

Upogibanje verižnih členov

Bending of Chain Links

F. Legat¹, Žirovnica

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-04-21

Opisani so različni postopki upogibanja verižnih členov v odvisnosti od trdnosti jekla in debeline upogibane palice, npr. upogibanje v hladnem, upogibanje v vročem. Opredeljene so spremembe lastnosti jekla v členu in mesta ter vzroki nastanka napak na členih.

Ključne besede: verižni člen, upogibanje, lastnosti jekla

Different method of chain links bending are described in dependence upon the steel tensile strength and rod diameter, as: cold and hot bending. Also the modification of steel properties and the critical points, where cracks appear by bending are discussed.

Key words: chain links, bending, steel properties

1 Uvod

Ena od faz izdelave verig je upogibanje jeklene žice ali palice okroglega profila v obliko člena verige ali obroča, ki ga potem zvarimo. Upogibanje je lahko hladno ali vroče.

2 Upogibanje v hladnem

Jekleno žico ali palico upogibamo pri normalnih temperaturah v obliko verižnih členov na posebnih strojih. V začetni obliki člena so upoštewane vse deformacije, ki nastajajo pri naslednjih proizvodnih operacijah; na primer upognjen člen se pri varjenju nekoliko skrajša in razširi.

Oblika in dimenzije člena se ponovno spremenijo pri predkalibriranju in pri končnem kalibriranju, ki ga opravimo istočasno s preizkušanjem verige.

Hladno upogibanje je problematično, posebno pri izdelavi visokoodpornih verig. Težave se začnejo pri debelinah 20 do 26 mm, ko pogosto nastajajo zareze in razpoke na notranji strani krožnega oboda člena. Upogibanje v hladnem pri oblikovanju verižnih členov zahteva zadostno duktilnost jekla.

Velik vpliv na upogibanje v hladnem imata oblika in velikost kristalnih zrn v jeklu. Pri mehkih jeklih je koristna trakasta mikrostruktura, ki jo jeklo dobi po valjanju. Mikrolegirana jekla je potrebno pred upogibanjem mehko žariti.

Lastnost, pomembna za oceno primernosti jekla za hladno upogibanje, je minimalni upogibni radius, na katerega vplivajo:

- mehanske lastnosti jekla
- upogibni kot
- natezne upogibne napetosti v zunanjih tokovnicah palice

- tlačne upogibne napetosti v notranjih tokovnicah palice

- tokovnice, ki jih jeklo dobi pri valjanju.

V praksi se za določanje minimalnega upogibnega radiusa največkrat uporablja empirična formula:

$$R_{\min} = C_u \cdot S$$

kjer so:

R_{\min} - minimalni radius nevtralne osi upogibanja

C_u - faktor upogibanja, ki je odvisen od mehanskih in tehnoloških lastnosti osnovnega materiala

S - debelina ali premer upogibanca, če gre za okrogel material

Različni materiali imajo različen faktor upogibanja C_u :

Kovina	C_u
jeklo do 0,10% C	0,50 - 0,60
mikrolegirana jekla	1,10 - 1,50
aluminij 99%	0,7
trdi aluminij	1,4
baker	0,2

Kakovostno upogibanje v hladnem je mogoče doseči le po primerni predpripravi materiala, ki prihaja v tovarno kot:

- vroče valjan v palicah ali kolobarjih
- žarjen, ali
- žarjen in vlečen v palicah oziroma kolobarjih.

Pri izdelavi visokoodpornih verig je potrebno upoštevati normo DIN 17115, ki predpisuje:

- jekla, ki se lahko uporabljajo za visokoodporne verige, in
- postopke, kako jekla pripraviti za rezanje in upogibanje, s tem da jih že preje peskajo ali lužijo.

Pri izbiri postopka za pripravo materiala je potrebno upoštevati:

- vrsto jekla in njegove lastnosti pred pripravo
- obdelavo, ki je bila na jeklu že izvršena
- vrsto in kvaliteto verige, ki jo hočemo izdelati
- profil materiala

¹ Franc LEGAT
Zabreznica 36
4274 Žirovnica

- način upogibanja (hladno, vroče)
- vrsto stroja za upogibanje
- način varjenja.

Te dejavnike je potrebno upoštevati tudi pri odločanju za upogibanje v toplem. Material mora imeti po opravljeni pripravi mehanske lastnosti in druge kvalitete v predpisanih mejah ter kvalitetno površino brez razpok, zarez, škake itd. Vsi postopki priprave materiala predpisujejo vsaj mehko žarjenje. Šele primerno mehka jekla lahko režemo na surovce brez napak ob rezih. Vroče valjana jekla, ki jih samo mehko žarimo, jih v hladnem upogibamo le do premera 20 mm, nad to dimenzijo pa v vročem.

Jekla za hladno upogibanje:

- morajo biti valjana v mejah toleranc
- ne smejo imeti ovalnosti
- imeti morajo lepo gladko površino in
- biti lepo navita na kolute, ki omogočajo upogibanje na strojih.

Sferoidizacijsko žarjenje je boljša priprava vroče valjanega jekla za upogibanje kot mehko žarjenje. Pri tem žarjenju ves cementit koagulira v kroglasta zrnca in tako nastane za hladno preoblikovanje najbolj primerna mikrostruktura. Jeklu se zmanjšata meja plastičnosti in trdota, površina žice pa ostane nespremenjena. Mehko žarjeno vroče valjano jeklo hladno upogibamo do premera 26 mm, če:

- je pri žarjenju v celoti dosežena sferoidizacijska mikrostruktura,
- je površina brez napak in
- se da upogibati na strojih s kolutnim upogibalnim orodjem.

Drugi postopki priprave jekel za hladno upogibanje so:

- vlečenje žice
- mehko ali sferoidizacijsko žarjenje in
- eventualno ponovno vlečenje.

Postopki so dragi, vendar pa nujni za kvalitetno in nemoteno upogibanje. Z njimi se odpravijo ali zmanjšajo napake na valjanem jeklu, na primer: dimenzijska odstopanja, ovalnost, površinske napake kot so zareze, luske, razpoke, zavaljanost, škaja in deloma razogljivenost.

Pri prvem vlečenju vroče valjane jeklene žice se s pravilno deformacijo odpravijo vsa dimenzijska odstopanja preseka, odpravijo ali zmanjšajo pa se tudi površinske napake. Površinsko pregloboko razogljivenost pa po vlečenju popravimo na dopustno globino, da jeklo dobi ustrezno trdoto po poboljšanju. Vroče valjana jekla imajo včasih zelo različne trdote in mesta s povečano trdoto zaradi prehitrega ohlajanja na dotikih s hladnimi vodili, zaradi prepaha pozimi in zaradi hladilne vode po koncu valjanja.

Tudi natezna trdnost ni enakomerna in lahko niha pri isti vrsti jekla med 700 in 900 N/mm². Jekleno žico po prvem hladnem vlečenju žarimo, jeklo postane mehko in dobi enakomerno trdoto. Zniža se tudi meja plastičnosti,

kar je ugodno pri stiskanju člena v fazi varjenja. Prav žarjenje naj bi jeklu dalo mehanske lastnosti, ki so potrebne za dobro upogibanje.

Po žarjenju se navadno jeklena žica še enkrat vleče z nekaj odstotki odvzema na pravilno dimenzijo, površina pa je bolj gladka in čista. Čista površina žice je pomembna za dober kontakt elektrod pri varjenju člena.

Temeljito pripravo jeklene žice za upogibanje v hladnem narekujejo sodobni upogibalni stroji, ki so mnogo hitrejši od klasičnih in zagotavljajo boljše kvaliteto upogibanja materiala, vse do premera 26 mm. Zato je pričakovati, da se bodo v bodoče vsa jekla do ϕ 26 mm upogibala hladno.

Za vsa jekla po normah DIN 17115, ki se uporabljajo za izdelavo verig, je predpisan tehnološki upogibni preizkus, s katerim ugotovimo preoblikovalno sposobnost jekla v hladnem. Predpisuje ga standard JUS C.A4.005 iz leta 1962, ki odgovarja zahtevam ISO. Standard je predpisan za preizkušance okroglega premera do 30 mm in z dolžino:

$$L = 5 \cdot a + 150 \text{ mm (a = premer preizkušanca)}$$

Preizkušanec upogibamo na dveh paralelnih valjih, ki imata polmera:

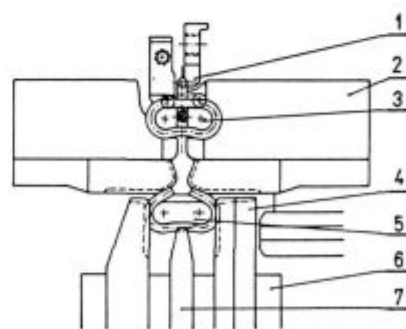
R = 25 mm, če je premer manjši od 12 mm in

R = 50 mm, če je premer večji od 12 mm in

sta razmaknjena za približno (D + 3a).

D je premer valja, s katerim obremenjujemo vzorec na sredini. Za preizkus mikrolegiranih jekel za visokoodporne verige je D = a = premer žice in je razmik valjev približno 4 a. Za jekla za verige po DIN 5687 in DIN 22252 (bremenske in rudarske verige) je predpisan upogib okrog valja - trna premera D = a za upogibni kot 180°. Preizkusno upogibanje mora potekati počasi in neprekinjeno.

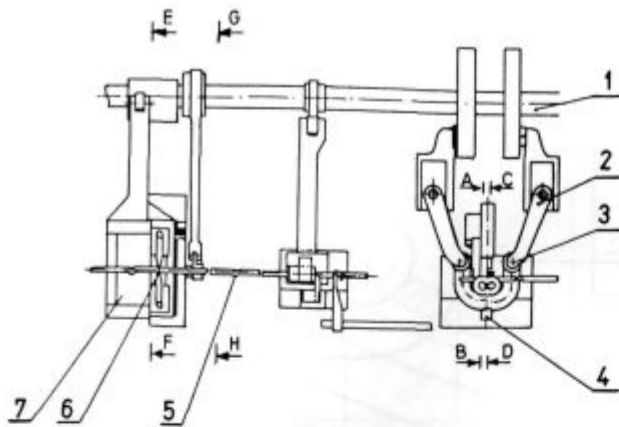
Za hladno upogibanje žice ali palic v člene sta poznana dva sistema: KEB in KER.



Legenda :

- 1 - zadrževalec
- 2 - desni upogibalec
- 3 - krivilni trn
- 4 - oblikovalec, desni
- 5 - sprednji trn
- 6 - drsna plošča
- 7 - kleščne čeljusti

Slika 1: Sistem upogibanja ravne palice KEB v verižni člen
Figure 1: KEB system of bending of a straight rod to a chain link



Legenda :

- 1 - dvigalo
- 2 - upogibni valjček
- 3 - zaščitni valjček
- 4 - obračalne klešče
- 5 - odtis
- 6 - križni odrez
- 7 - upogib hrbtna

Slika 2: Sistem upogibanja ravne palice KER v verižni člen
Figure 2: KER system of bending of a straight rod to a chain link

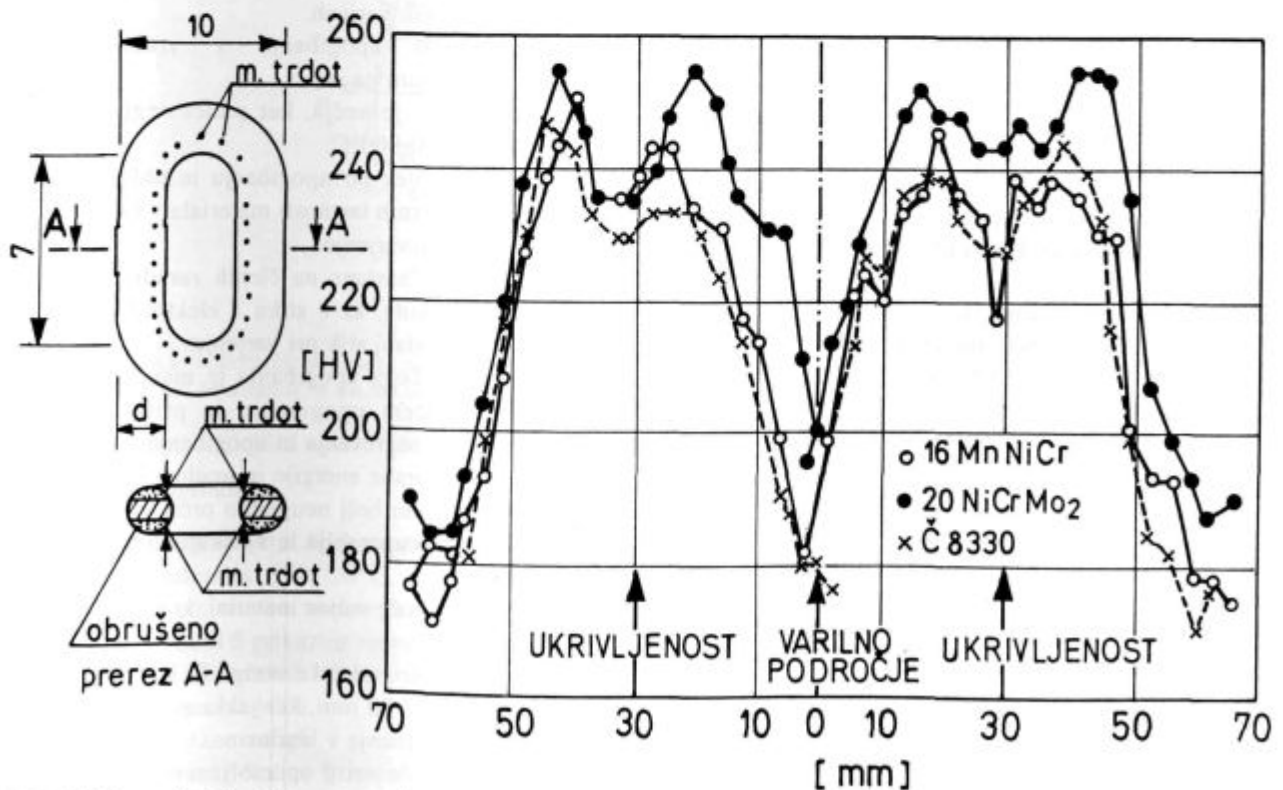
Sistem KEB (slika 1) je star, klasični sistem z upogibalci in trni. Dober je za upogibanje nelegiranih jekel po DIN 17115, ki imajo do 0,20% C, maksimalno natezno trdnost 700 N/mm^2 in najmanj 10% razteznost A5. Pri novih jeklih pa sistem KEB ni več uporaben, ker so upogibani členi preveč neenakomerno izoblikovani, ima pa še druge nesprejemljive napake. Oba sistema z osnovnimi deli orodja sta prikazana na slikah 1 in 2.

Sistem KER (slika 2) ima namesto klasičnih upogibalcev posebno orodje s koluti. Uporablja se za visokoodporne verige. Zagotavlja, da so členi, ki prihajajo iz stroja:

- enakomerni
- simetrični
- brez posebnih odtisov in
- brez elastičnih napetosti v hrbtnem delu člena.

3 Spremembe v jeklu zaradi hladnega upogibanja

Zaradi hladnega upogibanja žice ali palice v verižne člene se spremenijo nekatere lastnosti jekla. Te spremembe so neenakomerne in odvisne od lokacije na členu in upogibnih deformacij na tem mestu, v manjši meri pa nanje vpliva tudi hitrost upogibanja. Trdote na notranjih straneh člena se povečajo, največ na ukrivljenih delih člena, kjer so deformacijske spremembe največje, manj pa v ravnem delu. Povečanja trdote v krivinah zaradi



Slika 3: Trdota na obeh straneh zvarnega spoja
Figure 3: Hardness both sides of the welded joint

hladne obdelave in tudi zaradi staranja so lahko tako velike, da presegajo dovoljene vrednosti.

Na **sliki 3** je prikazano povečanje trdote na notranji strani členov, ki so bili hladno upognjeni na upogibalnih strojih s koluti za jekla.

- Č 8330 ($Re = 410-490 \text{ N/mm}^2$)
- 20 NiCrMo 2 ($Re = 480-510 \text{ N/mm}^2$) in
- 16 MnNiCr ($Re = 420-460 \text{ N/mm}^2$)

Vpliv hitrosti upogibanja členov se kaže v tem, da so tokovnice v krivinah bolj poudarjene pri hitreje upognjenih členih.

Zaradi oblik in zaradi vpenjalnih naprav ni mogoče vedno ugotavljati natezne trdnosti v členih, zato merimo trdoto po Brinellu, ki jo nato pretvorimo v natezno trdnost, tako da jo pomnožimo z 0,36. Tako dobljena trdnost sicer ni točna, ker so to točkovne vrednosti, vendar za praktično uporabo zadošča in je primerljiva.

4 Vroče upogibanje

Za vroče upogibanje narežemo iz palic enako dolge odrezke, ki jih potem peskamo, redkeje lužimo. Nato jih z električnim tokom uporovno segrejemo (konduktivno gretje) na temperaturo 760-800°C. Tako segrete nato upognemo na strojih za toplo upogibanje. Manjši stroji lahko upogibajo v toplem palice s premerom do 36 mm, v hladnem pa do 22 mm. Za sidrne verige uporabljamo večje stroje, princip upogibanja pa je enak.

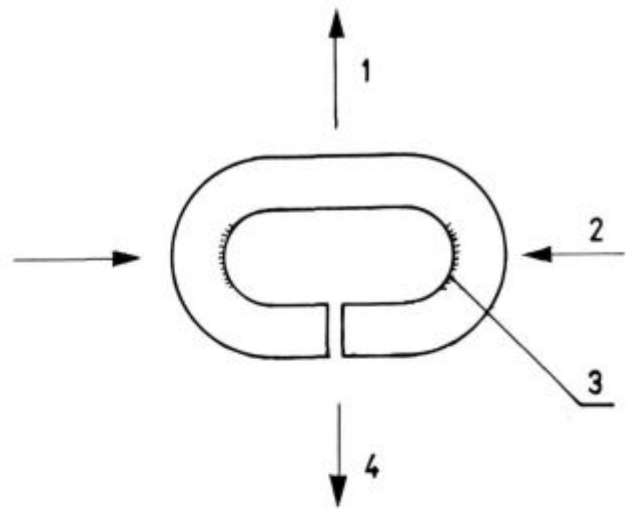
Na vroče upognjenih členih (**slika 4**) pride po upogibanju in ohlajanju do različne mikrostrukture na različnih mestih zaradi različnega ohlajanja in deformacij. Na mestih hitrega ohlajanja pride do zakalitev (utrđitev) z martenzitno mikrostrukuro, na mestih s počasnejšim pa do direktnega izotermičnega poboljšanja jekla, ki ima dobro mikrostrukuro, med mehkim perlitom in martenzitom. Pri upogibanju v vročem so navadno najtoplejši deli v radiusu znotraj člena (zaradi plastičnih deformacij), ki se tudi najraje zakalijo in so po upognitvi najtrši.

Pri zadnji fazi varjenja, ko člen stiskamo v vzdolžni smeri ima le-ta tendenco, da se skrajša in razširi navzven, ker nima paralelnih ravnih krakov, ampak je za nekaj stopinj napet navzven od vzdolžne osi. Zato pride pri stiskanju v radiusu znotraj člena do nateznih obremenitev (člen se hoče razširiti). Te natezne napetosti lahko povzročijo v zakaljeni - trdi coni v radiusu znotraj člena napake v obliki razpok in nesimetričnosti členov.

Če člene varimo s predgrevanjem z zadosti visoko temperaturo, utrditve zaradi conskih zakalitev ni in se nevarnost nastanka napak zmanjša. To izkoriščamo v praksi, zato vroče upognjene člene varimo obžigalno s predgrevanjem ter se tako izognemo zakaljenim mestom.

Prednosti vročega upogibanja pred hladnim so v proizvodnji visokoodpornih verig naslednje:

- Priprava vroče valjanega jekla za vroče upogibanje je enostavna in poceni (mehko žarjenje, rezanje surovcev, čiščenje s peskanjem - včasih luženje).



Legenda:

- 1 - bočna sila zaradi pritiska pri varjenju
- 2 - sila stiskanja pri varjenju
- 3 - zakaljena cona znotraj krivine člena
- 4 - mesto običajno zakaljene cone in nastanka razpok

Slika 4: Shema verižnega člena pred varjenjem

Figure 4: Scheme of the chain link before welding

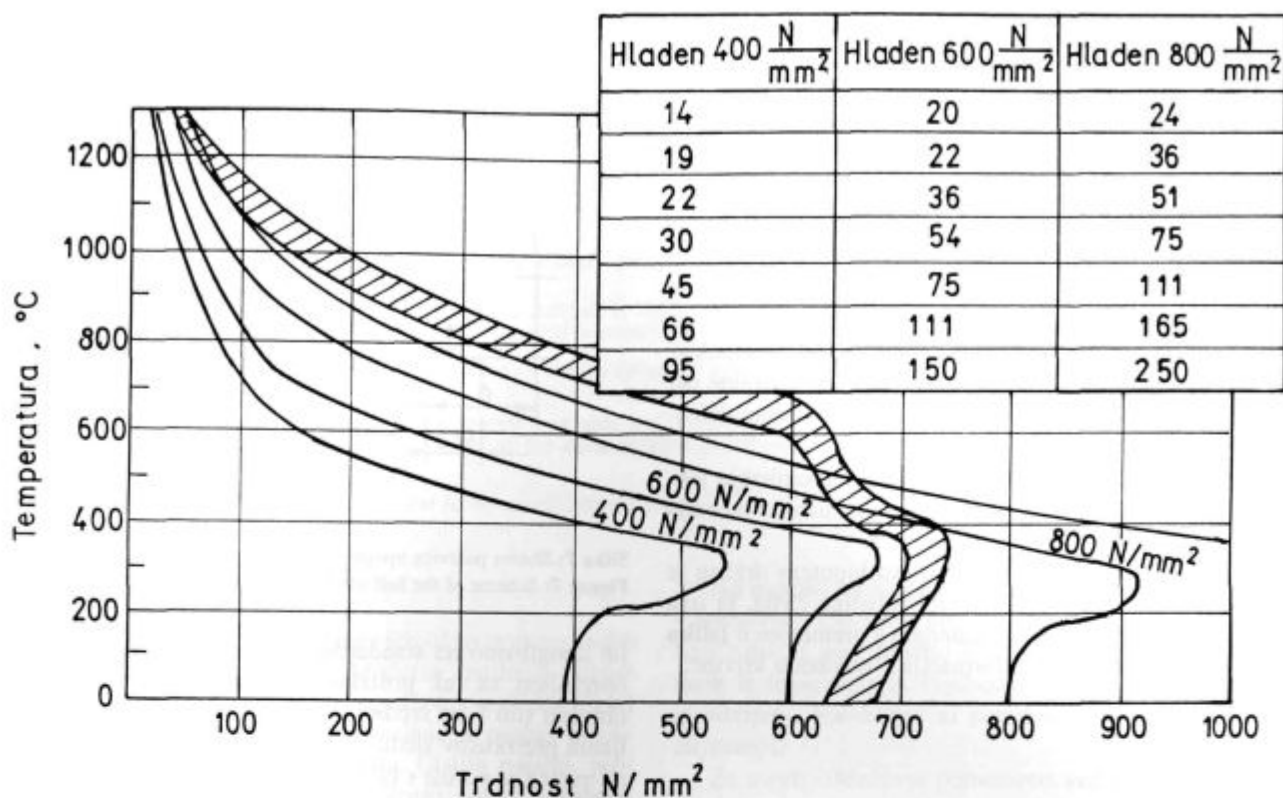
- Brez zadržkov lahko upogibamo palice do premera 26 mm oziroma 36 mm, kolikor pač dovoljuje upogibalni stroj, oz. še več, če gre za večji stroj, kot je npr. pri sidrnih verigah.

Pomanjkljivosti upogibanja v vročem proti upogibanju v hladnem pa so:

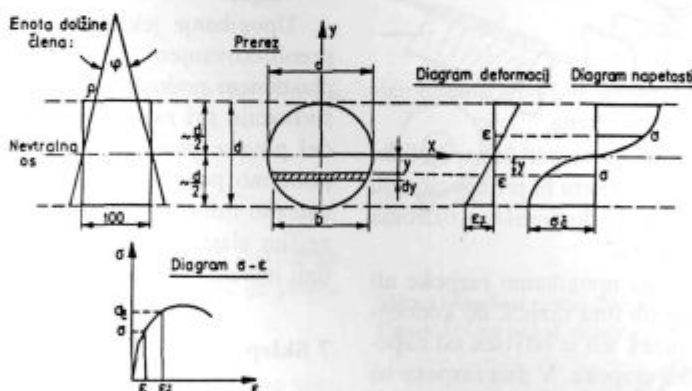
- Poraba energije je večja, ker palice segrevamo na temperaturo 760-800°C.
- Nastanek zakalitev po upogibanju in ohlajanju in s tem neenakomernih lastnosti materiala v členu in dodatnih težav pri varjenju.
- Po upogibanju nastane na členih zaradi oksidacije tanka plast oksida, ki v stiku z elektrodo učinkuje kot izolator in slabi stik pri varjenju.
- Kapaciteta vročega upogibanja je manjša od hladnega. Pri vročem upogibanju je primerjalni čas seštevek časov segrevanja in upogibanja.

Zaradi večje porabe energije in majhne kapacitete je upogibanje v vročem bolj neugodno proti upogibanju v hladnem in se zato uporablja le v nekaterih primerih, in sicer:

- kadar imamo vroče valjan material, ki je debelejši od 20 mm
- kadar izdelujemo rudarske verige II. kvalitetne stopnje debeline nad 20 mm, ker jekla niso sposobna za kvalitetno upogibanje v hladnem
- kadar za izdelavo verig uporabljamo trša jekla, npr. za elevatorske verige in
- za sidrne verige, ki so večjih dimenzij.



Slika 5: Razmerje med trdnostjo in temperaturo za jekla različnega trdnostnega razreda
Figure 5: Relationship strength versus temperature for steels of different tensile strength



Slika 6: Napetost in deformacija na preseku palice
Figure 6: Stress and deformation on the rod section

5 Poltoplo upogibanje

Ta način upogibanja je še v razvoju. Opravlja se pri temperaturi materiala $550-750^{\circ}\text{C}$. Poraba energije je manjša, vendar so potrebni močnejši upogibalni stroji.

Diagram na **sliki 5** prikazuje natezno trdnost R_m jekel pri različnih temperaturah. Temnejši pas v diagramu velja za mikrolegirana jekla:

15 MnNi - za snežne verige

Č 8330 - za rudarske verige B in sidrne verige

20 NiCrMo 2 - visokoodporne verige 60

20 NiCrMo 3 - visokoodporne verige 80

23 MnNiCrMo 54 - rudarske verige C; (Č 7435) visokoodporne verige 80; jeklo za zaščitne verige in za elevatorje, Č. 5420.

6 Upogib člena

Pri upogibanju jeklene palice v elastoplastičnem območju material "plastično steče" zaradi velikih deformacij. Deformira se tako, da nevtralna os oziroma nevtralna ravnina, ki gre približno skozi sredino preseka palice ohrani začetno dolžino. Proti periferiji preseka, pravokotno na nevtralno ravnino, se v coni nategov

dolžina palice povečuje, v coni tlakov pa zmanjšuje. Po Bernoullijevi hipotezi, da v elastoplastičnem območju preseki, ravni pred deformacijo, ostanejo ravni tudi po deformaciji, dobimo v vsakem preseku enakomeren diagram raztezkov. Končna deformacija se izvrši v elastoplastičnem območju materiala, v katerem med napetostmi in deformacijami ni linearnega razmerja. Rezultat tega je, da za dosežene enakomerne deformacije v nekem preseku dobimo neenakomeren diagram napetosti, kot prikazuje **slika 6**.

Če je za material, ki ga upogibamo, poznan Hookov diagram, potem lahko pri znanem položaju nevtralne osi izračunamo silo, ki je potrebna za neko upogibno deformacijo.

Velikost upogibne deformacije je pri upogibanju jeklenih palic v člene verig znana, ker je znana dimenzija verig in tudi kvaliteta materiala.

S predpostavko, da Bernoullijeva hipoteza drži in je položaj nevtralne osi na polovici debeline člena, ki ima širino med kraki b in je iz materiala s premerom d (**slika 7**), je največja natezna deformacija ϵ na obodu krivine:

$$R = \frac{b}{2} + \frac{d}{2}$$

$$\frac{1}{R} = -\frac{d}{2}$$

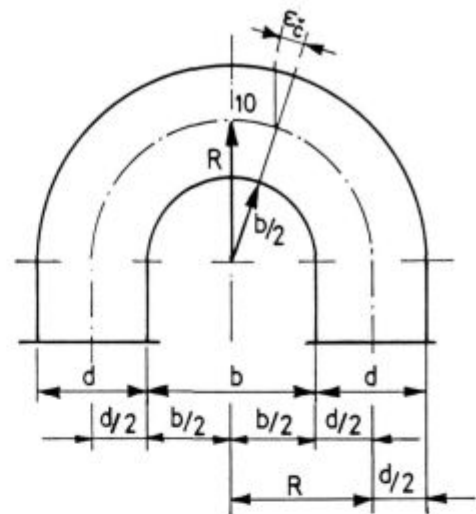
$$\epsilon = \frac{d}{2R} = \frac{1}{1 + \frac{b}{d}}$$

Iz enačbe za ϵ lahko za razmerje b/d izračunamo največji specifični raztezek na obodu člena.

Če bi člen naredili iz jekla, ki ima porušni specifični raztezek $u = Au$ enak raztezkju ϵ , potem bi pri upogibanju na razmerje b/d za raztezek ϵ prišlo do porušitve oziroma do razpoka na obodu krivine člena.

Če ima površina jekla, ki ga upogibamo razpoke ali podobne druge napake, pride ob dnu razpoka do koncentracij napetosti. Velikost in potek teh je odvisen od napetostnih stanj v območju konca razpoke. V dnu razpoke so tudi deformacije največje. Zato lahko dosežejo specifični raztežki vrednost porušnih specifičnih raztezkov ($Au = u$) preje, kot bi jih sicer vlakna na zunanjem obodu člena. V tem primeru je plastična deformabilnost jekla v dnu razpoke izkoriščena in pride do porušitve z duktilnim lomom.

Za jekla, ki se uporabljajo za verige, se lahko naredijo upogibni preizkusi z ravnimi jeklenimi palicami, ki



Slika 7: Shema polovice upognjenega člena verige
Figure 7: Scheme of the half of chains link

jih upogibamo na standardnem trgalnem stroju, če je le opremljen za tak preizkus. Pri tem merimo statično obtežno silo F na sredini palice in upogibek f . Iz opravljenih preizkusov sledi, da so možni naslednji primeri:

- palica se poruši s krhkim lomom brez plastične deformacije
- palica se poruši z duktilnim lomom
- palica se sploh ne poruši (veliko plastično preoblikovanje).

Upogibanje jeklenih palic v člene verige s hladnim preoblikovanjem je v končni fazi vedno v elastoplastičnem področju lastnosti materiala. Od celotne deformacije pri razbremenitvi se vedno majhen elastični del povrne proti prvotni obliki. Učinek vzmetnosti je potrebno posebej upoštevati pri jeklih, ki imajo večjo natezno trdnost in višjo mejo elastičnosti R_e . Z natančnejšim elastoplastičnim izračunom je možno vzmetnost tudi teoretično izračunati.

7 Sklep

Oblikovanje ravne jeklene palice v obliko verižnega člena je proces, v katerem prihajajo do izraza:

- dimenzije in lastnosti jekla in
- postopek upogibanja.

Hladno oblikovanje ima osnovne tehnološke in mikrostrukturne prednosti pred vročim, vendar je mogoče samo do premera 20 oz. 26 mm, odvisno od vrste in lastnosti jekla.