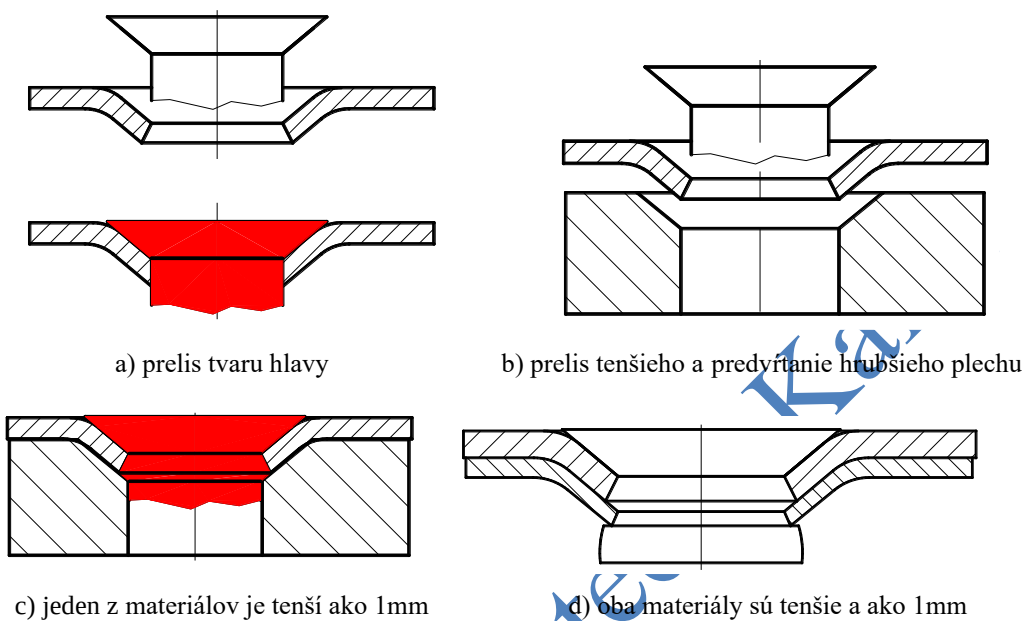
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.26 Tvar a odporúčané rozmery nitu so zápustnou hlavou

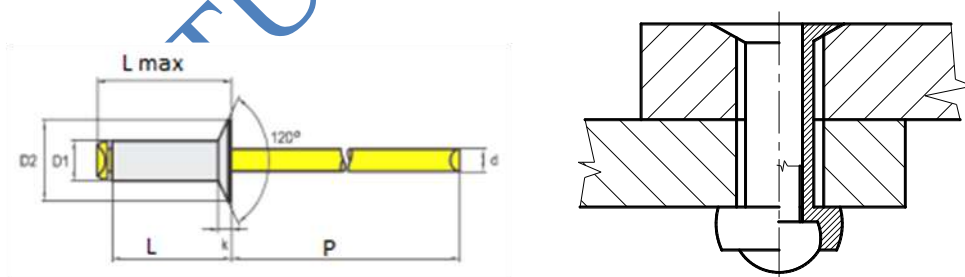
Pre spájanie tenších materiálov (plechov) sa odporúča používať zápustné hlavy s väčším uhlom ako 90° . Ak je hrúbka plechu, v ktorom bude umiestnená zápustná hlava nitu menej ako 1mm alebo menej ako 2-násobok výšky hlavy nitu, nie je možné v plechu vyvŕtať otvor pre zápustnú hlavu. V takomto prípade je potrebné vyhotoviť otvor pre zapustnú hlavu pomocou tvárnenia plechu predlisovaním - Obr. 3.27a). Následne sa v hrubšom materiáli predvŕta zapustený otvor v tvare prelisku tenšieho plechu - Obr. 3.27b)c). Ak ale spoločná hrúbka spájaných materiálov je menej ako 1mm alebo menej ako 2-násobok výšky hlavy nitu, je nutná úprava otvoru pre nit predlisovaním na oboch spájaných plechoch - Obr. 3.27d). Správne prevedený nitovaný spoj pre nitovanie tenkých plechov je na Obr. 3.27d), z drieku nitu sa vytvoria dve hlavy, jedna riadna záverná a druhá pomocná, nachádzajúca sa v mieste strihu. Takto prevedené spojenie tenkých plechov výrazným spôsobom zvyšuje odolnosť spájaných materiálov proti pretrhnutiu aj proti vytrhnutiu.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.27 Úprava tenkých nitovaných materiálov pre zápustnú hlavu nitu

V prípade, ak je možný prístup k spájaným materiálom len z jednej strany, je vhodné použiť slepé nity so zápustnou hlavou - Obr. 3.28. Slepé nity so zápustnou hlavou sú vyhotovené s uhlom zošíkmenia hlavy 60° , 75° , 100° a 120° .



Obr. 3.28 Slepý nit so zápustnou hlavou

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

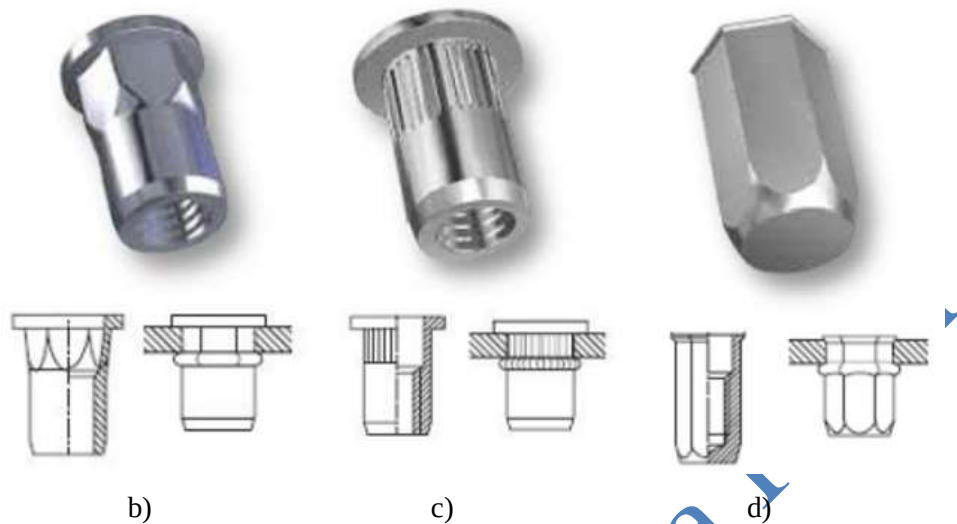
3.6 Nitovacie matice a skrutky

Nitovacie matice (angl. rivnuts) a *nitovacie skrutky* (angl. rivet bolts) sú upevňovacie prvky, ktoré po aplikácii vytvoria odolný závit na priskrutkovanie ďalšieho materiálu - Obr. 3.29a). Používajú sa tam, kde klasické závitky nie sú možné vyhotoviť priamo do materiálu z dôvodu malej hrúbky materiálu, alebo kde je potrebná demontáž spájaných materiálov a nie je tam možné aplikovať nitovaný spoj. Nitovacie matice a nitovacie skrutky sa montujú bez protitlaku, ako slepé nity a teda ich montáž je vhodná aj na duté profily. Nitovacie matice sa vyrábajú z rôznych materiálov, ako oceľové, hliníkové a antikorové. Podľa typu použitej hlavy sa delia na nitovacie matice s plochou alebo zápustnou hlavou. Podľa veľkosti a tvaru drieku sa nitovacie matice delia na nitovacie matice so šesťhranným driekom - Obr. 3.29b), valcovým ryhovaným driekom - Obr. 3.29c) a uzatvoreným šesťhranným driekom - Obr. 3.29d), ktorý zabráňuje prieniku nečistôt alebo vlhkosti.



a)

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.29 Typy nitovacích matic podľa tvaru hlavy [47]

Montáž nitovacích matic sa uskutočňuje v štyroch krokoch, zobrazených na Obr. 3.30. Na začiatku procesu sa nitovacia matica spolu s pneumatickým nitovacím nástrojom, ktorý je na nej naskrutkovaný, vloží do vopred vyvrtanej diery. V druhom kroku sa vysunie nástroj z nitovacej matice, čo spôsobí deformáciu drieku matice a tým vytvorí pevné nerozoberateľné spojenie matice s materiálom. Nástroj je v ďalšom kroku otočným pohybom vyskrutkovaný z nitovacej matice, čím je proces ukončený. V poslednom kroku sa táto nitovacia matica použije ako závit pre skrutku na vytvorenie rozoberateľného spoja.



Obr. 3.30 Proces montáže nitovacej matice [46, 48]

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

3.6.1 Lupeňové nitovacie matice

Lupeňové nitovacie matice - Obr. 3.31a), tiež nazývané ako štrbinové alebo krížové, sú navrhnuté tak, aby poskytovali maximálnu únosnosť skrutkového spoja namáhaného na ťah pri aplikácii v spojoch tenkých plechoch a plastoch.

Po montáži sa driek matice na zadnej (slepej) strane rozdelí na štyri časti (lupene) do kríža - Obr. 3.31b), čím sa vytvorí široká nosná plocha na zadnej strane spájaného materiálu. Takéto riešenie drieku nitovacej matice využíva malý montážny otvor, ale zväčšená styková plocha v podobe lupeňov umožňuje prenos väčšieho zaťaženia v ťahu a väčšieho zaťaženia krútiacim momentom pri uťahovaní skrutkového spoja.

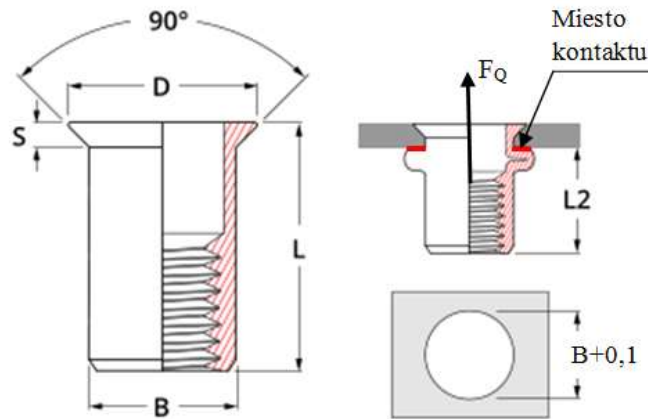


a) b)
Obr. 3.31 Lupeňová nitovacia matica [47]

3.6.2 Výpočet nitovacích matíc a nitovacích skrutiek

Nitovacia matica je konštrukčne totožná s rúrkovým nitom opatreným vnútorným závitom, ktorý sa deformuje tak, aby sa z neho stala slepá matica - Obr. 3.32. Pri aplikácii nitovacej matice sa trubicová časť deformuje a v mieste kontaktu vytvorí golier. Vzhľadom k tomu, že trubicová časť sa bude deformovať, sú nitovacie matice vyrobené z ťažných materiálov, ktorých pevnosť v ťahu je pomerne nízka - Tab.3.6.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.32 Základné rozmery nitovacej matice pred a po aplikácii [45]

Tab. 3.6. Základné pevnostné vlastností nitovacích matíc

Materiál	Minimálna pevnosť v ťahu [MPa]
Hliník	190
Oceľ	310 - 585
Nerez	460 - 550
Mosadz	345

Po vytvorení goliera nitovacej matice dochádza k otláčeniu v mieste kontaktu. Tlak v otláčení musí byť menší, ako dovolená hodnota tlaku v otláčení spájaných komponentov podľa vzťahu (3.25):

$$p = \frac{F}{S} \leq p_D \quad (3.25)$$

kde:

F- osová sila potrebná na aplikáciu nitovacej matice,

S - plocha kontaktu (medzikružie goliera).

Po aplikácii musí byť schopná nitovacia matica preniesť osovú záťaženie skrutkovým spojom. Napätie na otláčenie od osovej sily v skrutke však nesmie byť väčšie ako dovolené napätie.

$$p = \frac{F_Q}{S} \leq p_D \quad (3.26)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Kritickým momentom je proces uťahovania skrutkového spoja. Nitovacia matica je k materiálu pridržiavaná trecou silou v mieste kontaktu. Pre bezproblémové vytvorenie skrutkového spoja musí platiť, že trecí moment v mieste kontaktu musí byť väčší, ako trecí moment v závite, ktorý je zároveň uťahovací moment skrutky.

$$M_{1z} = F_Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma + \varphi') \leq M_T \quad (3.27)$$

kde:

F_Q - osová sila v skrutke,

d_2 - stredný priemer závitu skrutky,

γ - uhol stúpania závitu,

φ' - redukovaný trecí uhol v závite.

V prípade nedostatočného trecieho momentu v mieste kontaktu počas uťahovania skrutky je možné použiť nitovacie matice so šesťhranným alebo ryhovaným dříekom.

3.7 Lock Bolts

Uzamykacie skrutky (angl. Lock bolts) sa používajú pre vytvorenie vysokopevného nitovacieho spoja. V súčasnosti majú široké použitie v rôznych typoch konštrukcií a začínajú sa uplatňovať aj v dynamicky namáhaných konštrukciách - Obr. 3.33.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.33 Ukážky aplikácií uzamykacích skrutiek v konštrukciách [44]

Lock bolts sú vyrobené z kvalitnej ocele a skladajú sa zvyčajne z dvoch častí: nitu (skrutky) a matice (goliera) - Obr. 3.34, ktoré po inštalácii vytvárajú nerozoberateľný spoj. Nerozoberateľný spoj je vytvorený tlakom nitovacieho nástroja, ktorý rozníťováva maticu na drieku skrutky do momentu, kým sa matica nezalisuje do vrúbkovanej (v niektorých prevedeniach závitovej) časti skrutky. Týmto vzájomným nalisovaním vznikne nerozoberateľný spoj, ktorý sa v týchto prípadoch nazýva aj uzamknutý spoj.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

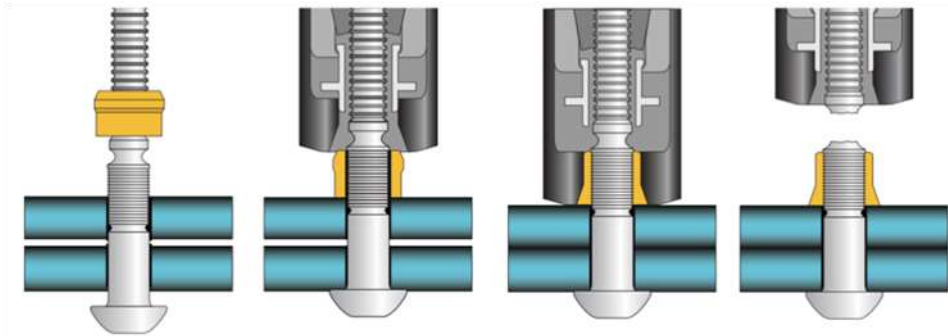


Obr. 3.34 Rôzne typy uzamykacích skrutiek [41]

Uzamykacie skrutky sa podľa typu hlavy delia na skrutky so zápusťou hlavou alebo s vyčnievajúcou hlavou. Niektoré uzamykacie skrutky sú podobné slepým nitom a ich montáž je možná z jednej strany. Ostatné typy sa montujú do otvoru zo vzdialenejšej strany. Montáž sa potom dokončí z blízkej strany pomocou pištole podobnej ako u nitovacích pištolí - Obr. 3.35.

Uzamykacie skrutky sú schopné vytvoriť taký nerozoberateľný spoj, ktorý odoláva vibráciám a má väčšiu spojovaciu plochu medzi maticou (golierom) a skrutkou v priereze bez koncentrácií napätia, v porovnaní s klasickým skrutkovým spojom. Tam, kde matice a skrutky používajú na vytvorenie spoja skrutku so závitom, uzamykacie skrutky používajú golier s hladkým otvorom, ktorý je nasadený na skrutku so závitom - Obr. 3.35a). Po utiahnutí nitovacou pištoľou je golier vtlačený do špeciálnych uzamykacích drážok na skrutke - Obr. 3.35b), c), aby sa vytvorilo trvalé nerozoberateľné spojenie. Na konci montážneho procesu sa koniec skrutky odtrhne pomocou nitovacej pištole - Obr. 3.35d).

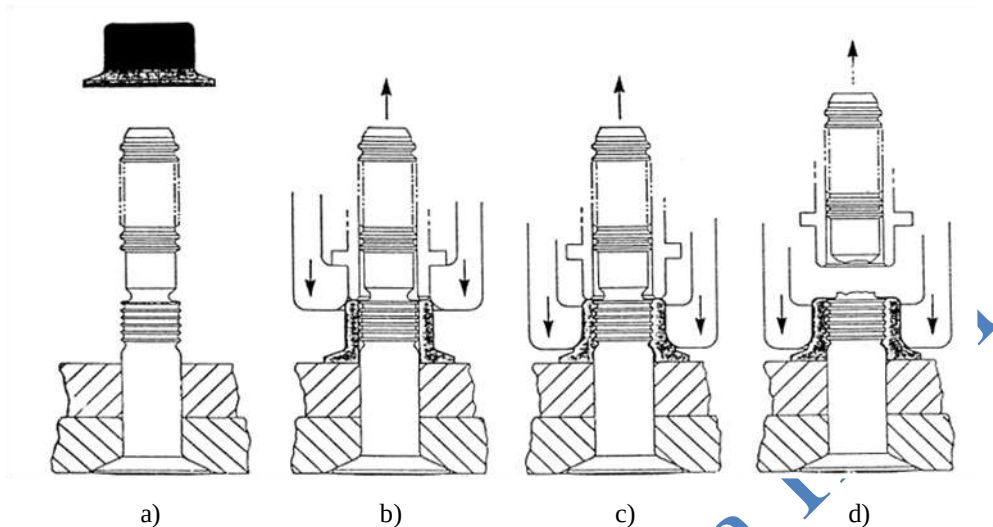
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.35 Postup inštalácie uzamykacej skrutky [43]

Pevnosť uzamykacích skrutiek v šmyku sa líši v závislosti od pevnosti materiálu a minimálneho priemeru spojovacích materiálov. Zväčšením priemeru alebo výberom materiálu s vyššou pevnosťou sa zvýši pevnosť v šmyku. Pevnosť v ťahu uzamykacích skrutiek závisí od pevnosti v šmyku materiálu matice a počtu drážok, ktoré táto matica vyplňa.

Pre špeciálne aplikácie predovšetkým v leteckom a kozmickom priemysle sa používa prevedenie označované ako Lightweight Grooved Proportioned Lockbolt - LGPL (v preklade *ľahká drážkovaná zaistovacia skrutka*). LGPL je vyrobená špeciálne pre kompozitné materiály. Má nadrozmernú hlavu a nadrozmerný golier na zníženie kontaktného namáhania kompozitného materiálu počas inštalácie aj životnosti. Skrutka je vyrobená z titánu s vysokou pevnosťou a golier je vyrobený z hliníka. Inštalácia prebieha podobne ako u lock-bolt-ov, a je zobrazená na Obr. 3.36. Golier je nasadený na skrutku - Obr. 3.36a),b). Následne nástroj tlakom pritlačí golier na zaistovaciu skrutku - Obr. 3.36c), čím vytvorí nerozoberateľný spoj odolný vibráciám. V poslednom kroku - Obr. 3.36d) je koniec skrutky odlomený a nástrojom odobratý.



Obr. 3.36 Inštalácia ľahkej drážkovanej zaistovacej skrutky [36]

3.7.1 Jo-Bolts

Spoje označované ako *Jo-bolt* sú vzhľadom a montážou podobné slepým nitom. Skladajú sa z troch častí, ktoré sú z výroby predmontované – skrutky z ocele so závitom na drieku, oceľovej matice so závitom a rozťahovateľnej objímky z nehrdzavejúcej ocele - Obr. 3.37a). Pri inštalácii Jo-bolt sa skrutka otáča, zatiaľ čo matica je pevne uchytená - Obr. 3.37b). To spôsobí, že objímka sa rozťahne cez koniec skrutky, čím sa vytvorí slepá hlava a upne sa proti obrobku. Po dosiahnutí potrebného krútiaceho momentu sa zvyšná časť skrutky odlomí - Obr. 3.37c).

Pri aplikácii Jo-bolts systému platí:

Moment potrebný pre vytvorenie slepej hlavy z rozťahovateľnej objímky je definovaný osovou silou F_Q potrebnou na vytvorenie objímky.

$$F_Q = S \cdot R_e \quad (3.28)$$

Uťahovací moment v závite skrutky potrebný pre vytvorenie objímky je definovaný:

$$M_{1z} = S \cdot R_e \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma + \varphi') \quad (3.29)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Po vytvorení rozťahnuteľnej objímky dôjde k navýšeniu ťahovacieho momentu na hodnotu, kedy dôjde k porušeniu drieku skrutky:

$$M_{1z} \geq R_{mk} \cdot W_{k3} \quad (3.30)$$

kde:

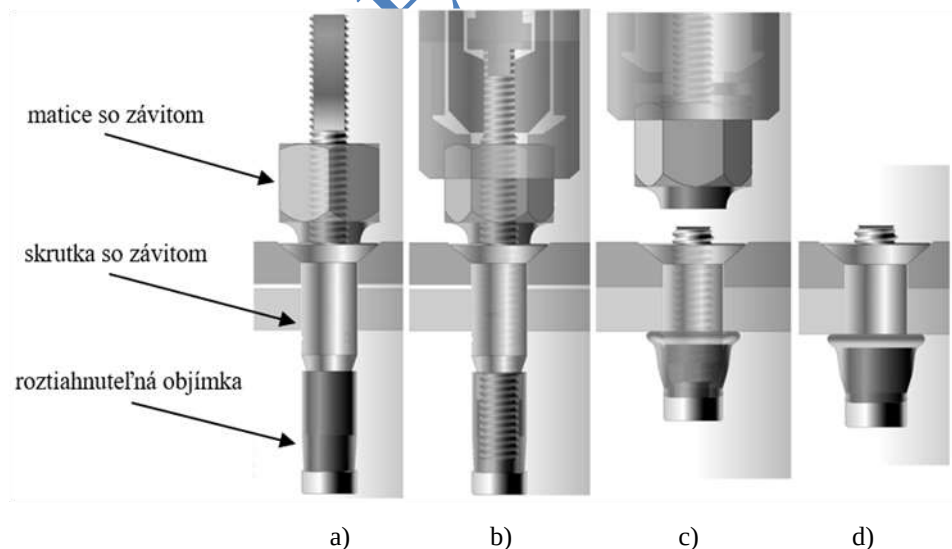
S - deformovaná plocha rozťahnuteľnej objímky,

R_e - medza klzu materiálu rozťahnuteľnej objímky,

R_{mk} - medza pevnosti v krútení montážnej skrutky,

W_{k3} - prierezový modul v krútení jadra drieku montážnej skrutky.

Vďaka vysokej pevnosti v šmyku a v ťahu sú skrutky Jo-bolt vhodné na použitie v prípadoch vysokého namáhania, kde by niektoré iné slepé spojovacie prvky neboli praktické, a ktoré nie sú často predmetom výmeny alebo servisu. Jo-bolts sú často súčasťou stálej konštrukcie modelov lietadiel. Ďalšími výhodami použitia skrutiek Jo-bolts je ich odolnosť voči vibráciám [36].



Obr. 3.37 Aplikácia Jo-bolt nerozoberateľného spoja [42]

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

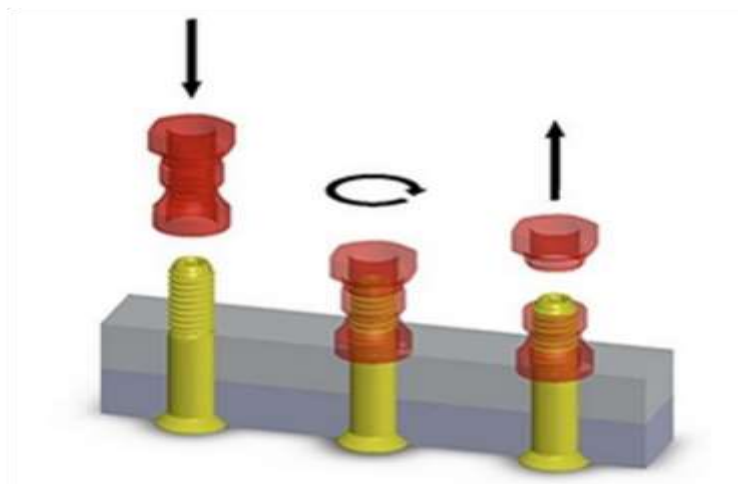
3.7.2 Hi-Lok

Dvojdielny spojovací prvok *Hi-Lok* patrí do skupiny zaistovacích skrutiek, ktorý sa skladá zo skrutky so závitom a matice - Obr. 3.38. Skrutky sú vyrobené z legovanej ocele, ocele odolnej voči korózii alebo zliatiny titánu a vyrábajú sa v mnohých štandardných aj nadrozmerných priemeroch drieku. Matice sú vyrobené z hliníkovej zliatiny, nehrdzavejúcej ocele alebo legovanej ocele. Výhodou spojovacieho prvku *Hi-Lok* je jeho nízka hmotnosť, vysoká odolnosť proti únave a vysoká pevnosť.



Obr. 3.38 Zaistovacia skrutka Hi-Lok [39]

Skrutky *Hi-Lok* sa inštalujú cez otvor zo vzdialenej strany. Inštalčná pištoľ zabráňuje otáčaniu matice a pri dosiahnutí požadovaného krútiaceho momentu sa odlomí jej koniec - Obr. 3.39. Závit matice sa zhodujú so závitmi skrutiek a sú navrhnuté tak, aby boli počas inštalácie zdeformované a vytvorili tým nerozoberateľný spoj [36].



Obr. 3.39 Inštalácia zaistovacej skrutky Hi-Lok [40]

3.7.3 Hi-Lite skrutky

Spojovací prvok *Hi-Lite* je tvarom a spôsobom aplikácie podobný ako spojovací prvok *Hi-Lok*. Rozdiel je v kratšej prechodovej oblasti medzi driekom a prvým nosným závitom. *Hi-Lite* má v priemere o jeden závit menej. Tieto rozdiely znižujú hmotnosť týchto spojovacích prvkov bez zníženia pevnosti v šmyku, ale ich upínacie sily sú menšie ako sily spojovacieho prvku *Hi-Lok*. Všetky spojovacie prvky *Hi-Lite* sú určené predovšetkým pre aplikácie v leteckom a kozmickom priemysle a preto sú vyrobené z titánu [39].

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

3.7.4 HuckBolts skrutky

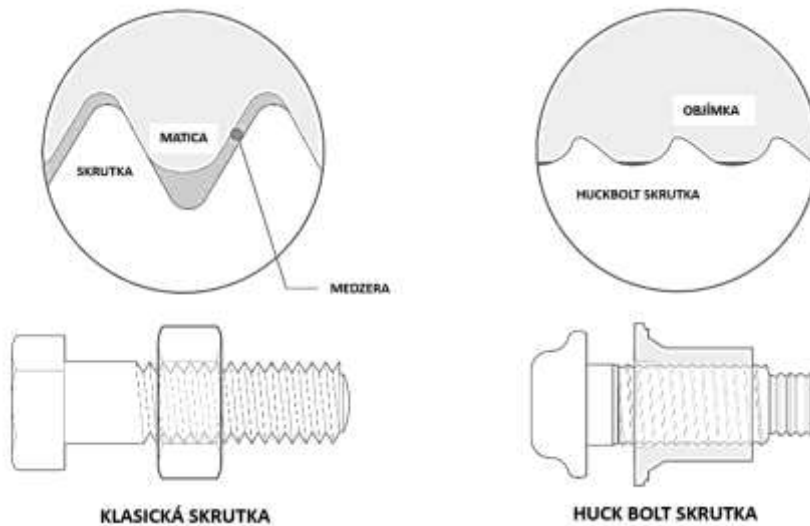
Skrutky typu *HuckBolts* sú podobné skrutkám Hi-Lok s tým rozdielom, že drielok je zvyčajne drážkovaný po obvode drieku a nie závitový, ako je vidieť na Obr. 3.40.



Obr. 3.40 Uzamykacie skrutky HuckBolts [38]

Skrutky HuckBolts sa inštalujú pomocou nástroja priameho predpínania a lisovania, takže medzi závitom goliera a skrutky nie sú žiadne vôle, ktoré sú v prípade skrutkových spojov bežným zdrojom uvoľnenia konvenčných matic a skrutiek. Úplný kontakt medzi drážkami skrutky a v objímke, teda medzi pritlačeným nákrúžkom a drielkom, udržiava stálu zvernú silu, a to aj v prípadoch dynamického zaťaženia spoja- Obr. 3.41.

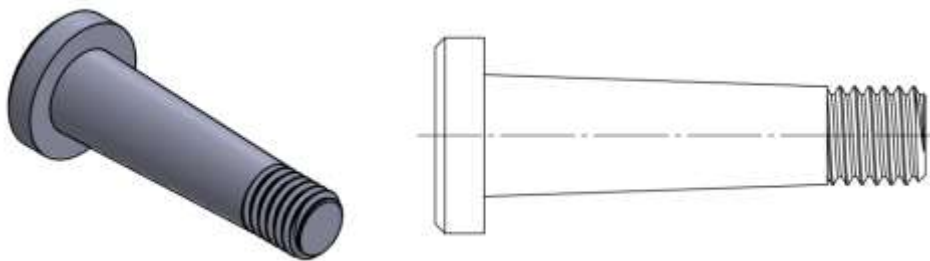
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 3.41 Porovnanie uzamykania klasickej skrutky a skrutky HuckBolts [37]

3.7.5 Taper-Lok skrutky

Taper-Lok je spojovací prvok s kužeľovým driekom pod uhlom $1,19^\circ$ - Obr. 3.42. Po jeho inštalácii do prevítaného otvoru sa následne utiahne matica na požadovanú hodnotu, čím vznikne pevný spoj, ktorý prenáša také ťahové zaťaženie, ako skrutka rovnakej veľkosti a materiálu. V dôsledku toho sú *Taper-Lok*-y vyrábané z vysoko pevnej legovanej ocele, nástrojovej ocele, ako aj titánu a používajú sa najmä v aplikáciách s cyklickým zaťažením.



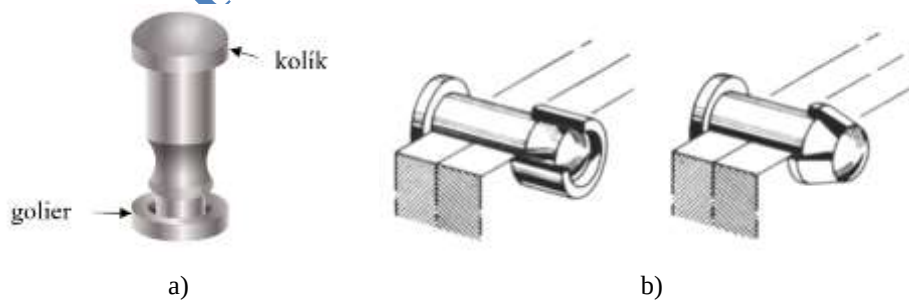
Obr. 3.42 Skrutka Taper-Lok

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Výhodou týchto spojovacích prvkov je rovnomerné rozloženie zaťaženia vo vrstvách spájaných materiálov. Takéto prvky s vysokou pevnosťou umožňujú menší rozostup otvorov ako je to pri konvenčných spojovacích prvkov. Výška matice tiež umožňuje lepšiu prístupnosť pri uťahovaní v stiesnených miestach aplikácie.

3.7.6 Hi-shear

Hi-shear sú komponenty špeciálneho tvaru pripomínajúceho kolík resp. čap, pomocou ktorého sa vytvorí nitované spojenie. Hi-shear pozostávajú z dvoch častí – kolíka a goliera, ako je znázornené na Obr. 3.43a). Tieto kolíky sú klasifikované ako špeciálne, pretože na ich inštaláciu je potrebný prístup k obojom stranám spájaného materiálu, nie je možné ich teda použiť ako slepé nity. Hi-shear kolíky majú rovnakú pevnosť v šmyku ako skrutky rovnakého priemeru ale majú o cca 40 % menšiu hmotnosť ako porovnateľná skrutka. Z hľadiska montáže vyžadujú len asi pätinu času na inštaláciu, ako spoj zložený zo skrutky, podložky a matice. Kolík má na jednom konci hlavu a na druhom konci má po obvode drážku, na ktorú sa pri inštalácii nasadí golier tak, aby pevne a tesne priliehal, ako je znázornené na Obr. 3.43b). Hi-shear sa prednostne používajú v aplikáciách namáhaných na strih, pretože golier nie je schopný prenášať zaťaženie osovou silou. Hi-shear sa nesmú používať tam, kde je dĺžka spoja menšia ako priemer drážky kolíka [29, 36].



Obr. 3.43 Hi-shear a jeho aplikácia [34, 35]

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

3.8. Priame nitovanie

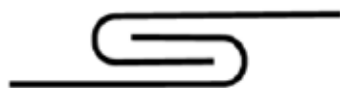
Pre vytvorenie nitovaného spoja pomocou priameho nitovania nie je potrebný nit. Pri priamom nitovaní vznikne nitový spoj tak, že jeden z komponentov je zároveň nitom a je na ňom vytvorená záverná hlava. Typickým príkladom, kde sa uplatňuje priame nitovanie, je reťaz - Obr. 3.44. Články reťaze sú spojené pomocou roznitovaného kolíka, ktorý je zároveň nosným prvkom reťaze.



Obr. 3.44. Príklad priameho nitovania pri výrobe reťaze

Priame nitovanie sa používa prevažne pre také aplikácie, kde komponent, na ktorom je vytvorená záverná hlava, má prierez kruhu alebo medzikružia.

V prípade, ak je potrebné vyhotoviť spoj pomocou priameho nitovania na komponentoch, z ktorých ani jeden nemá kruhový prierez, je vhodnejšie použiť driapkovanie. *Driapkovanie* (z češt. *Lemování*) sa vhodne aplikuje pre vyhotovenie priamych nerozoberateľných spojov predovšetkým z tenkých materiálov. Pre spájanie sa používa vzájomné tvarovanie plechov. Základom pre definovanie tvaru lemu v klampiarstve je norma ČSN 733610 - Navrhování klempířských konstrukcí. Táto norma definuje základné tvary lemových spojov - Obr. 3.45.

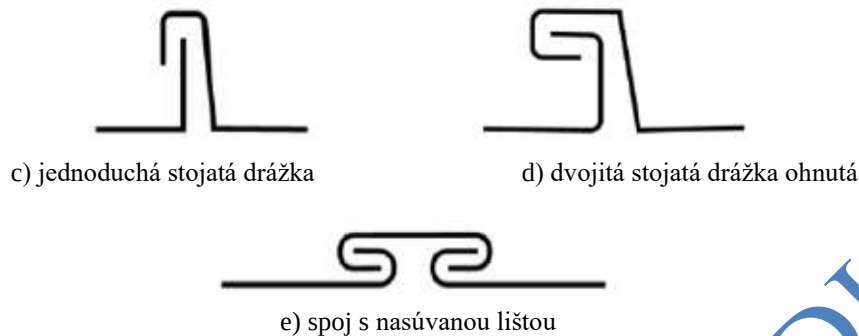


a) jednoduchá ležatá drážka



b) dvojité ležatá drážka

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

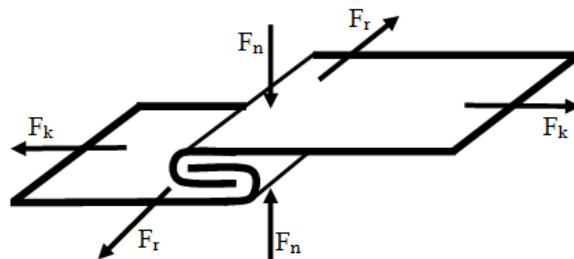


Obr. 3.45 Tvary lemov spájaných materiálov

Pri zaťažení lemového spoja v smere sily F_k - Obr. 3.46, je táto sila zachytená vytvoreným tvarom lemu. Pri zaťažení spoja v smere sily F_r , je potrebné, aby táto sila bola zachytená pomocou trecej sily F_t . Trecia sila, ktorá vznikne v kontaktných miestach lemu, je iniciovaná silou F_n , ktorou bol vytvorený lem a koeficientom trenia f medzi spájanými materiálmi.

Pre zachytenie sily F_r musí platiť:

$$F_r \leq F_t = F_n \cdot f \quad (3.31)$$



Obr. 3.46 Spôsoby zaťaženia lemového spoja

K priamym nitovaným spojom patria aj spoje vznikajúce tzv. *krimpovaním* (z angl. Crimping). Krimpované spoje majú široké uplatnenie v elektrotechnike, hydraulike a v oblasti lanovej techniky. Krimpujú sa hlavne elektrické káble, ale aj hydraulické hadice, pneumatické hadice, laná, rôzne kryty, ale aj pletivo a pod. Krimpovanie - Obr. 3.47 sa využíva na pripojenie koncoviek, konektorov, závesných ôk a podobne.

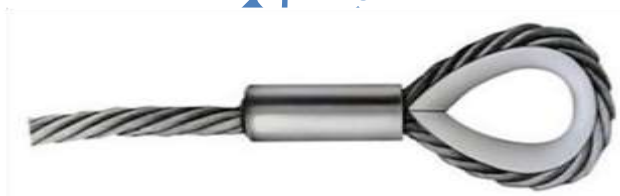
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



a)



b)



c)

Obr. 3.47. Príklad krimpovania

a) kabeláže [55], b) hydraulickej hadice [56], c) lana [57]

Krimpovaním je možné vytvoriť tvarový spoj, ktorý prenáša zaťaženie vzniknutým tvarom. Krimpovaním je možné vytvoriť trecí spoj, kde sa zaťaženie prenáša trením, alebo je možné vytvoriť kombinovaný spoj, kde sa zaťaženie prenáša tvarom aj trením.

4 Lepené spoje

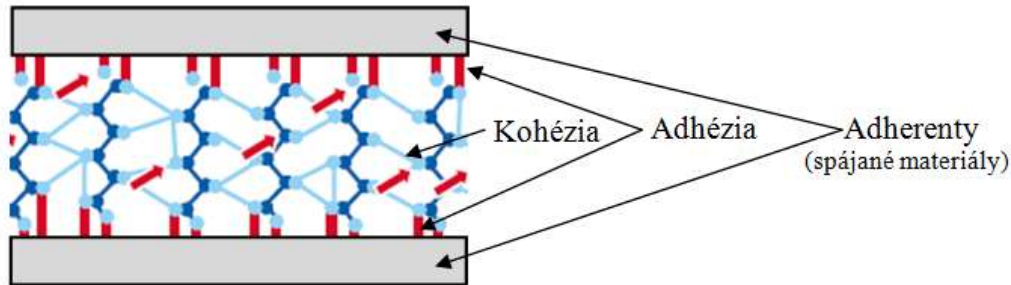
Spájanie kovových a nekovových materiálov, trendy v oblasti materiálového inžinierstva a moderné technológie spájania materiálov podporujú vývoj a používanie *lepených spojov*. Používanie lepených spojov bolo výsadou v drevárskom a nábytkárskom priemysle. V dnešnej dobe sa lepené spoje úspešne používajú aj v automobilovom, lodnom a leteckom priemysle. Lepené spoje ponúkajú širokú škálu výhod, počnúc spájaním materiálov s rôznymi vlastnosťami a hrúbkami, cez zachovanie celistvosti spájaných častí, až po rovnomernejšie rozdelenie napätia v spoji pri dynamickom zaťažení. Lepené spoje dosahujú vysokú pevnosť v šmyku, ťahu (tlaku) a v dynamickom cyklickom namáhaní v oblasti nízkokyčkovej a vysokokyčkovej únavy sú vhodnejšie ako zvarované spoje. Predovšetkým vďaka týmto vlastnostiam sa lepené spoje úspešne používajú v lepených konštrukciách lietadiel a lodí. Veľmi dôležité je uvedomiť si fakt, že univerzálne lepidlá neexistujú. Aj napriek tomu, že existujú lepidlá so širokým rozsahom použitia, je dôležité aplikovať lepidlo podľa konkrétnych materiálov, pracovných podmienok a spôsobu zaťaženia.

4.1 Úvod k problematike lepených spojov

Lepenie je proces spájania materiálov (nazývané adherenty) použitím lepidiel, pri ktorom sa využívajú adhézne sily a kohézne sily. Adhézne sily sú sily, ktoré vznikajú medzi adherentom a lepidlom a kohézne sily vznikajú v samotnom lepidle vo vnútri lepidla - Obr. 4.1. Mechanické adhézne sily majú pôvod v mechanickom prepojení lepidla v póroch a nerovnostiach povrchu materiálu. Špecifické adhézne sily, definované ako chemické a fyzikálne sily, majú pôvod v chemických väzbách, medzimolekulárnych a difúzných silách.

Kohézia je definovaná ako stav, v ktorom sú častice jednoduchej látky držané pohromade valenčnými a medzimolekulárnymi silami tzv. Van der Waalsovou väzbou.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

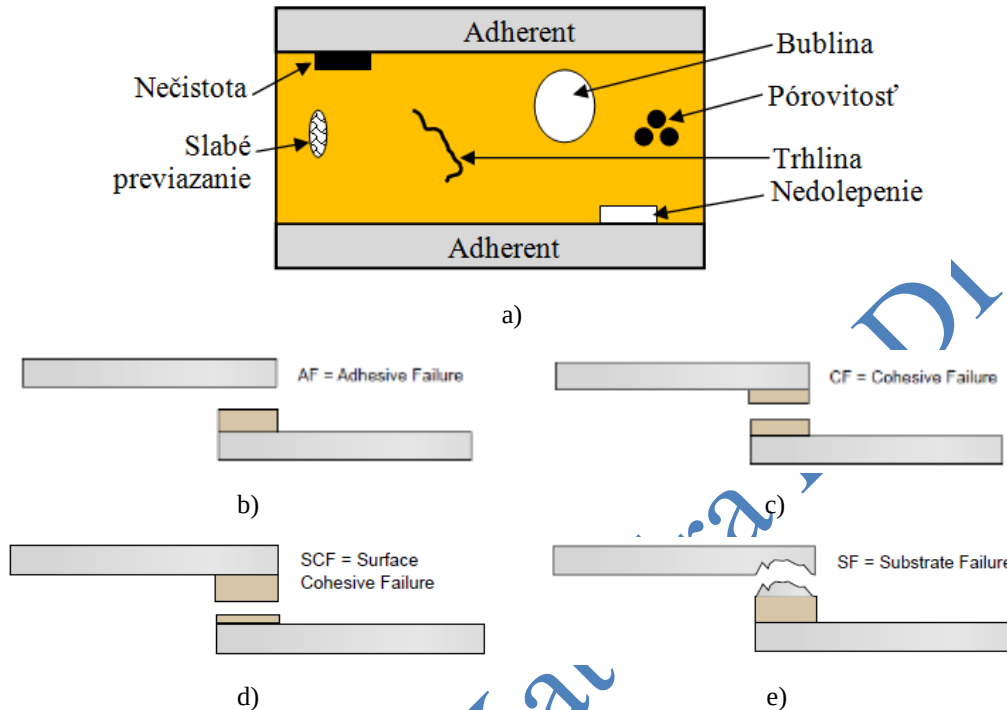


Obr. 4.1 Princíp lepených spojov

Adhézne sily sú ovplyvnené elektrostatickými a chemickými vplyvmi a ako také veľmi závisia na príprave povrchu [28]. Príprava povrchu sa výrazne podieľa na tvorbe defektov, tzv. iniciátorov porúch v lepenom spoji - Obr. 4.2a) [21]. Dobrú príľnavosť je možné dosiahnuť vhodnou prípravou povrchu, kým zlá, alebo žiadna príprava spôsobí, že lepený spoj je slabší a spôsobí nakoniec poruchu. *Poruchy lepeného spoja* sú definované normou EN 10365 a jednotlivé typy porúch je možné charakterizovať nasledovne:

- **Adhézny lom (AF)** - Obr. 4.2b): v prípade adhézneho lomu vzniká porucha v mieste priľnutia lepidla k materiálu; v tomto prípade dochádza k lomovej trhline medzi vrstvou lepidla a materiálu,
- **Kohézny lom (CF)** - Obr. 4.2c): je charakteristický vznikom lomovej trhliny vo vrstve lepidla; lomová trhlina sa šíri v jednej úrovni hrúbky lepidla,
- **Semikohézny lom (SCF)** - Obr. 4.2d): vzniká vo vrstve lepidla tak, že prechádza jednotlivými úrovňami hrúbky lepidla a konvertuje k adherentu,
- **Porucha substrátu alebo adherentu (SF)** - Obr. 4.2e): je to porucha, ktorá vzniká dôsledkom lepeného spoja v spájanom materiáli; pri tejto poruche dochádza k porušeniu základného materiálu, teda substrátu resp. adherentu.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 4.2 Poruchy lepených spojov [20]

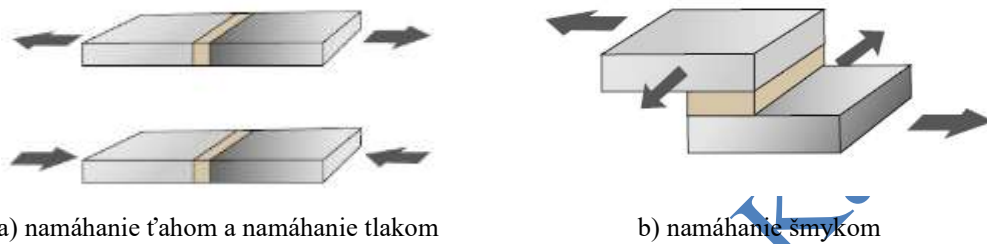
Pre zníženie nebezpečenstva vzniku poruchy v lepenom spoji je potrebná dôkladná príprava procesu lepenia, ktorá pozostáva z nasledovných krokov:

1. *očistenie a odmastenie* – odstráni sa špina, mastnota a iné nečistoty brániace dobrej priľnavosti,
2. *mechanické obrúsenie* – zvyšuje a aktivuje kontaktné povrchy častí, ktoré majú byť spojené,
3. *chemická príprava povrchu* – chemické naleptanie podstatne zvyšuje priľnavosť lepených povrchov k lepidlu, okrem chemického naleptania je možné zvýšiť priľnavosť povrchu pomocou plameňa alebo koronovým výbojom. V prípade rozpúšťadlového lepenia chemické naleptanie materiálu sa nevyžaduje.

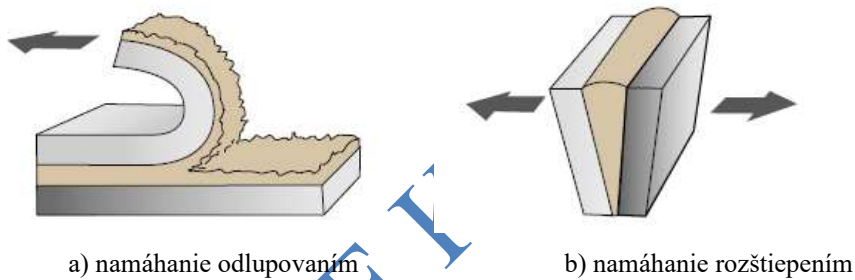
Adhézne a kohézne silové väzby v lepenom spoji zabezpečujú jeho funkčnosť. Je veľmi dôležité, aby lepidlo alebo lepiaca páska v lepenom spoji boli namáhané plošne-dvojrozmerné a nie čiarovo-jednorozmerne. Dvojrozmerné namáhanie lepidla zabezpečuje rozptýlenie zaťaženia po celej kontaktnej ploche lepenia. Za dvojrozmerné

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

namáhanie lepidla sú považované lepené spoje namáhané v ťahu, tlaku alebo v šmyku- Obr. 4.3. Pri jednorozmernom namáhaní je zaťaženie lepidla koncentrované len na hranu línie lepeného spoja. K takýmto druhom namáhania podľa Obr. 4.4 patrí namáhanie v odlupovaní a namáhanie v rozštiepení.



Obr. 4.3 Dvojrozmerné namáhanie lepeného spoja



Obr. 4.4 Jednorozmerné namáhanie lepeného spoja [19]

Pri namáhaní v ťahu je namáhanie rovnomerne rozložené v celej spojovacej ploche. Smer ťahu je priamo v rovine a ťahová sila je rovnomerne rozložená po celej ploche.

Pri zaťažení v tlaku je sila rovnomerne rozložená po celej ploche a vytvára rovnomerné zaťaženie lepidla v spojovanej ploche.

Pri šmykovom namáhaní pôsobí sila rovnobežne s lepenou plochou. Šmykové namáhanie v lepidle núti po sebe sa klzať spájané materiály v lepenej ploche. Namáhanie je rovnomerne rozložené v celej ploche lepenia.

Odlupovanie vznikne pri namáhaní ťahovou silou, ktorá bude nesymetrická a je koncentrovaná na jednej strane lepeného spoja. Jeden zo spájaných materiálov je poddajný, čo sa prejavuje multiplikačným efektom na hrane lepenej plochy.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

K namáhaniu v odlupovaní dochádza prevažne v prípade, ak jeden zo spájaných materiálov je poddajný.

Namáhanie v *rozštiepení* vznikne pri ťahovej sile sústredenej na jednu hranu lepeného spoja, pričom sila bude mať charakter klopnej sily. Na strane pôsobenia sily bude vznikať maximálne zaťaženie, ale na druhej strane lepenej plochy bude namáhanie teoreticky nulové. K namáhaniu v rozštiepení dochádza pri tuhých materiáloch. Efekt odlupovania a rozštiepenia môže byť vyvolaný aj nevhodnou technológiou lepenia alebo pri použití neprimerane hrubej vrstvy lepidla v lepenom spoji.

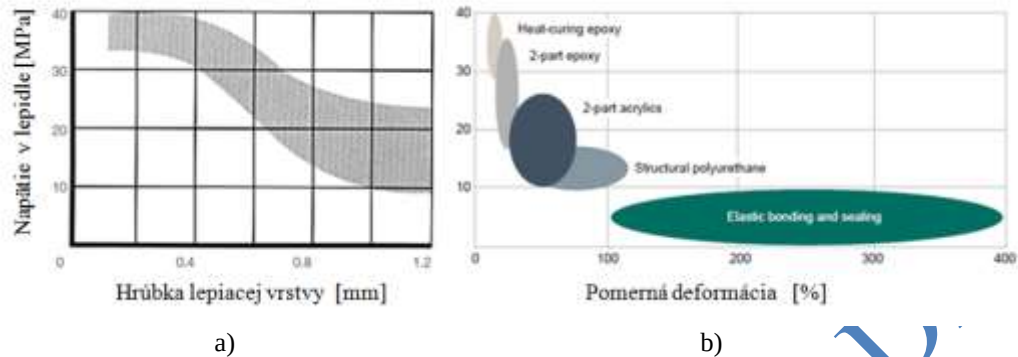
Vo všeobecnosti je potvrdené, že hrubá vrstva lepidla v lepenom spoji spôsobuje nižšiu počiatočnú pevnosť lepeného spoja. Predovšetkým pevnosť lepidla v šmyku klesá, ak je vrstva lepidla hrubá - Obr. 4.5.

Počiatočnú pevnosť a životnosť lepidla je možné u určitých typov lepidiel dosiahnuť aj tepelným procesom vytvrdzovania lepidla pomocou ohrevu.

Adhézna sila na rozhraní lepidlo – materiál je svojou povahou väčšia ako kohézna pevnosť v lepidle. Plocha grafu na Obr. 4.5a) preukazuje, že v lepidlách dochádza k poklesu pevnosti v rozsahu hrúbok vrstvy lepidla od 0,4 do 1 mm. V hrúbkach väčších ako 1 mm je pevnosť v šmyku približne konštantná, ale oveľa nižšia, ako pri hrúbkach lepidla menších ako 0,4 mm. Presný tvar grafu vždy závisí od vlastností konkrétneho lepidla. Optimálna hrúbka vrstvy lepidla v prípade vytvrdzovaných lepidiel je v rozsahu 0,1 až 0,3 mm. Pri veľmi tenkých spojovacích vrstvách existuje riziko narušenia lepovej vrstvy a neúplného vyplnenia lepeného spoja v dôsledku kontaktu maximálnych drsností na povrchoch spájaných materiálov.

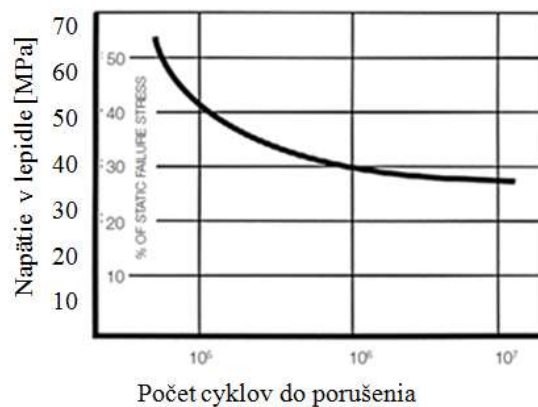
Lepené materiály by mali mať v mieste spojenia rovnaké alebo podobné koeficienty rozťažnosti. Na Obr. 4.5b) je možné pozorovať vplyv adhézných síl rôznych typov lepidiel na pevnosť a pomerné predĺženie lepeného spoja.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 4.5 Vplyv hrúbky lepiacej vrstvy na vlastnosti lepeného spoja [4]

Lepené spoje je možné zaťažovať statickým zaťažením, ale sú vhodné aj pre dynamické zaťaženia. Ak sú lepené spoje konštruované tak, že je namáhanie pri odlupovaní minimálne, poskytujú najdlhšiu životnosť. Únavové testovanie (štandardnými metódami) jednoduchých preplátovaných, šmykom namáhaných spojov vyrobených z epoxidových lepidiel preukázalo, že hodnoty napätia, kedy dochádza k únavovému porušeniu, sú na úrovni cca 30 % hodnoty poruchového napätia od statického zaťaženia - Obr. 4.6.



Obr.4.6 Vplyv napätia v lepidle na životnosť lepeného spoja spoja [4]

Široká použiteľnosť lepených spojov prináša aj široký sortiment lepidiel. *Lepidlá* je možné rozdeliť na základe viacerých kritérií.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Podľa spôsobu vytvrdzovania lepidla:

- lepidlá vytvrdzované odparením rozpúšťadla,
- lepidlá vytvrdzované v dôsledku chemickej vytvrdzovacej reakcie (napr. dvojzložkové lepidlá).

Podľa pôvodu lepidla:

- lepidlá prírodné,
- lepidlá syntetické.

Podľa chemickej reakcia lepidla:

- lepidlá s chemickou reakciou zásaditou,
- lepidlá s chemickou reakciou kyslou,
- lepidlá s chemickou reakciou neutrálnou.

Podľa viskozity lepidla:

- lepidlá viskózne (tixotropné),
- lepidlá zatekavé (riedke).

Vychádzajúc zo zloženia lepidla, jeho pôvodu a ďalších kritérií nadobúda lepidlo aj svoje vlastnosti. Z pevnostných vlastností sa uvádza hodnota pevnosti v šmyku, ktorú je možné vzťahovať k dvojrozmernému namáhaniu lepidla (ťah, tlak, šmyk). Pre jednorozmerové namáhanie lepidla (odlupovanie, rozštiepenie) sa uvádza pevnostná hodnota definovaná na základe sily pôsobiacej na šírku hrany lepiacej plochy. Základné hodnoty pevnosti v šmyku a v odlupovaní, vybraných druhov lepidiel, sú uvedené v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Pevnostné vlastnosti vybraných druhov lepidiel spoja [10]

Druh lepidla	Pevnosť v šmyku pri izbovej teplote [MPa]	Pevnosť v odlupovaní na jednotku šírky [kN/m]
Pressure sensitive	0,01-0,07	0,18-0,88
Starch-based	0,07-0,7	0,18-0,88
Cellosics	0,35-3,5	0,18-1,8
Rubber-based	0,35-3,5	1,8-7
Formulated hot melt	0,35-4,8	0,88-3,5
Synthetically designed hot melt	0,7-6,9	0,88-3,5
PVAc emulsion (white	1,4-6,9	0,88-1,8

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

glue)		
Cyanoacrylate	6,9-13,8	0,18-1,8
Protein - based	6,9-13,8	0,18-1,8
Anaerobic acryl	6,9-13,8	0,18-1,8
Urethane	6,9-17,2	1,8-8,8
Rubber-modified acrylic	13,8-24,1	1,8-8,8
Modified phenolic	13,8-27,6	3,6-7
Unmodified epoxy	10,3-27,6	0,35-1,8
Bis-maleimide	13,8-27,6	0,18-3,5
Polyamide	13,8-27,6	0,18-0,88
Rubber- modified epoxy	20,7-41,4	4,4-14

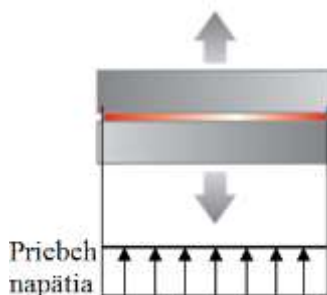
4.2 Konštruovanie a výpočet lepených spojov

Lepenie je často jedinou metódou pre vytvorenie spojenia materiálov, ktoré nie je vzhľadom na ich vlastnosti, tvar, použitie spoja a pod., možné vykonať iným spôsobom spájania.

Únosnosť a v niektorých prípadoch aj deformácia lepených konštrukcií, závisí od mechanických vlastností lepidla a napäťovo-deformačného stavu lepeného spoja.

Konštruovanie lepených spojov je nutné navrhovať tak, aby sa zabezpečilo dvojrozmerné namáhanie lepenej plochy. Z dvojrozmerného namáhania lepenej plochy je najmenej vhodným namáhanie lepenej plochy v ťahu. Vhodnejším spôsobom je namáhanie lepenej plochy v šmyku alebo v tlaku.

K namáhaniu lepenej plochy v ťahu dochádza pri pôsobení sily, ktorá je kolmá na lepenú plochu a ťahová sila spôsobí v lepenom spoji napätie, ktoré je rovnomerné po celej lepenej ploche - Obr. 4.7.



Obr. 4.7 Lepený spoj zaťažovaný ťahovou silou

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Napätie v ťahu je možné potom definovať nasledovne:

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \leq \sigma_D \quad (4.1)$$

kde:

F - zaťažujúca sila,

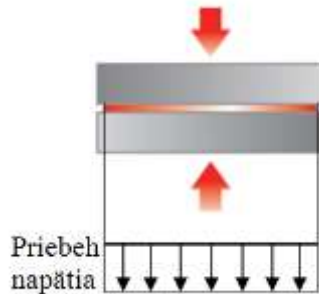
S - dvojrozmerná lepená plocha, $S=b.l$,

b - šírka spoja,

l - dĺžka preplátovania.

Namáhanie lepenej plochy v tlaku je vhodnejším variantom zaťaženia lepeného spoja ako je namáhanie v ťahu. Pri namáhaní v tlaku nedochádza k tak veľkým deformáciám lepenej vrstvy, ako je to v prípade namáhania v ťahu.

K namáhaniu v tlaku dochádza pri pôsobení sily, ktorá je kolmá na lepenú plochu a tlaková sila spôsobí v lepenom spoji napätie, ktoré je rovnomerné po celej lepenej ploche - Obr. 4.8.



Obr. 4.8 Lepený spoj zaťažený tlakovou silou

Napätie v tlaku je potom možné definovať nasledovne:

$$\sigma_d = \frac{F}{S} \leq \sigma_D \quad (4.2)$$

kde:

F - zaťažujúca sila,

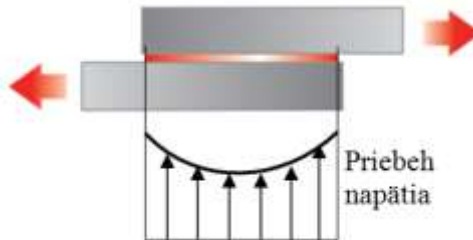
S - dvojrozmerná lepená plocha, $S = b.l$,

b - šírka spoja,

l - dĺžka preplátovania.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Väčšina konštrukcií lepených spojov je navrhovaná tak, aby v spoji vznikalo šmykové namáhanie - Obr. 4.9.



Obr. 4.9 Lepený spoj namáhaný šmykom

Maximálne šmykové napätie v lepenom spoji v dvojrozmernej lepenej ploche - Obr. 4.9 sa nachádza na okraji lepenej plochy a je definované:

$$\tau_s = \frac{F}{S} \leq \tau_{Ds} \quad (4.3)$$

kde:

F - zaťažujúca sila,

S - dvojrozmerná lepená plocha, $S = b \cdot l$,

b - šírka spoja,

l - dĺžka preplátovania,

τ_{Ds} - dovoľené napätie v šmyku lepidla; $\tau_{Ds} = \tau_{Dl}/k$,

τ_{Dl} - pevnosť lepidla v šmyku,

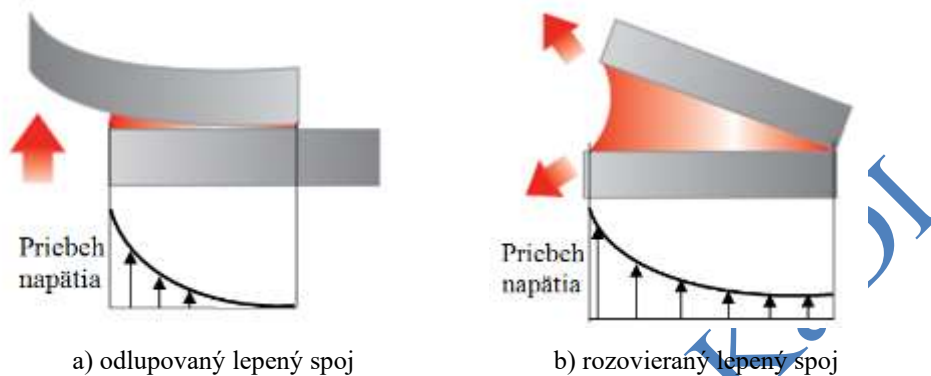
k - bezpečnosť lepeného spoja, $k = 3 \div 4$.

V prípade, ak napäťovo-deformačný stav lepených spojov je nerovnomerný (prípady jednorozmerného namáhania) a porucha spoja začína v mieste, v ktorom napätia dosiahnu pre daný spoj kritické hodnoty, sa definuje počiatočná (absolútna) pevnosť a stredná pevnosť lepeného spoja.

Deformácia jednostranne preplátovaného lepeného spoja v dôsledku excentrického pôsobenia zaťažujúcej sily spôsobí nerovnomerné rozloženie napätia po dĺžke preplátovania – vznikne jednorozmerné namáhanie spôsobujúce odlupovanie

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

alebo rozovieranie lepeného spoja - Obr. 4.10.a),b). Maximálne napätia sú v mieste iniciovania odlupovania resp. rozovierania.



Obr. 4.10 Jednorozmerný lepený spoj namáhaný na odlupovanie a rozovretie [30]

Počiatočná, absolútna pevnosť $\delta_{\max}$ (Nmm^{-1}) a stredná pevnosť δ_s (Nmm^{-1}) lepeného spoja bude definovaná nasledovne:

$$\delta_{\max} = \frac{F_{\max}}{b} \quad (4.4)$$

$$\delta_s = \frac{F_s}{b} \quad (4.5)$$

kde:

$F_{\max}$ - maximálna počiatočná sila odlupovania,

F_s - priemerná sila odlupovania,

b - šírka lepeného spoja.

- Podľa vyššie uvedeného pevnostného rozboru lepeného spoja je nevyhnutné zabrániť namáhaniu lepeného spoja v ohybe a tým odlupovaniu lepenej plochy.

Okrem identifikácie namáhania v lepenom spoji je veľmi dôležité venovať pozornosť spôsobu spojenia lepených materiálov, veľkosti a tvaru lepenej plochy.

Konštrukčný lepený spoj je nutné rozdeliť na jednoduché časti, ktoré sú vhodnejšie na lepenie. Vhodné je vyhnúť sa duplicitnému lepeniu materiálov. Pre lepenie nie sú vhodné časti konštrukcií, ktoré sú počas montáže namáhané odlupujúcimi silami. Pre lepenie nie sú vhodné ani časti s veľkým a zložitým

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

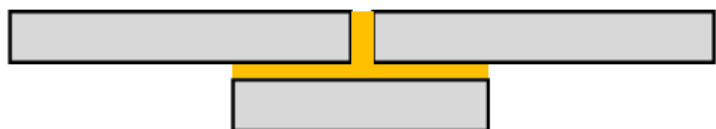
zakrivením. Najvhodnejším prevedením lepených spojov sú spoje preplátované. Vhodnou konfiguráciou tvaru a rozmerov lepenej plochy je možné zvýšiť životnosť lepeného spoja. Na Obr. 4.11 sú uvedené najbežnejšie prípady pre spájanie lepením plochých materiálov, hrubých doskových materiálov a materiálov s kruhovým resp. medzikruhovým prierezom .



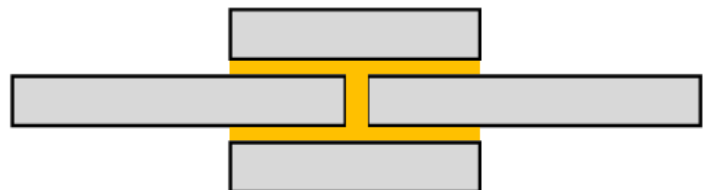
a)



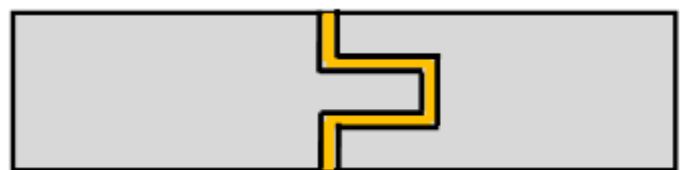
b)



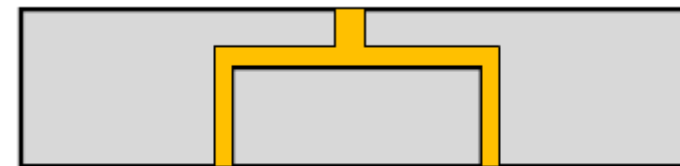
c)



d)

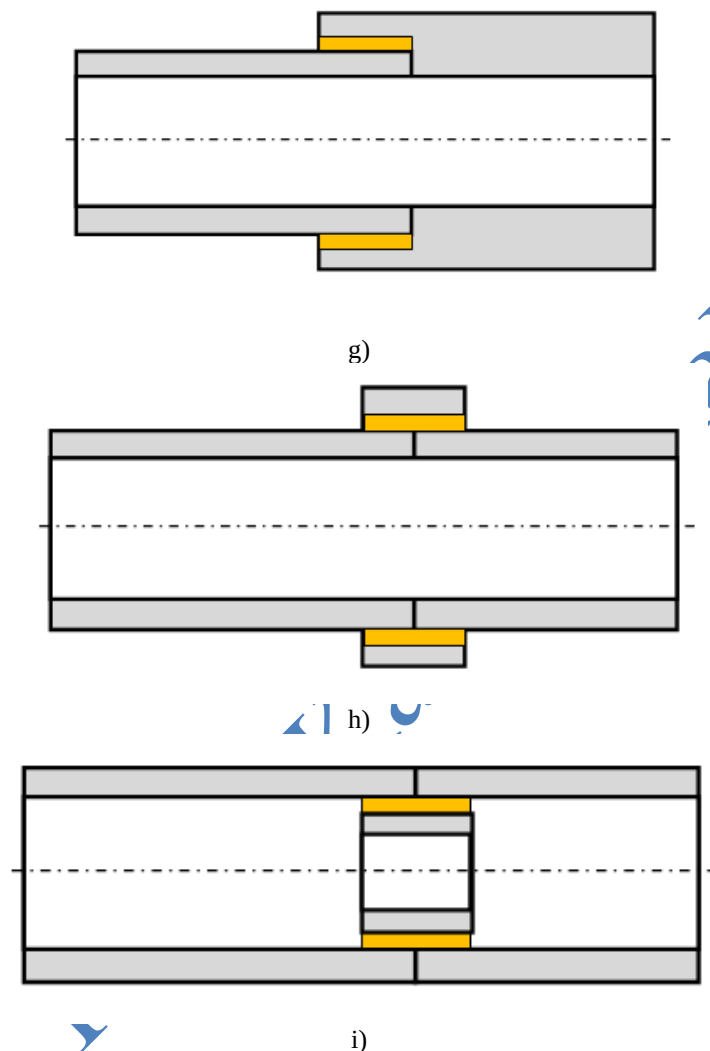


e)



f)

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



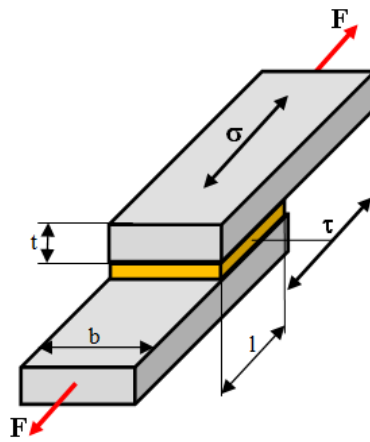
i)
Obr. 4.11 Tvary lepených spojov

Veľmi dobré výsledky pri lepení sa dosahujú pri tenších adherentoch (spájaných materiáloch). Mechanické namáhanie v týchto tenších materiáloch je jednoduchšie rozdeliť rovnomerne a aby sa nesústredovalo len do miesta lepeného spoja. Spoj by mal byť zaťažovaný ťahom alebo tlakom, určite by nemal byť zaťažovaný odlupovaním. Návrh lepeného spoja je nutné realizovať na dostatočne veľkej ploche, aby napätie v spoji a v spájaných materiáloch bolo rovnomerne rozdelené.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Vychádzame zo všeobecných odporúčaní pri lepení, kedy sa volia tenké vrstvy lepidla a používajú menej tvarovo zložité plochy. Rozmer lepenej plochy sa navrhne z podmienky únosnosti lepeného spoja.

V prípade lepeného spoja je potrebné, aby napätia v jednotlivých častiach boli rovnaké. To znamená, aby napätia v spájaných materiáloch, ktorých hrúbka je t , boli rovnaké ako napätie v lepidle - Obr. 4.12.



Obr. 4.12 Voľba rozmerov lepeného spoja

Na základe tejto úvahy je možné únosnosť lepenej plochy pre lepený spoj namáhaný šmykom stanoviť z únosnosti spájaných materiálov nasledovne:

$$F = b \cdot t \cdot \sigma_{Dt} = l \cdot b \cdot \tau_{Ds} \quad (4.6)$$

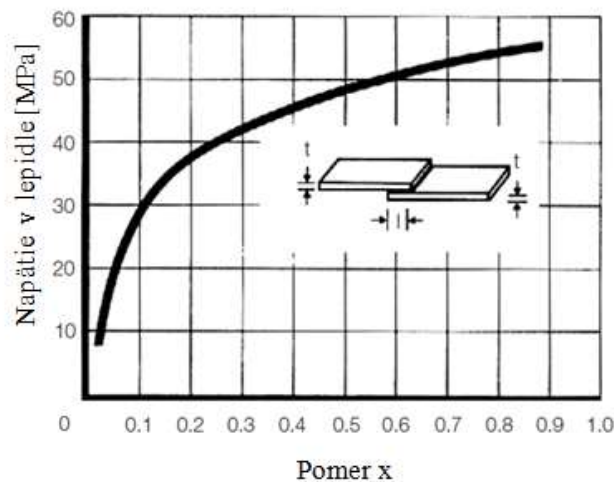
Dĺžka preplátovania lepeného spoja sa vypočíta nasledovne:

$$l = t \cdot \frac{\sigma_{Dt}}{\tau_{Ds}} \quad (4.7)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pomer dĺžky preplátovania v závislosti na hrúbke spájaných materiálov je možné vyjadriť na základe pomeru rozmerov x nasledovne: $x = t/l$.

Pre rýchle určenie predpokladaného napätia v lepenom spoji je možné vyhotoviť závislosť napätia v lepenom spoji na pomere x , tak ako je to prezentované na Obr. 4.13.



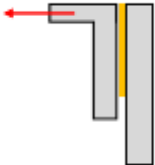
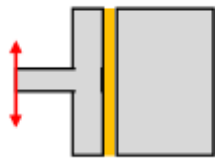
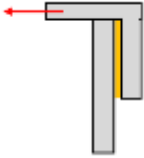
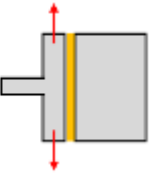
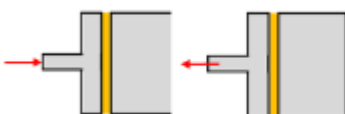
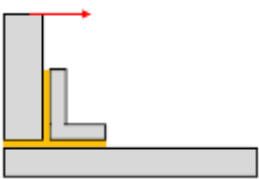
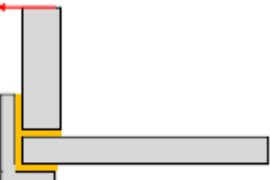
Obr. 4.13 Vplyv rozmeru lepenej plochy na pevnosť lepeného spoja [4] os x - pomer t/l

4.3 Príklady dobrej praxe

Pre zvýšenie únosnosti lepených spojov je možné použiť rôzne tvarové prvky. Príklady vhodných a nevhodných prevedení lepených spojov, v závislosti od ich spôsobu zaťaženia sú uvedené v Tab.4.2.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

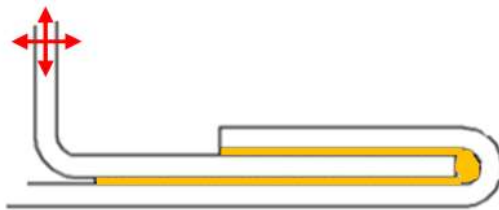
Tab. 4.2 Základné príklady odporúčaných prevedení lepených spojov

Nevhodné prevedenia lepených spojov	
	
	
Vhodné prevedenia lepených spojov	
	
	
	
	
	
	
	

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Z vyššie uvedených informácií o konštrukcii lepených spojov je zrejmé, že na zvýšenie únosnosti lepeného spoja má výrazný vplyv tvar a veľkosť lepenej plochy a hrúbka lepidla. Zväčšenie lepenej plochy je možné zabezpečiť na tenkých spájaných materiáloch aj v podobe lemov – Obr .4.14.

Vhodne zrealizovaný lemový spoj je taký, v ktorom sú lepené plochy rovnobežné, hrúbka lepidla, ktorá vyplní medzeru lemového spoja je rovnaká a pohybuje sa v rozmedzí od 0,1 do 0,2 mm. V mnohých prípadoch je dosiahnutie takéhoto lepeného lemového spoja výrobné obtiažne dosiahnuteľné.



Obr. 4.14 Príklad lemového lepeného spoja pre prenos viacosového zaťaženia

5. Spájkované spoje

Spájkovanie (STN 05 0040) je spájanie kovových aj nekovových materiálov, pomocou roztavenej spájky, pričom spájkované plochy základných materiálov nie sú natavené, ale iba zmáčané použitou spájkou. Spájkovaný spoj je zložený zo základného materiálu, spájky a prechodovej oblasti. Spájkované spoje je možné vyhotoviť ako vodotesné, plynutesné, schopné odolávať rôznym druhom zaťaženia, rázom a vibráciám.

Spájkované spoje je možné vyhotoviť aj z materiálov (ťažko tavitelne materiály, kovy, sklo, keramika), ktoré je veľmi ťažko spájať použitím iných technológií. Spájka použitá na vyhotovenie spájkovaného spoja nemusí mať rovnaké, ani podobné chemické zloženie ako základný materiál, ale musí mať nižšiu teplotu tavenia než spájané materiály. Pri spájkovaní nastáva difúzia, čo je fyzikálno-chemický proces, pri ktorom dochádza k premiestňovaniu atómov (iónov) spájky a podkladového základného materiálu. Atómy spájky a podkladového kovu sa tak dostávajú na malé vzájomné vzdialenosti, prenikajú do narušenej atómovej mriežky spájkovaného kovu, čím dochádza k vzniku spoja.

Podľa spôsobu vyhotovenia spájkovaného spoja rozdeľujeme spájkovanie na:

- **kapilárne spájkovanie** - sú nutné všetky tri vlastnosti (vzlínavosť, zmáčavosť a roztekavosť); vyžaduje sa aby medzera spoja, ktorá sa vyplní roztavenou spájkou pôsobením kapilárnych síl, bola $< 0,5$ mm,
- **nánosové spájkovanie** - postačujúcou vlastnosťou je dobrá zmáčavosť; pri nánosovom spájkovaní sa roztavenou spájkou len zmáčajú spájané plochy a vytvorí sa povrchová vrstva.

Teplota tavenia pri spájkach nie je definovaná len ako jedna hodnota, ale je to v určitom intervale. Napríklad pri spájke 30Sn70Pb je interval tavenia $183 \div 255$ °C (solidus/likvidus) a to zjednodušene znamená, že pri teplote 183 °C sa síce spájka zdá byť tekutá, avšak obsahuje ešte nerozpustené kryštáliky. Až pri dosiahnutí teploty 255 °C a viac sú všetky prvky spájky rozpustené a spájka má požadované vlastnosti.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Interval tavenia $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ hovorí, že spodná a horná hodnota intervalu má byť menšia ako $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Podľa výšky teploty tavenia spájky delíme spájkovanie na:

- **Spájkovanie s mäkkými spájkami** (angl. Soldering) - mäkké spájky s teplotou tavenia nižšou ako $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ s použitím taviva; používajú sa pre pevnostne a teplotne menej namáhané spoje, spájka nesmie byť mechanicky namáhaná. Mäkké spájky sú zložené zo zliatin ťažkých kovov, ktoré saavia pri nízkych teplotách. Základné rozdelenie mäkkých spájok ich vlastností a použitie sú uvedené v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Základné rozdelenie a vlastností mäkkých spájok

Názov spájky	Technologická teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Pevnosť v ťahu / strihu [MPa]	Oblasť použitia
Olovené 96Pb4Ag	305	30÷35/20÷25	Teplotne namáhané spoje
Cínovo – olovnaté 63Sn37Pb 60Sn40Pb 50Sn50Pb 40Sn60Pb	183 188 199 207	45÷50/30÷40	Spájky s obsahom olova sa však kvôli jeho toxicite od roku 2011 nemôžu používať v elektrických a elektronických zariadeniach. Použitie olova je obmedzené na výnimky, kedy ho nie je možné nahradiť inými prvkami, napr. v medicíne alebo vojenskej technike, na vytvorenie elektrických spojov s kryogénnymi snímačmi zdravotníckych pomôcok, apod.
Cínové bezolovnaté 96Sn4Ag 91Sn9Zn 95,5Sn3,9Ag0,6Cu 95Sn5Sb	221 199 217 238	60÷75/30÷60	Pri zvýšenej alebo kryogenickej teplote, pre potravinársky a chladiarenský priemysel, pre spájkovanie skla, na tepelné poistky, chladiče automobilov.
Poznámka: ✓ <i>striebro Ag</i> zvyšuje mechanickú pevnosť a únavovú odolnosť pri zmenách teploty (bez prítomnosti olova), ✓ <i>meď Cu</i> znižuje teplotu tavenia, zvyšuje únavovú odolnosť pri cyklických zmenách teploty, zvyšuje viazanie roztavenej spájky, ✓ <i>zinok Zn</i> znižuje teplotu tavenia, ale je náchylný na koróziu a oxidáciu na vzduchu, ✓ <i>bizmut Bi</i> znižuje teplotu tavenia, zvyšuje zmäčateľnosť, ✓ <i>indium In</i> znižuje teplotu tavenia, zvyšuje ťažnosť.			

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- **Spájkovanie s tvrdými spájkami** (angl. Brazing) - tvrdé spájky s teplotou tavenia 450÷950 °C s použitím taviva; používajú sa pre viac namáhané spoje a spoje pracujúce pri veľmi nízkych (kryogénnych) teplotách. Tvrdé spájky sa používajú na spájkovanie širokého spektra kovov a zliatin. Základné rozdelenie tvrdých spájok ich vlastností a použitie sú uvedené v Tab.5.2.

Tab. 5.2 Základné rozdelenie a vlastnosti tvrdých spájok

Názov spájky	Technologická teplota [°C]	Pevnosť v ťahu / strihu [MPa]	Oblasť použitia
Hliníkové spájky 90Al10Si	600	360/150	Všeobecné strojárstvo, elektrotechnika, vzduchotechnika a klimatizácie, energetika.
Medené spájky 99,9Cu 95Cu5P 60Cu40Zn	1120 850 925	430/250	Všeobecné strojárstvo, elektrotechnika, vzduchotechnika a klimatizácie, energetika, vojenská výroba.
Iné spájky 80Au20Ag Ag,Cu,Zn,Cd Ni,Cr	950 730 1120	240/140	Všeobecné strojárstvo, elektrotechnika, vzduchotechnika a klimatizácie, energetika, zdravotníctvo, potravinárstvo.

- **Spájkovanie s vysokoteplotnými spájkami** (angl. High Temperature Brazing) - vysokotavitelné spájky s bodom tavenia nad 950 °C bez použitia taviva; používajú sa pre vyššie prevádzkové teploty pre spájkovanie v ochrannom plyne (argón, hélium) alebo vo vákuu. Patria sem hlavne spájky na báze Ni-Cr-B, ale aj spájky na báze čistých kovov (Cu, Ni, Pt, Zr, Nb), spájky zo zliatin CuSi, CuAl, CuSn. Vysokoteplotné spájky sa používajú často v automobilovom priemysle pri výrobe spojov na pozinkovaných oceľových plechoch.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Podľa spôsobu spájania materiálov delíme spájkovanie na:

- **Ručné spájkovanie:** na spájkovanie sa používajú ručné spájkovačky. Touto metódou sa dnes spájujú len niektoré špeciálne súčiastky, najčastejšie väčších rozmerov.
- **Spájkovanie vlnou:** pri spájkovaní vlnou je v zásobníku s roztavenou spájkou vytvorená na hladine jedna alebo viac vĺn, ktoré zmáčajú povrch dosky plošného spoja, ktorá sa pohybuje nad hladinou. Zmáčaný je ten povrch, na ktorom majú byť vytvorené spájkované spoje, tá časť zmáčaného povrchu, na ktorú nemá byť aplikovaná spájka, je chránená maskou. Spájkovanie vlnou sa vykonáva na doskách plošných spojov osadených súčiastkami pre povrchovú montáž i súčiastkami s vývodmi vkladanými do dier.
- **Spájkovanie pretavením:** spočíva v nanosení spájkovacej pasty na spájkovacie plochy spoja, na ktorých majú byť vytvorené spájkované spoje. Následné pretavením pasty priechodom spájkovaného spoja pieckou dochádza k vytvoreniu spájkovaného spoja.

Podľa spôsobu dodávania tepla môžeme spájkovanie rozdeliť na:

- Spájkovanie plameňom,
- Spájkovanie ponorením do taviva,
- Spájkovanie elektrickým odporovým ohrevom, ktoré sa využíva najčastejšie,
- Spájkovanie laserom,
- Spájkovanie v peci s ochrannou atmosférou či bez ochrannej atmosféry.

Od spájok sa vyžaduje aby disponovali nasledovnými vlastnosťami:

- *roztekavosť* - schopnosť tekutej spájky rozlúpať sa pri definovanej technologickej teplote po vodorovnom povrchu základného materiálu; je tiež hodnotená veľkosťou zmáčanej plochy,
- *kapilarita / vzliavosť* - schopnosť tekutej spájky vyplniť pri technologickej teplote medzeru spoja pôsobením kapilárnych síl; veľkosť kapilárnej sily je

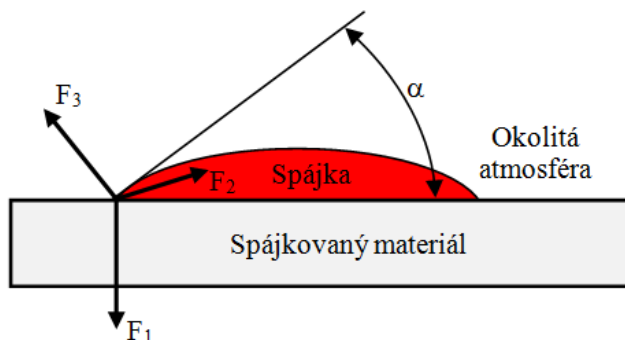
Konštruovanie nerozoberateľných spojov

daná zákonmi hydromechaniky; kapilárne vztlínanie je závislé od druhu spájky, jej povrchového napätia, mernej hmotnosti a veľkosti medzery spoja,

- *zmáčavosť* - schopnosť tekutej spájky prilnúť ku kovovo čistému základnému materiálu pri technologickej teplote; jedna z najdôležitejších vlastností, ktorá zásadne ovplyvňuje kvalitu spájkovaného spoja; pri zmáčaní nadobudne kvapka spájky taký tvar, pri ktorom je povrchová energia systému (základný materiál - spájka - tavný) distribuovaná - Obr. 5.1.

Zmäčavosť úzko súvisí s tekutosťou a roztekavosťou spájky a hodnotí sa na základe tvaru kvapky spájky a uhla α nasledovne:

- ✓ $\alpha = 0^\circ$ až 15° - *zmáčavosť dokonalá* (vhodná pre kapilárne spájkovanie)
- ✓ $\alpha = 15^\circ$ až 75° - *zmáčavosť dobrá* (vhodná pre nánosové spájkovanie)
- ✓ $\alpha = 75^\circ$ až 90° - *spájka zmáčanlivá* (ešte postačujúce pre nánosové spájkovanie)
- ✓ $\alpha > 90^\circ$ - *spájka nezmáčanlivá* (nevhodná pre akýkoľvek spôsob spájkovania)



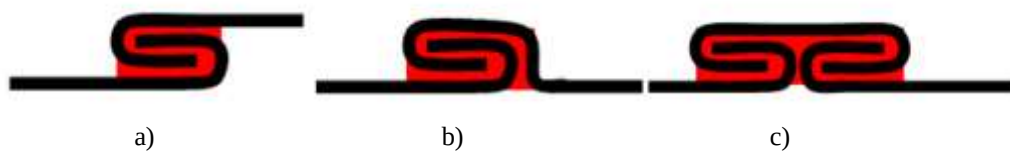
Obr. 5.1. Napätie a sily pôsobiace v systéme základný materiál - spájka – prostredie [54]

F_1 - Adhézna sila, F_2 - Kohézna sila, F_3 - Príťažlivá sila

5.1. Konštruovanie a výpočet spájkovaných spojov

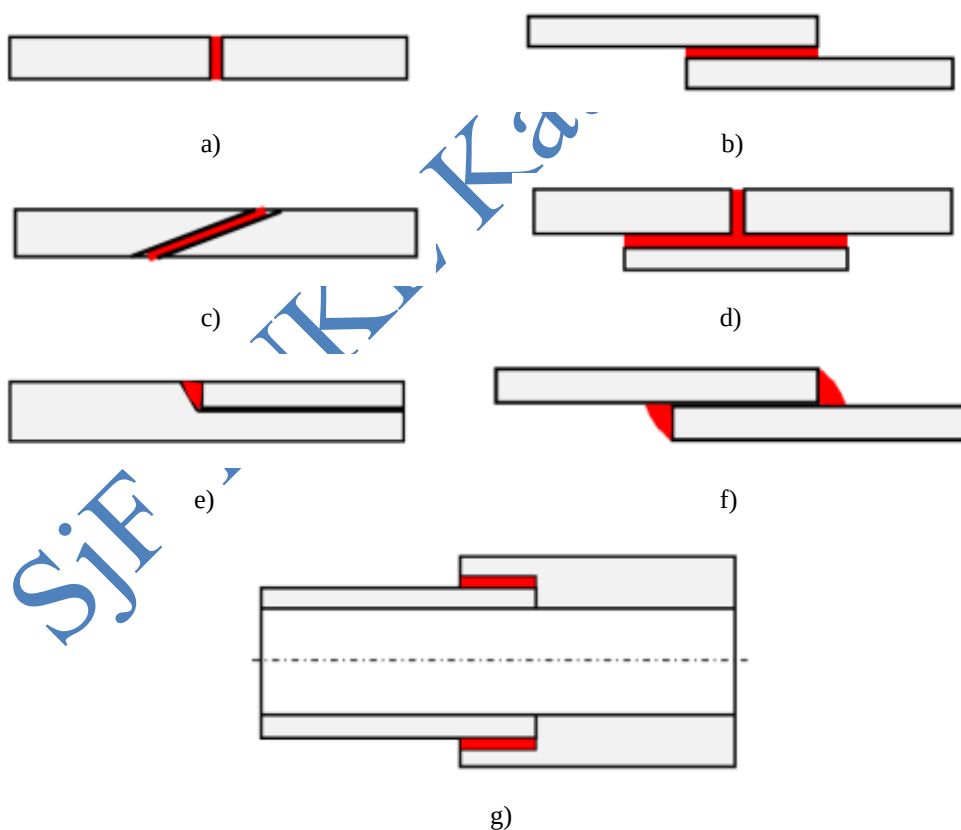
Spájkované materiály je vhodné tvarovať tak, aby samotná spájka prenášala čo najmenšie zaťaženie. Mäkké spájky nie sú vhodné pre spoje, ktoré budú prenášať priame zaťaženie a preto je nutné vyhotoviť lemovanie spájaných materiálov - Obr. 5.2. Lemovanie bude prenášať potrebné zaťaženie pomocou tvarového prvku a spájka vytvorí spojenie tvarovaných materiálov.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 5.2 Tvary spájkovaných spojov pre mäkké spájky

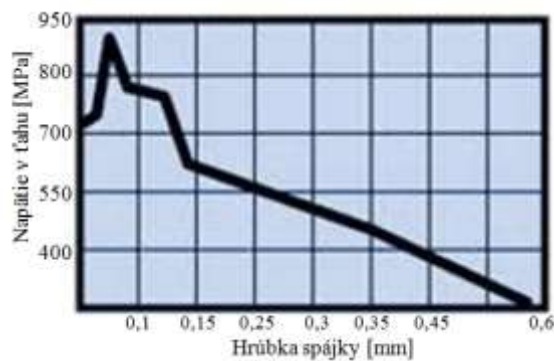
Ak nie je možné vytvoriť na spájaných materiáloch tvarový prvok, ktorý bude prenášať zaťaženie, je nutné použiť tvrdú spájkku. Spájka bude súčasťou zaťažovaného komponentu a v takom prípade musí mať spájkovaný spoj rovnakú únosnosť ako základný spájaný materiál. Spájkované spoje je vhodné voliť tak, aby spájka bola namáhaná ťahom alebo strihom - Obr. 5.3.



Obr. 5.3 Tvary spájkovaných spojov pre tvrdé spájky

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Spájkované spoje vyhotovené pomocou tvrdej spájky nevyžadujú zložité tvarové prvky, je však požadovaná vhodná medzera pre zatekanie spájky. Je dôležité, aby sa medzera nerozširovala v smere zatekania spájky, ale aby bolo zabezpečené dobré vztlínanie spájky. Závislosť pevnosti spájky na veľkosti medzery je na Obr. 5.4.



Obr. 5.4 Vplyv spájkovacej medzery na ťahovú pevnosť spájkovaného spoja

Pre zvýšenie únosnosti spájkovaných spojov je vhodnejšie ich navrhovať ako preplátované spoje alebo s podporným spojovacím materiálom - Obr. 5.3b),d).

Preplátovaný spájkovaný spoj zaťažený silou podľa Obr. 5.5a) bude vo všeobecnosti namáhaný šmykovým napätím, ktoré bude vyjadrené nasledovne:

$$\tau_s = \frac{F}{S} \leq \tau_{Ds} \quad (5.1)$$

Za predpokladu, že únosnosť spoja musí byť rovnaká ako únosnosť základného materiálu, bude návrh rozmerov spájkovaného spoja vychádzať z pevnostnej podmienky nasledovne:

$$F = b \cdot l \cdot \tau_{Ds} = b \cdot s \cdot \sigma_{Dz} = b \cdot s \cdot \frac{R_m}{k} \quad (5.2)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Dĺžka preplátovania sa určí nasledovne:

$$l = s \cdot \frac{\sigma_{Dz}}{\tau_{Ds}} \quad (5.3)$$

kde:

F – zaťažujúca sila,

s – hrúbka spájaných materiálov,

b – šírka spájaných materiálov,

l – dĺžka preplátovania,

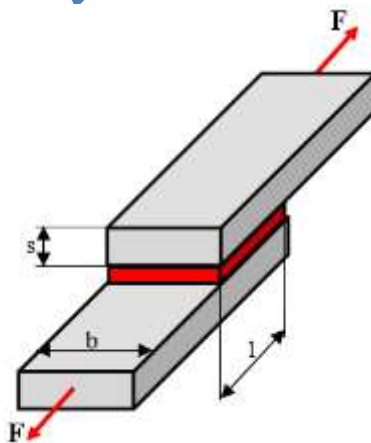
R_m – pevnosť základného materiálu v ťahu,

k – bezpečnosť spoja, zvyčajne $k = 2 \div 4$,

σ_{Dz} – dovoľená pevnosť v ťahu základného materiálu, určená ako R_m/k ,

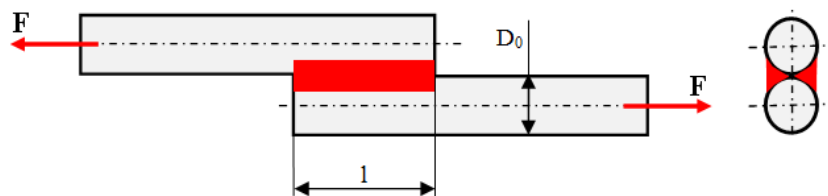
τ_{Ds} – dovoľená pevnosť tvrdej spájky v šmyku (150÷300 MPa).

Pri spájkovaných spojoch vyhotovených mäkkými spájkami môže byť dĺžka preplátovania 4 ÷ 6 násobkom hrúbky tenšieho materiálu, ale nemala by presiahnuť dĺžku 15 mm, $\langle l = (4 \div 6) \cdot s; l_{\max} = 15 \text{ mm} \rangle$. Pri spájkovaní tvrdými spájkami sa odporúča používať dĺžku preplátovania o hodnote 2-násobku hrúbky spájaného materiálu, $\langle l = 2 \cdot s \rangle$.

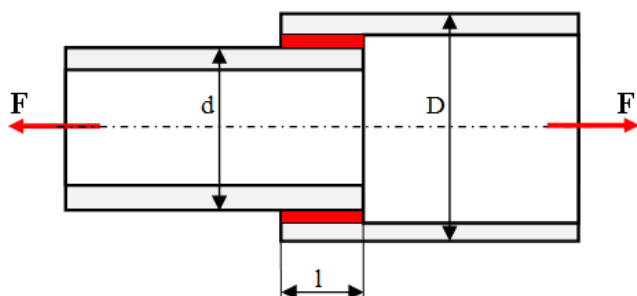


a) spoj dvoch rovinných dosiek preplátovaním

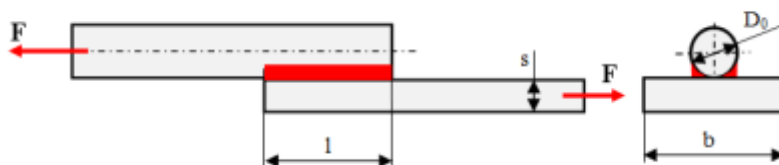
Konštruovanie nerozoberateľných spojov



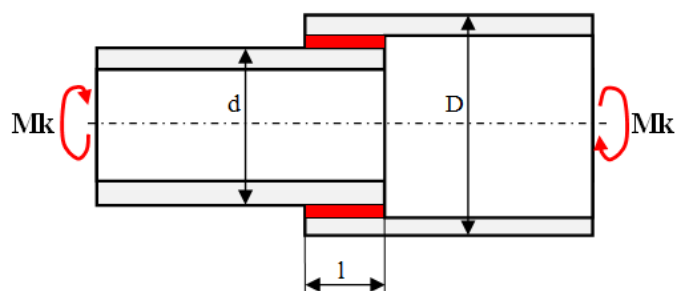
b) spoj dvoch tyčí kruhového prierezu preplátovaním



c) spoj dvoch rúr preplátovaním zaťažených osovou silou



d) spoj tyče kruhového prierezu a rovinnej dosky preplátovaním



e) spoj dvoch rúr preplátovaním zaťažených krútiacim momentom

Obr. 5.5 Rozmery spájkovaného spoja

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Dĺžka preplátovania pre spájanie materiálov kruhových priereзов - Obr. 5.5b)
c) d) e) sa určí nižšie uvedenými postupmi.

Prípad na Obr. 5.5b) predstavuje spojenie dvoch kruhových tyčí pomocou spájkovania. Z pohľadu výpočtu sa jedná o obojstranný spájkovaný spoj o dĺžke l a veľkosti priemetu kruhovej tyče D_0 .

$$F = 2 \cdot D_0 \cdot l \cdot \tau_{Ds} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \sigma_{Dz} \quad (5.4)$$

$$l = D_0 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma_{Dz}}{\tau_{Ds}} \quad (5.5)$$

Na Obr. 5.5c) vidíme prípad spojenia dvoch rúr. Taktiež sa jedná o spájkovanie kruhových profilov preplátovaním o dĺžke l a veľkosti priemeru rúry d a D .

$$F = \pi \cdot d \cdot l \cdot \tau_{Ds} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot \sigma_{Dz} \quad (5.6)$$

$$l = \frac{D^2 - d^2}{4 \cdot d} \cdot \frac{\sigma_{Dz}}{\tau_{Ds}} \quad (5.7)$$

Pre spájkovaný spoj dvoch tenkostenných rúr bude vyjadrená dĺžka preplátovania nasledovne:

$$F = \pi \cdot d \cdot l \cdot \tau_{Ds} = A \cdot \sigma_{Dz} \quad (5.8)$$

$$l = \frac{A}{\pi \cdot d} \cdot \frac{\sigma_{Dz}}{\tau_{Ds}} \quad (5.9)$$

kde:

A - rozmerová charakteristika spoja, ak $h_1 < h_2$ potom $A = \pi \cdot (d - h_1) \cdot h_1$;

ak $h_1 > h_2$ potom $A = \pi \cdot (d + h_2) \cdot h_2$,

h_1 – hrúbka steny vnútornej rúry,

h_2 – hrúbka steny vonkajšej rúry, $D - d = 2 \cdot h_2$,

d – vonkajší priemer vnútornej rúry.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Na Obr. 5.5d) je spojenie tyče kruhového prierezu a rovinnej dosky pomocou spájkovania. Z hľadiska výpočtu sa jedná o jednostranný spájkovaný spoj, kde sa uvažuje priemet kruhovej tyče ako plocha spoja o dĺžke l a veľkosti D_0 .

$$F = D_0 \cdot l \cdot \tau_{Ds} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \sigma_{Dz} \quad (5.10)$$

$$l = D_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\sigma_{Dz}}{\tau_{Ds}} \quad (5.11)$$

Pre spojenie dvoch rúr Obr. 5.5e) pomocou spájkovaného spoja, ktorý je zaťažovaný krútiacim momentom, stanovíme dĺžku preplátovania nasledovne:

$$M_k = \pi \cdot d \cdot l \cdot \frac{d}{2} \cdot \tau_{Ds} = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \cdot \tau_{Dk} \quad (5.12)$$

$$l \cong \frac{d}{8} \cdot \frac{\tau_{Dk}}{\tau_{Ds}} \quad (5.13)$$

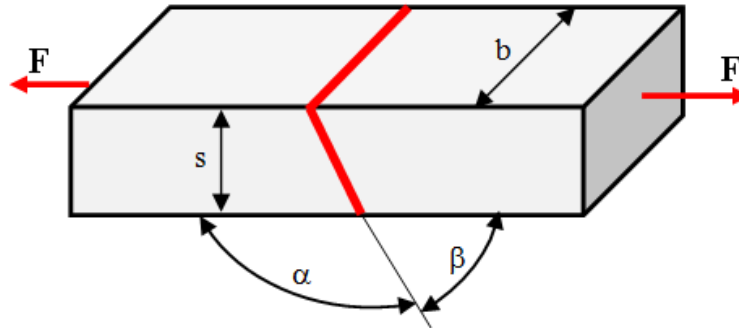
Spojovacia medzera pri použití strieborných a medených spájkovaných komponentov by mala byť $0,05 \div 0,15$ mm. Ak sa používa spájka s vyššou teplotou topenia, medzera by mala byť $0,1 \div 0,2$ mm. Je potrebné sa vyhnúť tesným spojovacím medzerám, ktoré zabráňujú správne roztekaniu a vztlínaniu spájky. Vo všetkých rúrkových spojoch sa používa radiálna medzera.

Tupý spájkovaný spoj prevedený podľa Obr. 5.6a) sa konštruuje z podmienky (5.14):



a) tupý spájkovaný spoj

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



b) šikmý spájkovaný spoj

Obr. 5.6 Spôsob vyhotovenia spájkovaného spoja [33]

$$\sigma_{Ds} = \frac{F}{b \cdot s} \leq \sigma_{Dz} \quad (5.14)$$

Minimálna hrúbka spájaných materiálov podľa Obr. 5.6a) bude:

$$s_{min} = \frac{F}{b \cdot \sigma_{Dz}} \quad (5.15)$$

V spájkovanom spoji prevedenom podľa Obr. 5.6b) bude v dôsledku namáhania vznikáť šmykové aj normálové napätie. Normálové napätie sa určí nasledovne:

$$\sigma_{Ds} = \frac{F \cdot \sin \beta}{b \cdot s} \leq \sigma_{Dz} \quad (5.16)$$

Minimálna hrúbka spájaných materiálov z podmienky na ťah bude:

$$s_{min} = \frac{F \cdot \sin \beta}{b \cdot \sigma_{Dz}} \quad (5.17)$$

Šmykové napätie v spoji bude:

$$\tau_{Ds} = \frac{F \cdot \cos \beta}{b \cdot s} \leq \tau_{Dz} \quad (5.18)$$

Minimálna hrúbka spájaných materiálov z podmienky na šmyk bude:

$$s_{min} = \frac{F \cdot \cos \beta}{b \cdot \tau_{Dz}} \quad (5.19)$$

Za hrúbku spoja sa zvolí väčšia z vypočítaných hrúbok spájaných materiálov.

6 Západkové spoje

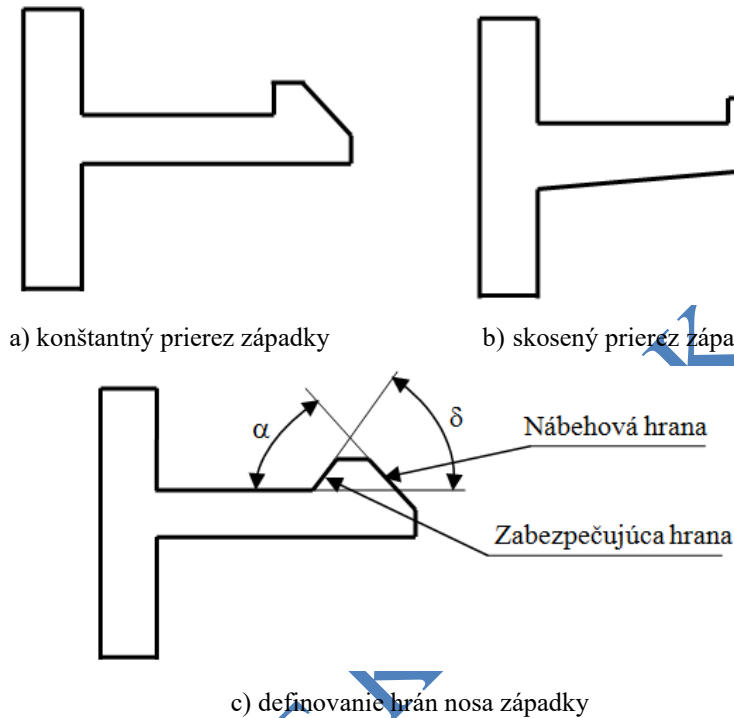
Západkové spoje (angl. Clip), tiež nazývané aj *zaklapavacie spoje*, umožňujú jednoduchý spôsob montáže a demontáže spájaných komponentov. Samotný západkový spoj môže byť vyhotovený ako rozoberateľný, nerozoberateľný alebo ťažko rozoberateľný. Západkové spoje sú vyhotovené v rôznych tvaroch - Obr. 6.1, predovšetkým z kovových a plastových materiálov. Prevažná časť západkových spojov pozostáva zo západky v tvare konzolového nosníka s nosom, ktorý sa vychýli a zapadne do drážky alebo štrbiny v protiláhlej časti.



Obr. 6.1 Tvary západkových spojov [31,32]

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Západky môžu mať konštantný alebo premenlivý (skosený) tvar a prierez, ako je znázornené na Obr. 6.2a)b).



Obr. 6.2 Tvary západky

Montáž a demontáž západkového spoja je závislá na koeficiente trenia f medzi jednotlivými pohybujúcimi sa časťami. Na hodnotu koeficientu trenia má vplyv teplota a akosť povrchu.

Je možné definovať uhol δ zabezpečujúcej hrany nosa západky, pri ktorom sa protíahle časti nedajú samovoľne rozpojiť. Ideálnym prípadom je uhol $\delta=90^\circ$, kedy celá osová sila v západke je zachytená zabezpečujúcou hranou - Obr. 6.3a). V prípade zabezpečujúcej hrany pod všeobecným uhlom δ dochádza na zabezpečujúcej hrane nosa západky k rozkladu síl. V takomto prípade je nutné uvažovať s vplyvom trecieho uhla, ktorý bráni rozpojeniu západkového spoja. Limitným prípadom je uhol δ , definovaný ako rozdiel ideálneho uhla a trecieho uhla, teda $\delta = 90^\circ - \varphi$. Tento uhol je možné definovať ako *limitný uhol samosvornosti* západkového spoja. Stav samosvornosti nastáva za predpokladu, že uhol nosa západky δ je väčší ako rozdiel

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

ideálneho uhla 90° a trecieho uhla φ medzi pohybujúcimi sa časťami západkového spoja. Ak je uhol nosa západky menší ako uhol samosvornosti δ , potom sa spojenie vplyvom osovej sily na Obr. 6.3a) rozpojí. Trecí uhol je možné stanoviť na základe súčiniteľa trenia f medzi časťami západkového spoja $f = \tan \varphi$. Podmienka samosvornosti západkového spoja je vyjadrená rovnicou 6.1.

$$\delta \geq 90^\circ - \varphi = 90^\circ - \arctan(f) \quad (6.1)$$

kde:

f - je súčiniteľ trenia, ktorý sa pre väčšinu plastov pohybuje od 0,3 do 0,6.

Pre súčiniteľ trenia f od 0,3 do 0,6 sa minimálny limitný uhol samosvornosti δ pohybuje v rozsahu od 73° pre plasty s nízkym koeficientom trenia a do 59° pre plasty s vysokým koeficientom trenia.

Avšak, ak je uhol zabezpečujúcej strany väčší ako limitný uhol samosvornosti, potom pre rozpojenie západkového spoja je potrebná prídavná rozpojovacia (demontážna) sila, ktorá zabezpečí potrebný priehyb západky a tým odpojenie západky so spájacej štrbiny Obr. 6.3b).

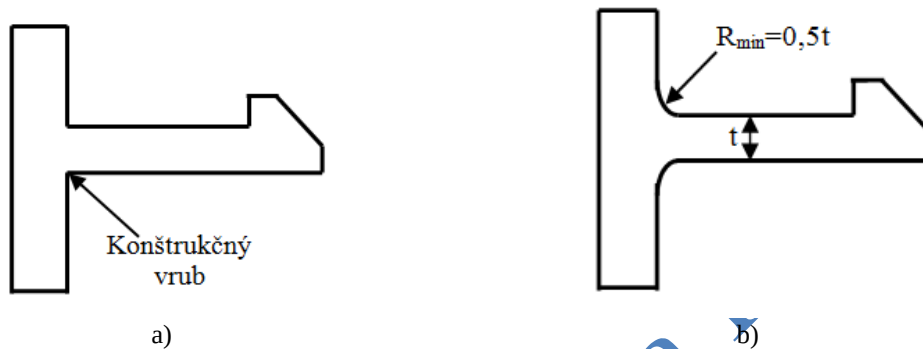


Obr. 6.3. Základné tvary deformácie západky

Samosvornosť západkových spojov sa dá vhodne aplikovať pre rôzne účely použitia západkových spojov. Ak majú byť západkové spoje konštruované ako nerozoberateľné (nikdy ich nesmie rozoberať koncový užívateľ), potom by mal byť uhol zabezpečovacej hrany nosa západky väčší ako limitný uhol samosvornosti. Ak sa však požaduje častá montáž a demontáž, tak západkový spoj je konštruovaný ako rozoberateľný spoj a potom uhol nosa zabezpečovacej hrany nesmie byť väčší ako je limitný uhol samosvornosti.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Častou poruchou pri západkových spojoch je koncentrácia napätia spôsobená ostrým prechodom medzi západkou a stenou, ku ktorej je pripevnená – *koncentrátor napätia* - Obr. 6.4a).



Obr. 6.4. Konštrukčný prechod nosníka západky

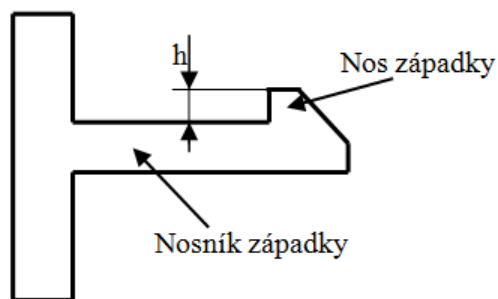
Riešením je použitie väčšieho prechodového polomeru, a to buď na oboch stranách nosníka, alebo najmä na strane ťahového napätia nosníka - Obr. 6.4b). Takéto riešenie však môže vyžadovať dlhší nosník západky.

Ďalšou príčinou poruchy západkového spoja môže byť tečenie (angl. creep) materiálu západkového spoja. V niektorých prípadoch môže nižšia sila v západkovom spoji viesť k vzniku vôle v spojení, ktorá sa prejaví hlukom, vibráciami a klepaním (angl. NVH – Noise, Vibration, and Harshness). Riešením ako minimalizovať tieto nežiaduce vplyvy je konštrukčný návrh nosníka západky s nízkym napätím a kratšou dĺžkou.

6.1 Silové pomery v západkovom spoji

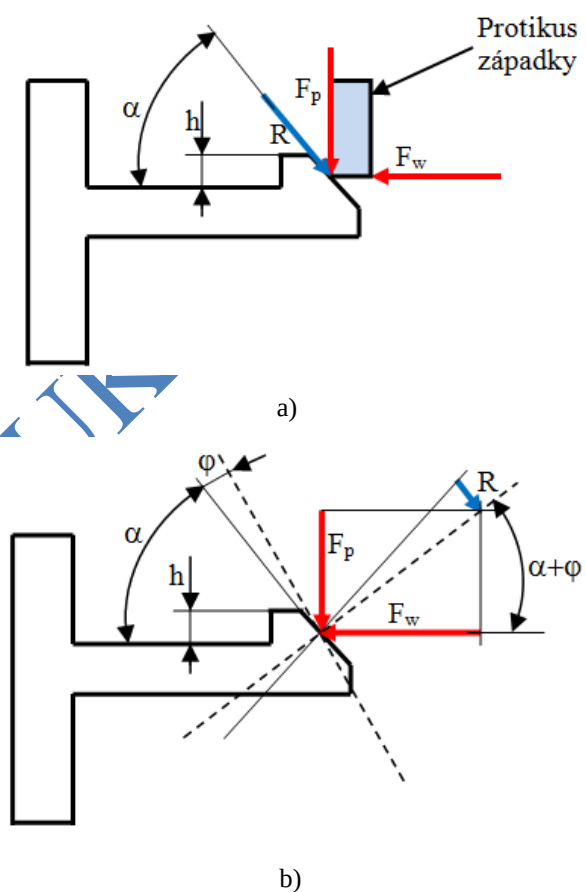
Pri každej aplikácii západkového spoja je hlavnou výzvou konštruktéra nájdenie vyváženosti medzi funkčnosťou západkového spoja zostavy a pevnosťou konzolového nosníka západky. Pred dosiahnutím požadovanej vyváženosti spoja medzi funkčnosťou a pevnosťou je zvyčajné, že samotný spoj prešiel niekoľkými iteráciami t.j. zmenou dĺžky, hrúbky, rozmerov priehybu a ďalších faktorov. Typická západková zostava pozostáva z konzolového nosníka s nosom na jeho konci - Obr. 6.5.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 6.5. Základný tvar západky

Výška nosa h určuje veľkosť deformácie západky počas montáže. Úpravou uhlov na nábehovej a výbehovej strane nosa možno optimalizovať sily pri montáži a demontáži - Obr. 6.6.



Obr. 6.6. Silové pomery na nose západky

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

$$F_w = F_p \cdot \tan(\alpha + \varphi) \quad (6.2)$$

$$f = \tan \varphi \quad (6.3)$$

$$F_w = F_p \cdot \frac{f + \tan \alpha}{1 - f \cdot \tan \alpha} \quad (6.4)$$

kde:

F_w – sila potrebná pre montáž západky,

F_p – sila potrebná na deformáciu západky.

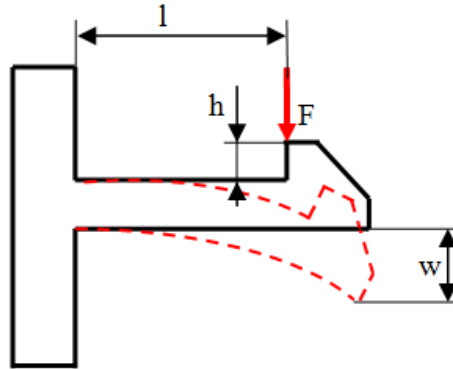
Tuhosť západky a veľkosť nosa na nej určujú potrebné podmienky na montáž alebo demontáž západkového spoja. Konštruktér môže zvýšiť tuhosť západky použitím materiálu s iným modulom pružnosti alebo iným prierezom. Zväčšenie výšky nosa západky môže tiež zlepšiť funkčnosť západkového spoja. So zväčšovaním výšky nosa je potrebné zväčšovať deformáciu západky, čo sa nepriaznivo prejavuje na zvyšovaní napätia v západke.

6.2 Napätie a deformácia západky

K strate funkčnosti západkového spoja dôjde, ak vplyvom deformácie západky pri montáži dôjde k jej trvalej deformácii. K poruche západkového spoja dôjde, ak pracovné napätie v západke bude väčšie ako dovolené napätie materiálu. Takýto poruchový stav sa zvyčajne prejaví lomom západky. Optimalizácia tvaru nosa a prierezu západky je jedným zo spôsobov, ako zabezpečiť, aby bolo možné dosiahnuť požadovanú funkčnosť aj bezporuchovosť západkového spoja.

- Pri návrhu západky je nutné použiť dve základné podmienky. Prvou podmienkou je deformačná podmienka, ktorá má zabezpečiť funkčnosť spoja a má zabrániť trvalej deformácii západky. Deformačná podmienka vychádza z maximálnej dovolenej deformácie západky, čo nám definuje maximálny priehyb, z ktorého je stanovená maximálna výška nosa.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 6.7. Prehyb nosníka západky v závislosti na výške nosa

Podľa Obr. 6.7 musí platiť vzťah (6.5):

$$\varepsilon_{dov} \Rightarrow w_{max} = h_{max} \quad (6.5)$$

kde:

ε - deformácia západky

w - prieťah západky,

h - výška nosa.

Druhou podmienkou je napäťová podmienka, ktorá má zabezpečiť bezporuchovosť západkového spoja. Napäťová podmienka vychádza z predpokladu, že napätie v západke bude menšie ako dovolené napätie materiálu západky, vzťah (6.6).

$$\sigma \leq \sigma_{dov} \quad (6.6)$$

• Pri návrhu západky budeme vychádzať z podobnosti tvaru s konzolovým votknutým nosníkom - Obr. 6.7. Z teórie pre prieťahovú čiaru votknutého nosníka je možné prieťah na konci voľného konca nosníka w vyjadriť podľa vzťahu (6.7) nasledovne:

$$w = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (6.7)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

kde:

F – zaťažujúca sila,

l – dĺžka nosníka,

E – modul pružnosti,

I – kvadratický moment.

Sila potrebná pre montáž a demontáž západkového spoja sa zvyšuje s tuhosťou (k) západky a maximálnym priehybom západky (w). Sila (F) potrebná na vychýlenie západky je úmerná súčinu týchto dvoch parametrov následovne podľa vzťahu (6.8):

$$F = k \cdot w \quad (6.8)$$

Zo vzťahov (6.7) a (6.8) môžeme vyjadriť tuhosť západky nasledovne:

$$k = \frac{F}{w} = \frac{F}{\text{vzorec (6.7)}} = \frac{F}{\frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I}} = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3} \quad (6.9)$$

Za predpokladu obdĺžnikového prierezu západky s hrúbkou t a šírkou b z Obr. 6.8a), je možné vyjadriť kvadratický moment nosníka západky nasledovne:

$$I = \frac{1}{12} b \cdot t^3 \quad (6.10)$$

Po substitúcii vzťahu (6.10) do vzťahu (6.9) dostávame vyjadrenie tuhosti západky nasledovne:

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3} = \frac{3 \cdot E \cdot \frac{1}{12} b \cdot t^3}{l^3} = \frac{E \cdot b \cdot t^3}{4 \cdot l^3} \quad (6.11)$$

Vychádzajúc z prvej podmienky funkčnosti západkového spoja, je nutné aby po montáži západky nevznikli trvalé deformácie.

Tento stav je možné zabezpečiť v oblasti pružných deformácií materiálu, a teda v oblasti platnosti Hookovho zákona, v danej oblasti platí že, $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Pre votknutý nosník je možné vyjadriť maximálne napätie v mieste votknutia pomocou vzťahu (6.12) nasledovne:

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F \cdot l}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot t^2} = \frac{6 \cdot F \cdot l}{b \cdot t^2} \quad (6.12)$$

Do vzorca (6.12) dosadíme za silu F , vyjadrenú silu pomocou vzorca (6.8), a potom napätie v nosníku bude vyjadrené:

$$\sigma = \frac{6 \cdot k \cdot w \cdot l}{b \cdot t^2} \quad (6.13)$$

Do rovnice (6.13) vykonáme substitúciu tuhosti zo vzťahu (6.11) a po úprave dostávame vzťah pre napätie v nosníku

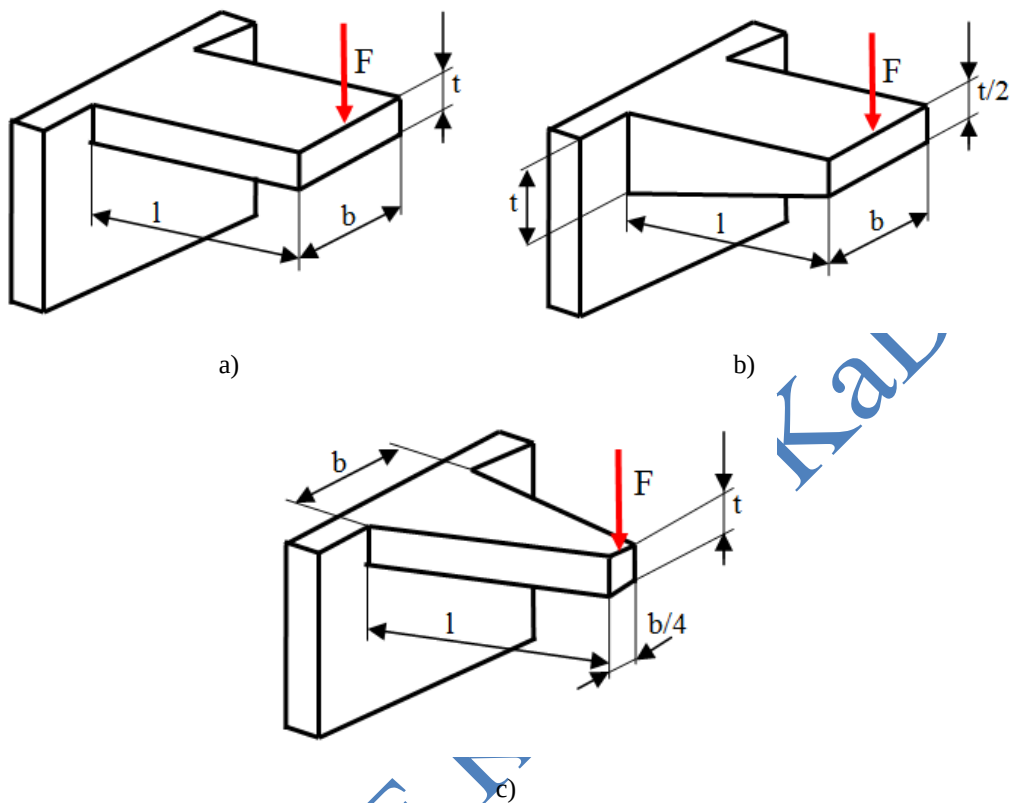
$$\sigma = \frac{6 \cdot k \cdot w \cdot l}{b \cdot t^2} = \frac{6 \cdot w \cdot l \cdot \frac{E \cdot b \cdot t^3}{4 \cdot l^3}}{b \cdot t^2} = \frac{3 \cdot w \cdot E \cdot t}{2 \cdot l^2} \quad (6.14)$$

Napätie z rovnice (6.14) dosadíme do Hookovho zákona a vyjadríme deformáciu západky nasledovne:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{3 \cdot w \cdot E \cdot t}{2 \cdot l^2} = E \cdot \varepsilon \\ \varepsilon &= 1,5 \cdot w \cdot \frac{t}{l^2} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Základný tvar západky môže byť upravený podľa Obr. 6.8 b),c). Na Obr. 6.8b) je upravená hrúbka západky. Hrúbka západky sa lineárne mení po celej dĺžke a nadobúda hodnoty v mieste votknutia t a v mieste voľného konca $t/2$. Na Obr. 6.8c) je zase prípad zmeny šírky západky. V mieste votknutia je šírka západky b a v mieste voľného konca je šírka $b/4$. Šírka západky sa mení lineárne po celej dĺžke. Tuhosť západky a deformáciu západky v oboch modifikovaných prípadoch je potom možné vyjadriť podľa nasledovných rovníc.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 6.8. Základné tvary nosníkov západky

$$k = \frac{F}{w} = \frac{E \cdot b}{6,528} \cdot \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (6.16)$$

$$\varepsilon = 0,92 \cdot \left(\frac{t}{l^2}\right) \cdot w \quad (6.17)$$

$$k = \frac{F}{w} = \frac{E \cdot b}{5,136} \cdot \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (6.18)$$

$$\varepsilon = 1,17 \cdot \left(\frac{t}{l^2}\right) \cdot w \quad (6.19)$$

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

kde:

E – modul pružnosti materiálu,

F – deformačná sila,

w – deformácia nosníka západky,

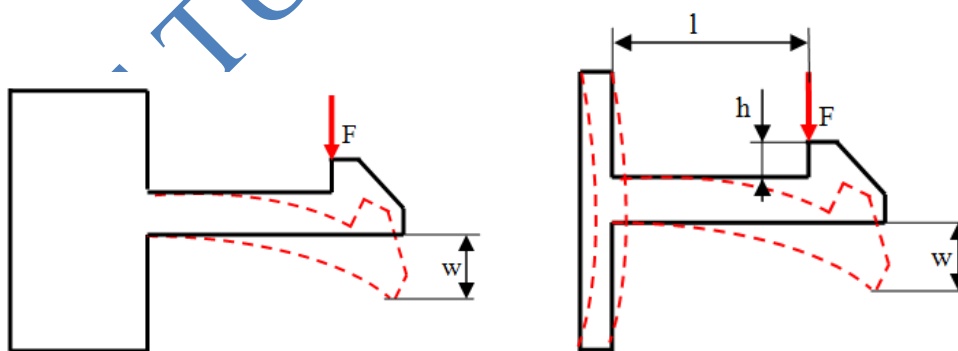
b – šírka nosníka západky,

l – dĺžka nosníka západky,

t – hrúbka nosníka západky.

Dôležitú úlohu pri deformácii a tuhosti západky má samotný materiál, z ktorého je západka vyhotovená. Konštruktéri by mali byť opatrní pri výbere materiálu a jeho module pružnosti E , ktorý môže byť v prípade materiálov pohlcujúcich vlhkosť napr. polyamid, značne rozdielny. V stave za sucha sú hodnoty materiálového listu vhodné na výpočet tuhosti, deformácie alebo prídržnej sily západkového spoja. Avšak fyzikálne vlastnosti sa pri zmene relatívnej vlhkosti znižujú. Tuhosť a prídržná sila môžu poklesnúť, zatiaľ čo priehyb sa zvyšuje.

Veľký vplyv na funkčnosť a bezporuchovosť západkového spoja má i samotné umiestnenie západky. Na Obr. 6.9 sú znázornené dva podklady pre umiestnenie západky. Prvý prípad je umiestnenie západky na tuhom telese, v prípade druhom je západka umiestnená na poddajnom podklade (poddajnej platni). Samotné umiestnenie západky na platni, ktorá je deformovateľná, má rôzny vplyv na funkčnosť západkového spoja.



a) západka umiestnená na tuhom telese

b) západka umiestnená na poddajnej platni

Obr. 6.9. Prípady umiestnenia západky

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

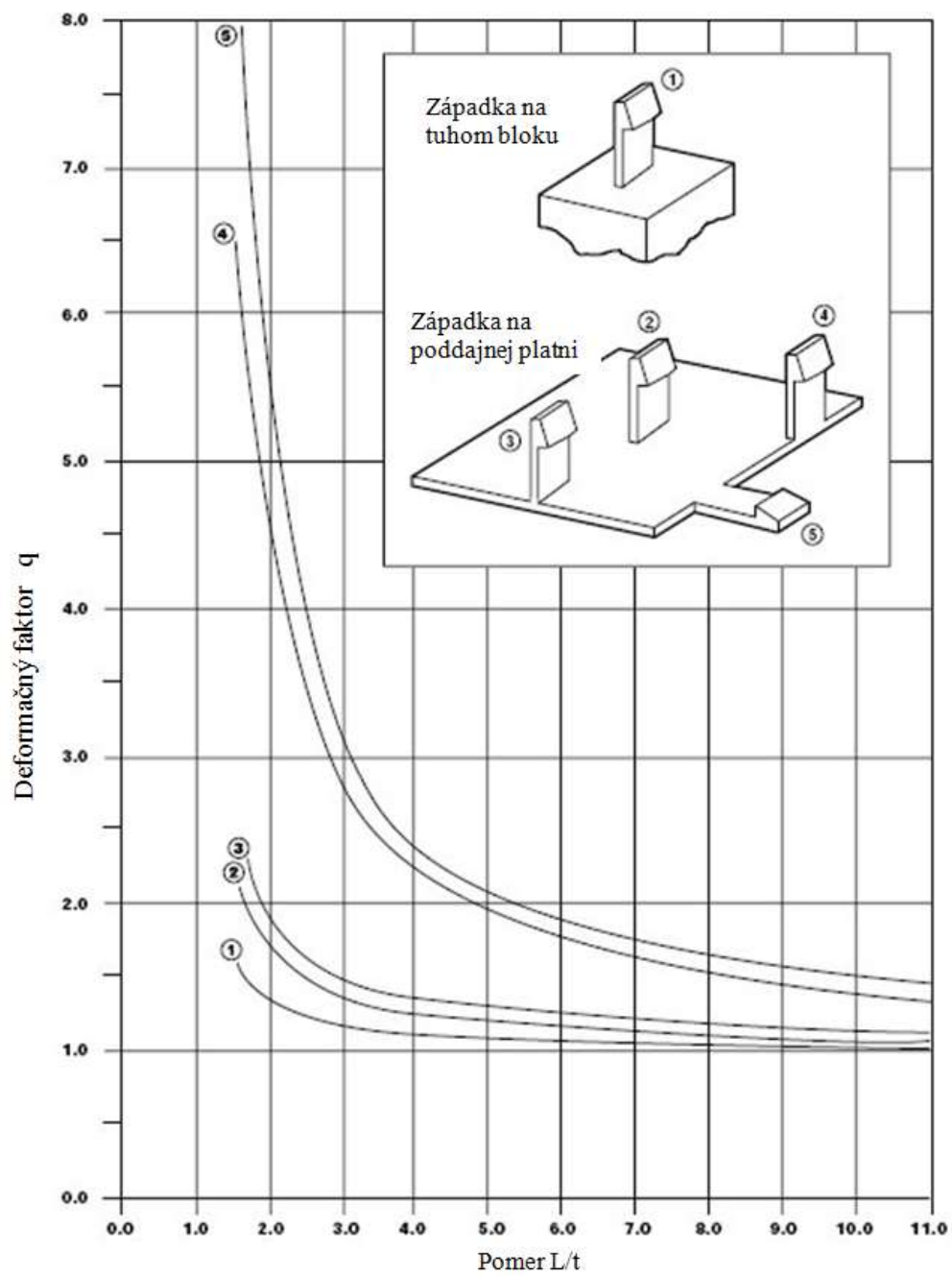
Vzhľadom na pomerne náročné vyjadrenie vplyvu deformácie platne resp. tuhého telesa, je do rovnice pre určenie deformácie západky zakomponovaný korekčný deformačný faktor q , ktorý vyjadruje prídavnú deformáciu miesta umiestnenia západky (6.20).

$$\varepsilon = 1,5 \cdot w \cdot \frac{t}{q \cdot l^2} \quad (6.20)$$

Hodnotu deformačného faktora q je možné odčítať z grafov na Obr. 6.10 a Obr. 6.11.

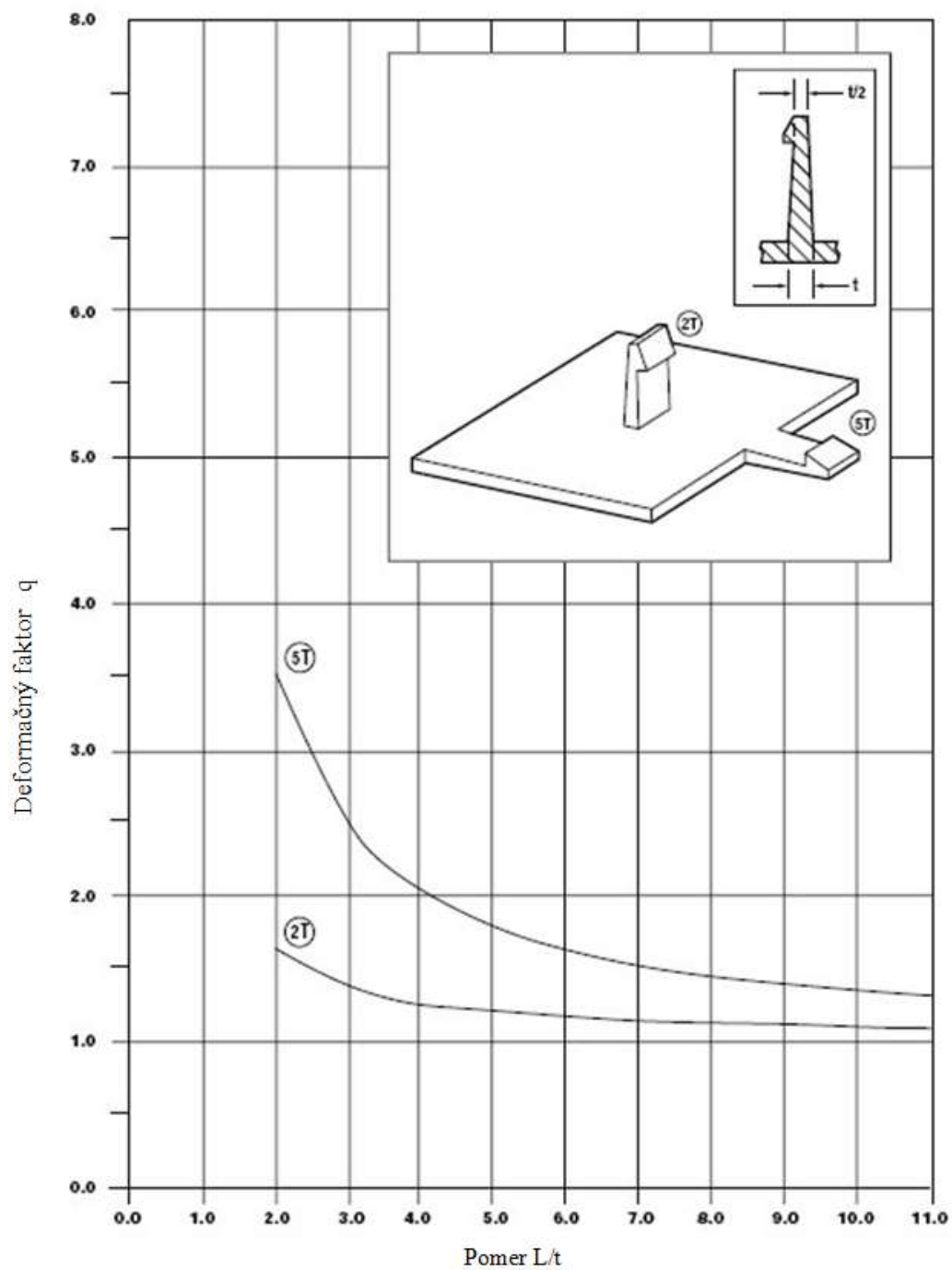
SjF TUKE Katedra KADP

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 6.10. Vplyv deformácie podkladu západky s konštantným prierezom

Konštruovanie nerozoberateľných spojov



Obr. 6.11. Vplyv deformácie podkladu západky s premenlivou hrúbkou

Použitá literatúra

- [1] HOMIŠIN J., a kol. : Základy konštruovania v strojárstve, Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2014, ISBN 978-80-553-1593-5
- [2] MÁLIK L., a kol.: Konštruovanie II, EDIS - vydavateľstvo Žilinskej univerzity v Žiline, 2013, ISBN 978-80-554-0755-5
- [3] BOHÁČEK, F. a kol.: Části a mechanismy strojů I. - zásady konstruování, spoje, ES VUT Brno 1980.
- [4] Users Guide to Adhesives, Huntsman Advanced Materials, 04.07. En.
- [5] BOLEK, A. a kol.: Části strojů 1, SNTL , Praha , 1989.
- [6] KRÁL, Š. a kol.: Části a mechanismy strojov I., STU Bratislava, 2000.
- [7] MÁLIK, L. – MEDVECKÝ, Š.: Časti a mechanismy strojov, ŽU Žilina, 2002.
- [8] P-INDUSTRY, <https://www.p-industry.com/riveted-pieces/?lang=en>
- [9] VIŇAŠ, J. BREZINOVÁ, J., MAŇKOVÁ, I., BREZINA, J.: Technologické a defektoskopické skúšky materiálov, Edícia študijnej literatúry Košice, 2021
- [10] RICHARD G. BUDYNAS, J. KEITH NISBETT.: Shigley's Mechanical Engineering Design, Tenth Edition, Published by McGraw-Hill Education, 2 Penn Plaza, New York, NY 10121., 2015
- [11] R. VASUDEVAN: Engineering Drawing Practice for Schools and Colleges, New Delhi 110002, 2003.
- [12] JOSEPH E. SHIGLEY, CHARLES R. MISCHKE, THOMAS H. BROWN.: Standard Handbook of Machine Design, Third edition, The McGraw-Hill Companies, 2004.
- [13] JOHN M. AMISS, FRANKLIN D. JONES, AND HENRY H. RYFFEL,: Machinery's Handbook 27th Edition, 2004, Industrial Press, Inc., New York
- [14] KUEKA, J.: Projektovanie ocelových konštrukcií I, Technická univerzita v Košiciach, 2014, ISBN: 978-80-553-1617-8

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- [15] Spiros Pantelakis, Konstantinos Tserpes, Revolutionizing Aircraft Materials and Processes, Springer 2020, ISBN 978-3-030-35345-2
- [16] <https://www.adhesivesandcoatings.com/adhesives/transportation-and-automotive>
- [17] 3M Solutions for OEM Repair Procedures, 2018, 60-4402-7996-0 Rev. 04/2019
- [18] DEJL Z.: Konstrukce strojů a zařízení, Montanex, 2000, ISBN 80-7225-018-3
- [19] <https://www.lepidla.cz/clanky/technologie-a-technika-lepeni-zakladni-informace>
- [20] Adhesive Bonding of Aluminium Handbook, Hydro Extrusions AS, Oslo 2021,
- [21] DOUBEK, P. - KOLNEROVÁ, M. Základy technologie lepení karosářských výlisků. Technická univerzita v Liberci, 2014, ISBN 978-80-7494-170-2
- [22] HOMIŠIN, J., MEDVECKÁ – BEŇOVÁ, S., VOJTKOVÁ, J.. : Praktické riešenie úloh v predmetoch konštruovania, Košice, 2013.
- [23] MEDVECKÝ, Š. a kol.: Konštruovanie I, EDIS – ŽU, 2007.
- [24] ČILLÍK, L. a kol.: Konštruovanie I, návody na cvičenia, ŽU v Žiline, 2009.
- [25] BRONČEK, J.,-a kol.: Konštruovanie I, EDIS, Žilina, 2015.
- [26] VÁVRA, P. a kol.: Strojnícke tabuľky pre SPŠ strojnícke, Alfa-press, Bratislava, 2009.
- [27] LEINVEBER, J., VÁVRA, P.: Strojnícke tabuľky, Albra 2005.
- [28] Pocket guide on adhesive bonding ,Atlas Copco Industrial Assembly Solutions SCA Dispensing, 2019.
- [29] <https://armyaviation.tpub.com/AL0992/Hi-Shear-Rivets-38>
- [30] Design Guide for Bonding Plastics, Henkel Corporation Engineering Adhesives, Volume 6, 2011.
- [31] <https://www.walmart.com/>
- [32] <https://www.fastfixtechnology.com/automotive/designed-with-snap-fit-in-mind/>
- [33] https://www.engineersedge.com/solder_joint_design/solder_joint_butt_calc.htm
- [34] <https://aircorpslibrary.com/riveting-with-hi-shears/>
- [35] <https://quizlet.com/178139919/agm-unit-3-special-fasteners-flash-cards/>
- [36] <https://engineeringlibrary.org/reference/rivets-and-lockbolts-nasa-fastener-design-manual>

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- [37] https://www.hfsindustrial.com/us/huck_resists_vibration
- [38] C6L Pin Brazier Aluminium (C) 6.4 mm (1/4") - Star Fasteners
- [39] <https://www.aircraftsystemstech.com/2018/12/special-purpose-aircraft-structural.html>
- [40] https://supplier.aero.bombardier.com/A220-SQA/sqa-docs/quality_docs/QS-003CS_Quality_Standard_for_Installation_of_Hi-Lites.pdf
- [41] <https://www.accufastinc.com/single-post/2017/10/23/what-the-huck>
- [42] https://trsaero.com/monogramaerospace/wpcontent/uploads/sites/3/2018/03/MB_F2003_CL_II_Installation.pdf
- [43] <https://en.jsmh-mach.com/huck-bolts/c50l-sus-carbon-steel-huck-lock-bolts-with-standard-flange-collar.html>
- [44] www.worldrivet.com/what-is-a-lockbolt-rivet/
- [45] <http://www.npfasteners.com/rivetnuts/crs.htm>
- [46] Wang, Jian & Zhu, Chunrun & Yang, Yapeng & Zhang, Yongliang & Bi, Yunbo. (2023). Effect of riveting displacement on the mechanical behavior of CFRP bolted joints with elliptical-head non-lug self-locking rivet nut. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 125. 10.1007/s00170-023-10823-5
- [47] EAA Aluminium Automotive Manual – Joining, 8. Mechanical joining, European Aluminium Association, Version 2015
- [48] https://www.researchgate.net/figure/Installation-and-connection-process-of-EHNL-rivet-nut_fig3_367239401
- [49] WRONICZ, W., KANIOWSKI, J., MALICKI, M., KUCIO, P., KLEWICKI, R., Experimental and Numerical Study of NACA and Conventional Riveting Procedure, Fatigue of Aircraft Structures, 2017
- [50] <http://www.npfasteners.com/blindrivets/rpeellf.htm>
- [51] <https://www.honsel.de/en/products/productdetails/sealed-blind-rivet-certo-alu-steel-dome-head>
- [52] <https://www.wonkeedonkeetools.co.uk/rivets/what-are-the-different-types-of-blind-rivet>

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

- [53] <https://bralo.com/en/types-of-rivets/>
- [54] KUBÍČEK, J. DANEK, L. KANDUS, B. Technologie svařování a zařízení. Učebné texty pro kurzy svařovacích inženýru a technologu. Plzeň, Škoda Welding s.r.o., 2011
- [55] https://www.easternbeaver.com/Main/Elec__Products/Tools/crimping/crimping.html
- [56] <https://www.hoseassemblytips.com/crimp-hydraulic-hose-right-way/>
- [57] <https://www.gsproducts.co.uk/4mm-stainless-steel-wire-rope-ferrule/>
- [58] CR ISO 15608: 2000, Welding — Guidelines for a metallic materials grouping system.
- [59] STN EN 13445 - Nevyhrievané tlakové nádoby.
- [60] AGÓCS, Z., ÁROCH, R., JUHÁS, P., KÁLNA, K.: Navrhovanie zvaraných konštrukcií, 2013, Bratislava, ISBN 80-88734-11-8.

Konštruovanie nerozoberateľných spojov

Autori : prof. Ing. Robert GREGA, PhD.
 prof. Ing. Jozef KULKA, PhD
 doc. Ing. Silvia MALÁKOVÁ, PhD.
 Ing. Lucia ŽUĽOVÁ

Lektori: prof. Ing. Ján Viňaš, PhD.
 doc. Ing. Milan Vaško, PhD.

Názov: **Konštruovanie nerozoberateľných spojov**

Vydavateľ: Technická univerzita v Košiciach

Tlač: Univerzitná knižnica Technickej univerzity v Košiciach

Rok: 2024

Vydanie: prvé

Náklad: 50 ks

Rozsah: 250 strán

ISBN: 978-80-553-4742-4

© Robert Grega, 2024