

**МАТЕРИЈАЛ ЗА ПРЕДАВАЊА ИЗ ПРЕДМЕТА**

***ПОНАШАЊЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА  
У ЕКСПЛОАТАЦИЈИ***

Др Гордана Бакић, ван.проф.

## 1.1. Увод

Поступак избора материјала за израду заварених конструкција се базира на препорукама бројних смерница, као што су:

- Технички прописи (закони), технички стандарди и норме, као и посебне техничке спецификације за поједине типове индустријске опреме.
- Захтеви у погледу тежине, дуготрајности и сигурности; нпр. у случају мобилних конструкције, као што су аутомобили и авиони, захтеви су потпуно различити у односу на оне који се односе на стационарне конструкције као што су носеће конструкције, процесна и енергетска опрема, итд. (за мобилне конструкције захтев је да буде што лакше, да имају врло високу поузданост у “кратком” међуремонтном периоду, дозвољен је релативно кратак радни век делова, треба да буде лака замена делова, итд.; за стационарне конструкције важи захтев за оптимизацију у погледу цене и тежине конструкције, захтева се задата поузданост у дугом временском периоду са дугим међуремонтним периодима, оптимизација трошкова одржавања, итд).
- Технолошки исправно обликовање, које омогућује примену оптималних метода израде и организације производње, са најмањим губицима времена рада и материјала. Технички стандарди, техничке норме и искуство пружају солидну основу за избор материјала заварених конструкција. Међутим, на првом месту при избору материјала треба поштовати захтеве који се односе на задовољавајуће обављање функције неког дела уз поштовање ограничења која произилазе из технологије израде делова – није могуће све замисли извести са постојећим техничко-технолошким могућностима.
- Економски приступ у пројектовању – коректан избор материјала за одређени радни век, цена његове производње, па затим даље обраде, цена обликовања или спајања је од великог значаја; обједињено, економски аспект поставља нови захтев: обезбедити задовољавајући квалитет уз минималне трошкове.
- Посебни захтеви – у случају примене нових или специјалних материјала, о којима не постоје довољно поуздани подаци из праксе/искуства, јављају се непознанице. Ове непознанице могу, донекле, да се превазиђу исправном оценом основних особина материјала (као што су хемијски састав, чврстоћа, дуктилност, жилавост, отпорност на корозију или ерозију, итд.), преко којих се врши оцена погодности материјала за израду одређених конструкција. При томе треба узети у обзир и особине различитих микроструктура које могу нпр. да настану у материјалу током термичког циклуса заваривања и које често имају врло различе особине.

Генерално, при избору материјала за заварене конструкције треба имати на уму и предности и недостатке заварених конструкција.

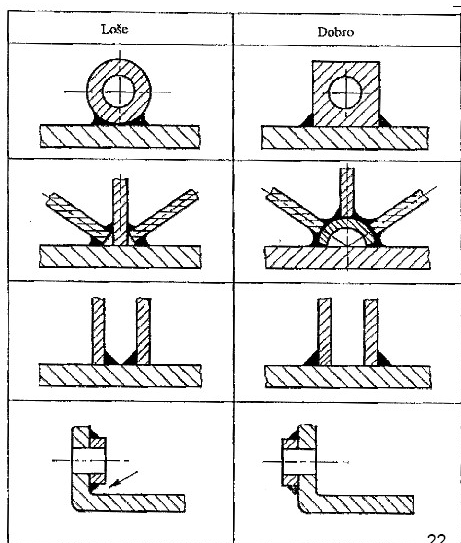
*Основне предности су:*

- лакше су од ливених конструкција за око 30%, а од кованих и ваљаних за око 15%,
- заварени делови су најчешће једноставног облика јер се израђују комбинацијом једноставних полазних делова (лимови, стандардни профили, цеви,...),
- поступак заваривања је јефтинији у односу на друге поступке израде,
- оштећења код заварених конструкција се лакше поправљају – репарирају накнадним заваривањем,

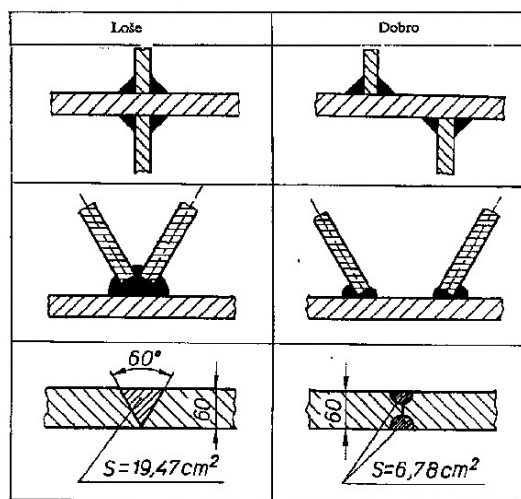
Основни недостаци су:

- тешкоће у заваривању неких метала (нпр. гвожђе),
- у процесу заваривања долази до пада чврстоће и жилавости спојева,
- после заваривања, услед хлађења, долази до појаве деформација и заосталих унутрашњих напона,
- постоји зависност квалитета споја од технологије и поступка заваривања, а при ручном заваривању и од оспособљености заваривача;

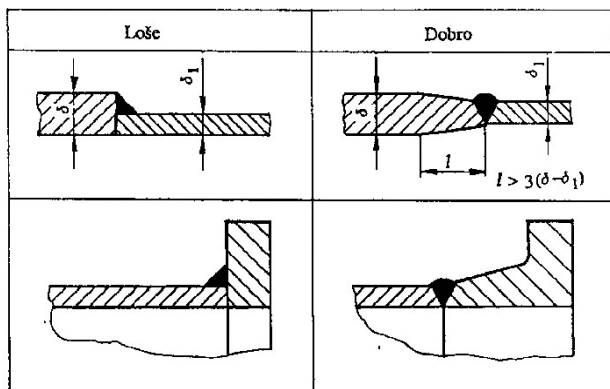
На сликама 1.1-1.7 илустративно су приказане мере о којима треба водити рачуна при пројектовању и изради заварених спојева.



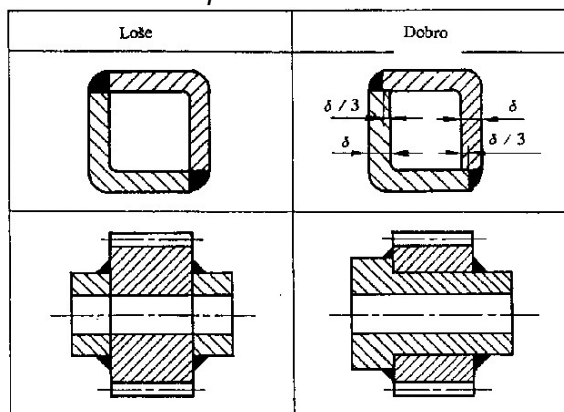
Слика 1.1. Обезбеђење приступа споју



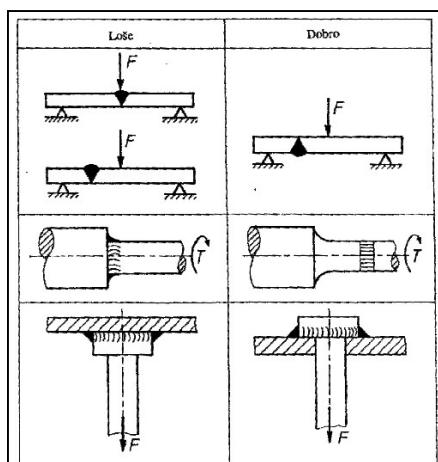
Слика 1.2. Избегавање нагомилавања заварених маса



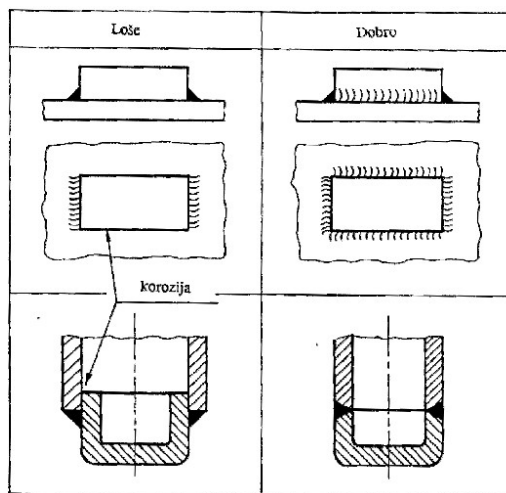
Слика 1.3. Спајање зидова различитих дебљина



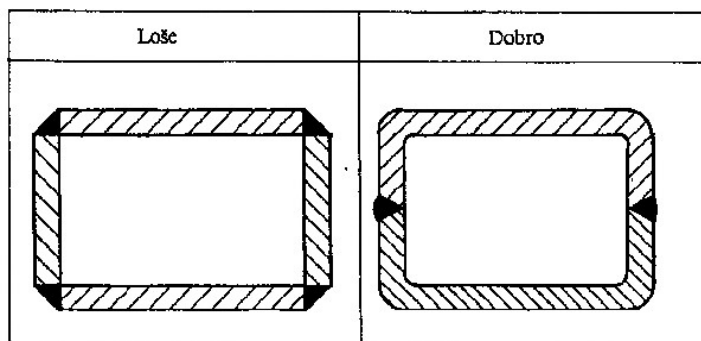
Слика 1.4. Решење споја заваривањем



Слика 1.5. Положај ЗС у односу на оптерећење



Слика 1.6. Избегавање зазора због корозије



Слика 1.7. Смањење обима заваривања

## 1.2. Основни принципи избора материјала у пројектовању заварених конструкција

**Интегритет конструкције.** Компоненте конструкције треба да имају довољну отпорност да издрже радна оптерећења која могу знатно да се разликују од пројектних. Интегритет конструкције се проверава различитим методама испитивања: методама испитивања без разарања (ИБР методе), испитивањем унутрашњим надпритиском – "хладна проба", излагање завареног споја различитим тестовима оптерећења, испитивањем нпр. ударне жилавости и чврстоће споја. Испитивања уобичајено дефинишу стандарди и технички прописи, али и добра техничка пракса.

**Дужина експлоатације.** Радна оптерећења и радна средина најчешће имају највећи утицај на избор материјала током пројектовања. Један од основних критеријума у избору материјала је да он може да ради у задатом периоду времена. Нпр. поједине

компоненте хидроелектрана пројектују се да раде 100 година, док се већи део машинске опреме у хидроелектранама пројектује за знатно краћи радни век – опрема се мења због њеног старења (нпр.хабања) или због њене застарелости. Критеријум дужине експлоатације мора да узме у обзир и следеће: могућност откривања потенцијалних оштећења / разарања, лако одржавање у зонама које су оштећене, као и могућност једноставне и лаке замене застареле или радно исцрпљене опреме.

**Процес спајања.** Погодност материјала за израду (фабрикацију) је једна од кључних особина. Погодност материјала за заваривање се оцењује преко заварљивости. Заварљивост одређује услове за добијање квалитетног споја – нпр. да ли је потребно предгревање за успешно извођење заваривања, или накнадна термичка обрада.

Поред заварљивости при избору материјала битна је и дебљина делова који се заварују. Нпр код елемената врло мале дебљине (лимова) квалитетно спајање електролучним поступцима заваривања је врло тешко, због чега се често као алтернатива препоручује лемљење или електроотпорно заваривање.

**Захтеви стандарда и техничких норми.** Дугогодишња искуства у експлоатацији одређених класа материјала, али и искуства у пројектовању и изради, преточена су у захтеве стандарда и техничких норми за одређену групу производа (нпр. челичне конструкције, негрејане и грејане посуде под притиском, преносници снаге, итд). Генерално, стандарди и техничке норме сужавају избор материјала на одређену групу материјала. Тако нпр. за судове под притиском нуди се могућност избора челика у функцији радне температуре или отпорности на корозију.

**Економски аспект.** Један од најважнијих критеријума при избору материјала за неку конструкцију је и цена. У најширем смислу речи избор може да буде одређен ценом материјала, када пројектант мора да процени не само јединичну цену одабраног материјала већ и цену његове фабрикације у финални производ. Као први пример за илустрацију може да се наведе да је за израду неке конструкције потребно уградити 25% мање ниско легираног челика, због виших механичких особина, него нелегираног челика чиме се постиже уштеда у тежини материјала. Међутим, овакав избор доноси и пораст јединичне цене од око 15%. На ову цену треба додати и цену фабрикације, нпр. због потребе извођења термичке обраде и пре и после заваривања, или после савијања, која може значајно да превазиђе уштеду у тежини материјала. Други пример може да илуструје обрнути случај. Понекада је економичније уградити значајно скупљи легирани челик од неког нелегираног ако је у циљу заштите од атмосферске корозије неопходно да извршимо површинску заштите нелегираног челика неком превлаком која се наноси скупљим поступцима као што су метализација или наваривање. Постоји низ примера када „очигледни” економски критеријум – нижа цена материјала, губи аргументацију због високе цене израде конструкције.

**Радни услови.** Карактеристике радне средине су један од основних критеријума у избору материјала за заварене конструкције, а подразумевају проверу отпорности материјала на ту радну средину кроз анализу различитих физичких, механичких и хемијских (корозија) особина, табела 1.1.

Табела 1.1. Основне особине материјала

ФИЗИЧКЕ ОСОБИНЕ	МЕХАНИЧКЕ ОСОБИНЕ	КОРОЗИОНЕ ОСОБИНЕ
Густина	Затезна ђврстоћа	Општа корозија – отпорност
Температура топљења	Жилавост	Питинг корозија – отпорност
Термичко ширење	Заморна чврстоћа	Напонска корозија
Електрична проводљивост	Чврстоћа на пузање	Ерозиона корозија – отпорност
Феромагнетизам	Дуктилност	Кавитација – отпорност
	Тврдоћа	Оксидација – отпорност
	Жилавост лома	
	Граница еластичности	

**Утицај температуре и притиска.** Већина заварених конструкција је пројектована за рад у нормалним атмосферским условима. За ове услове, особине који се уобичајено користе при избору материјала су добро познате и лако доступне.

*Повишене температуре.* У процесним индустријама углавном се примењују технологије базирани на процесима који се одвијају на повишеним температурама – могу да иду преко 1000°C. Такође, термоенергетска постројења у свом основном циклусу користе пару температуре од 500 до 600°C (постоји циљ да се максимална температура у циклусу подигне на 700°C). На тако високим температурама већина материјала је изложена пузању – постепеном настанку трајних пластичних деформација у правцу главних напона радних оптерећења, тако да је у овим условима рада најзначајнија особина материјала чврстоћа на пузање (или чешће временска чврстоћа). Чврстоћом на пузање одређена је јединичан напон којим се контролише настајање дозвољених деформација, и промена основних димензија компоненте, као и њен нагли лом.

Међутим, материјали који раде на повишеним температурама најчешће су истовремено изложени и другим утицајима, као што је корозиона средина, ерозија или оксидације. Током процеса избора материјала за конструкције изложене сложеним условима рада, требало би проверити отпорност материјала на све наведене утицаје пре доношења финалне одлуке о његовом избору. Поред отпорности на рад на повишеним температурама, у процесима где долази до размене топлоте, од пресудног значаја је термичка проводност материјала, док је за одступања у димензијама током загревања и хлађења од пресудног значаја коефицијент термичког ширења материјала.

*Ниске температуре.* Већина челика постаје крта на сниженим температурама, губећи способност да се пластично деформише и прилагоди оптерећењима, посебно у локализованим областима повишеног напонског стања, тако да многи материјали нису у могућности да апсорбују нагле промене оптерећења на ниским температурама. Из тог разлога материјали који се користе на ниским температурама морају да имају добру жилавост у интервалу температура њихове примене. И на ниским температурама, као и на повишеним, термичка проводност и коефицијент термичког ширења материјала су од великог значаја за избор материјала.

**Унутрашњи притисак.** Конструкције које су изложене високим унутрашњим надпритисцима су уобичајено добијене заваривањем и пројектују се према једној од постојећих норми/стандарда за посуде под притиском. Код посуда под притиском чврстоћа материјала у условима деловања затезних оптерећења примарно контролише интегритет конструкције. Све техничке норме дефинишу дозвољени напон за посуде под притиском који се пореди са напоном у зиду компоненте. У најједноставнијем облику напон у зиду цилиндра се одређује према изразу:

$$\sigma = \frac{pD_s}{2s} \quad (1.1)$$

Где је  $\sigma$  - напон, МПа,  $p$  – унутрашњи надпритисак (укупан притисак умањен за атмосферски), МПа,  $D_s$  – спољашњи пречник цилиндра, мм и  $s$  – дебљина зида цилиндра, мм.

Напон у зиду компоненте не би требало да пређе дозвољени напон, који се у овом случају одређује преко нпр. напона течења (степен сигурности – 1.5) или затезне чврстоће (степен сигурности - 2.4). Када се у израз (1.1) уврсти дозвољени напон, могуће је добити вредност минимално потребне дебљине зида у мм, која обезбеђује да посуда може да издржи дати унутрашњи притисак као радно оптерећење:

$$s_{\min} = \frac{pD_s}{2[\sigma] + p} + c_1 + c_2 + \dots + c_n \quad (1.2)$$

где су  $c_i$  додаци који узимају у обзир одступања у геометрији и трошење материјала током времена услед корозије, ерозије или друге врсте хабања.

**Рад у условима вакума.** Код материјала који се бирају за рад на притисцима који су много нижи од атмосферског и врло блиски вакууму, основни критеријум за њихов избор је да заварени спојеви могу да обезбеде непропусност, односно да могу да спрече размену материје између спољашње средине са високим или атмосферским притиском и средине под вакуумом. У овом случају код заварених спојева се не дозвољавају грешке типа порозности, прслина и микрораздавајања. Такође, вакуум је уобичајено стање у свемирским условима, тако да се иста правила примењују и у аерокосмотехници. Избор материјала се изводи слично као код високих радних притисака.

**Рад под водом.** Велики број особина материјала служи као критеријум за израду заварених спојева под водом. На првом месту је то свакако отпорност материјала на корозију, посебно у морској води (бродови, платформе, подводни нафтоводи,...). Такође, за компоненте које су смештене у стајаћој води битна је отпорност на билошку корозију. Микроорганизми могу да доведу до корозионих оштећења чак и корозионо отпорних материјала у зони заварених спојева због високог напонског стања у њима.

**Термички циклус заваривања.** На избор материјала за неку заварену конструкцију од великог је утицаја понашање изабраног материјала током заваривања и особине завареног споја. Током заваривања, у зависности од уноса топлоте, тј. температуре загревања, основни материјал трпи одређене структурне промене, које доводе до

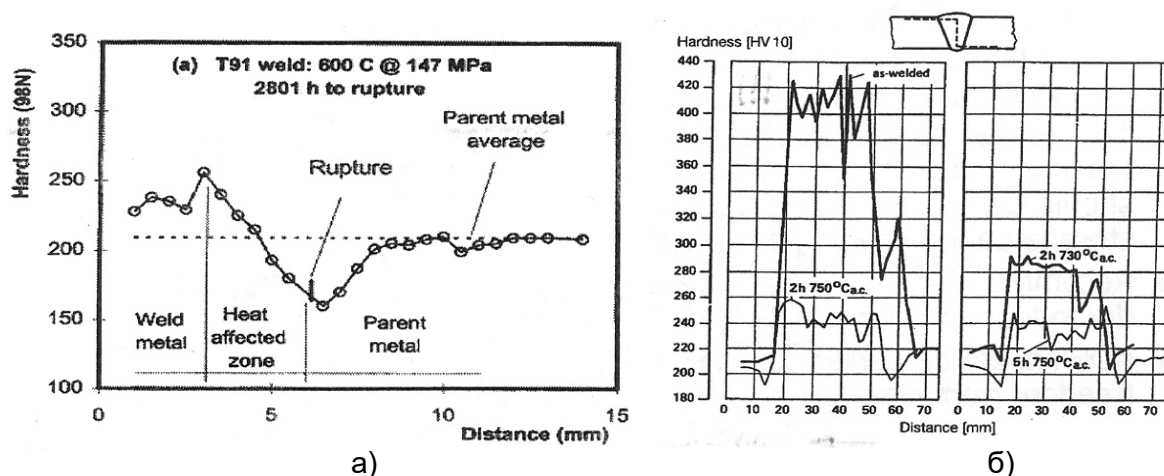
промене особине материјала у одређеним зонама споја, а самим тим и чврстоће, а последично и носивост дела у тој зони.

Метал шав (МШ) са својом структуром која је настала током процеса очвршћавања има великих сличности са особинама материјала у ливеном стању. Код вишепролазног заваривања, које је уобичајено код електролучних поступака заваривања, за дебљине веће од 5 мм (у неким литературним изворима дата је вредност од ~6,4 мм, односно 1/4ин), метал шав ће проћи кроз неколико термичких циклуса који ће, при сваком следећем пролазу, рафинисати полазну дендритну структуру и променити особине претходних пролаза.

Слично метал шаву, зона утицаја топлоте (ЗУТ), у непосредној близини металног купатила, ће претрпети промене у сваком термичком циклусу нанетих пролаза. Особине материјала у ЗУТ-у ће понекад бити пресудне за интегритет конструкције.

Такође, заваривање доводи до појаве заосталих напона чији ред величине може да буде већи од напона течења основног метала и да изазову трајне деформације у зони завареног споја или чак до настанка прслина. Када се оцењује реално напонско стање неке заварене конструкције у раду, регуларним напонима изазваним условима рада потребно је додати и заостале напоне да би се одредило напонско стање у компоненти. Када се оцени да је ред величине ових напона значајан и да утиче на интегритет конструкције неопходно их је елиминисати или рачунати са скраћеним веком конструкције.

**Накнадна термичка обрада.** За добијање квалитетних заварених спојева у великом броју случајева неопходно је накнадно термички обработити спој после заваривања (понекад исти материјал може да се користи и у термички необрађеном стању). Накнадна термичка обрада доводи до промене механичких, физичких и микроструктурних особина у зони која је термички третирана. На пример, жарење ради уклањања заосталих напона код заварених спојева изводи се тако што се материјал загрева до температуре на којој је напон течења довољно низак да је омогућена пластична деформација у локалним зонама које су изразито напонски оптерећене, чиме се неутралишу локални заостали напони. За феритне челике ова термичка обрада се изводи испод температуре A1, што доводи до омекшавања материјала у загреваној зони (током термичког циклуса заваривања загревање је изнад A1 температуре - аустенитно подручје). Накнадна термичка обрада доводи до смањења тврдоће и у основном материјалу и у ЗУТ-у и у метал шаву. Са порастом температуре обраде и продужењем времена трајања обраде тврдоћа интензивније пада, слика 1.8.



Слика 1.8. Расподела тврдоће дуж једног завареног споја а); промена тврдоће са дужином и температуром термичке обраде б)

**Избор поступка заваривања.** Код избора поступка заваривања за одређену конструкцију неопходно је да се постигне компромис и **равнотежа између: продуктивности израде и квалитета завареног споја**. Ако се има на уму да сваки поступак заваривања има своје предности и мане, јасно је зашто избор оптималног поступка може да буде врло тежак. Сваки поступак заваривања може да се рангира у односу на брзину заваривања. Међутим, неопходно је да се поведе рачуна и о бројним другим факторима, као што су:

- врсти основног материјала
- начину спајања (типу споја) и дебљини зида
- положају при заваривању
- услови у којима се изводи заваривање и доступној опреми

У табели 1.2 је дато генерално поређење најчешће коришћених поступака заваривања, са напоменом да су оцене по различитим критеријумима субјективне и добијене од стручњака за неки од поступака.

Табела 1.2. Рангирање изабраних поступака заваривања у функцији особина

Карактеристика или Параметер	Поступак заваривања				
	Е	ТИГ	МИГ/МАГ	Пуњеном жицом	Под прашком
Квалитет споја	добар	одличан	одличан	добар	одличан
Брзина заваривања	мала	лоша	добра	добра	одлична
Рад на терену	одличан	лош	добар	добар	врло лош
Захтеви одржавања опреме	мали	мали	средњи	средњи	средњи
Емисија гасова током заваривања	висока	мала	средња	висока	врло мала
Контрола уноса топлоте	одлична	слаба	добра	добра	задовољ авајућа
Видљивост лука и позиционирање додатног материјала	добро	одлично	задовољавајуће	задовољавајуће	лоше
Примена код различитих материјала	одлична	одлична	добра	добра	лоша

### 1.2.1. Оцена погодности за рад компоненте

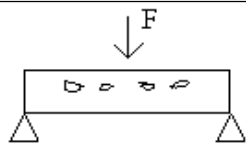
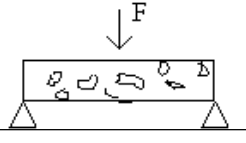
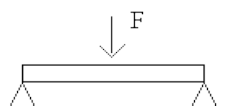
Терминолошки је потребно разликовати следеће појмове:

- експлоатациона употребљивост,
- поузданост,
- радни век компоненте,
- критеријуми достизања граничног стања рада компоненте;

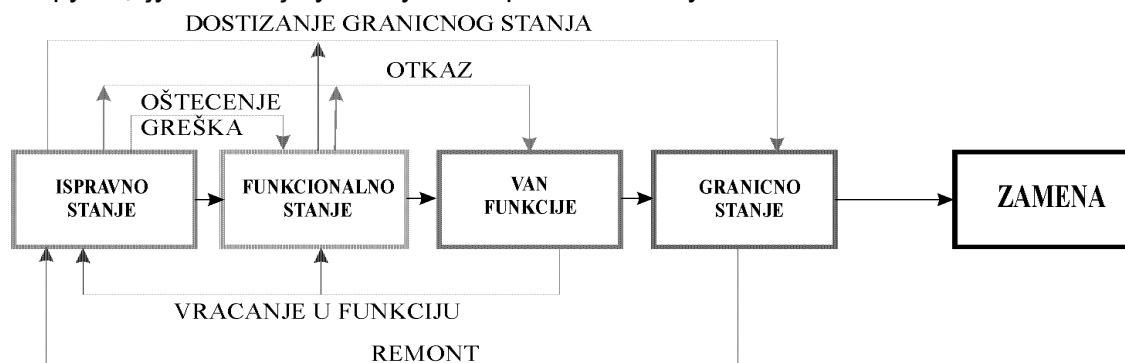
**Експлоатациона употребљивост** - термин који дефинише прихватљивост грешака /дисконтинуитета/оштећења у функцији даље експлоатације. За оцену експлоатационе употребљивости развијен је низ поступака врло често детаљно датих у оквиру техничких норми ли одређених процедура, чији **крајњи циљ је оцена прихватљивости одређеног типа грешаке за даљу поуздану експлоатацију неког дела.**

**Поузданост** - вероватноћа да ће неки **део исправно обављати функцију у предвиђеном времену и за задате услове експлоатације.** На пример, до смањења поузданости завареног споја може да дође и током заваривања и током експлоатације.

Табела 1.3. Разлике између схватања појмова квалитета материјала и поузданости

Елемент – греда	Квалитет материјала	Поузданост	Скица
Мало грешака/оштећење - довољна носивост попречног пресека	+	+	
Врло много грешака/оштећења - довољна носивост попречног пресека	-	+	
Нема грешака - није довољна носивост попречног пресека због врло мале дебљине -лом	++	-	

**Радни век компоненте** - представља време током кога компонента може да обавља задате функције на задовољавајућем нивоу. Да би могао да се дефинише радни век, неопходно је познавати све његове фазе, од тренутка уградње компоненте до тренутка замене, слика 1.9. Са тог аспекта могуће је да компонента обавља функцију иако није у потпуно исправном стању.



Слика 1.9. Могућа стања и прелази из једног стања у друго током радног века компоненте (конструкције)

*Критеријуми достизања граничног стања рада компоненте*, када је потребно извршити њену поправку, делимичну или потпуну замену, се дефинишу:

- кроз препоруке произвођача,
- на основу искуства у раду,
- преко граничних вредности напона у зиду компоненте за реалне радне услове (чест случај – инжењерски приступ) и
- преко граничних процеса који оштећују материјал.

Исто тако, поједине компоненте могу да се сврстају у групу оних које су достигле гранично стање и поред тога што још увек могу да обављају своју функцију. У том случају, границу њихове даље примене дефинишу економски параметри, јер трошкови одржавања таквих компоненти могу да постану енормно високи, услед чега постројење постаје економски неисплативо или мере одржавања постају оперативно немогуће.

Као пример могу да се наведу старе конструкције код којих стање одређеног броја виталних компоненти може да се дефинише као функционално, али не увек и исправно, што у многостручности може да допринесе порасту трошкова одржавања.

У табели 1.4 су дате дефиниције корисног радног века кроз које је показано да **користан радни век компоненте није увек инжењерска процена**, већ да и други релевантни фактори имају знатног утицаја.

Табела 1.4. *Дефиниције корисног радног века компоненте*

	Аспект	Дефиниција
Користан радни век	Физички	Користан радни век компоненте је <b>лимитиран физичким интегритетом конструкције</b> , односно процесима оштећења материјала (пузање, замор, корозија, напонски изазвана оштећења, абразија, комбинација више процеса као корозиони замор, пузање и замор, напонска корозија,...). Компонента временом достиже гранично стање експлоатационе употребљивости када не може поднети радна оптерећења и предвиђа се за замену.
	Функционални	Користан радни век компоненте је <b>лимитиран захтевима за обављање одређене функције</b> . Функција може да се унапреди или прошири у периоду од настанка конструкције, тако да постојеће решење не може да је задовољи (конструкција постаје застарела) и доноси се одлука о њеној замени или прилагођењу. <u>У ову категорију спадају и еколошки захтеви</u> који, такође, могу да изискују замену појединих компоненти или делова постројења.
	Економски	Користан радни век компоненте је <b>лимитиран трошковима одржавања</b> . Уколико су установи да су сумирани трошкови активности за утврђивање спречавање и успоравање процеса оштећења компоненте велики у поређењу са ценом замене, доноси се одлука о замени.

### 1.3 Експлоатациона употребљивост заварених спојева – грешке и дисконтинуитети

Ни једна конструкција није идеална и сасвим без грешака. Терминолошки је потребно разликовати следеће појмове:

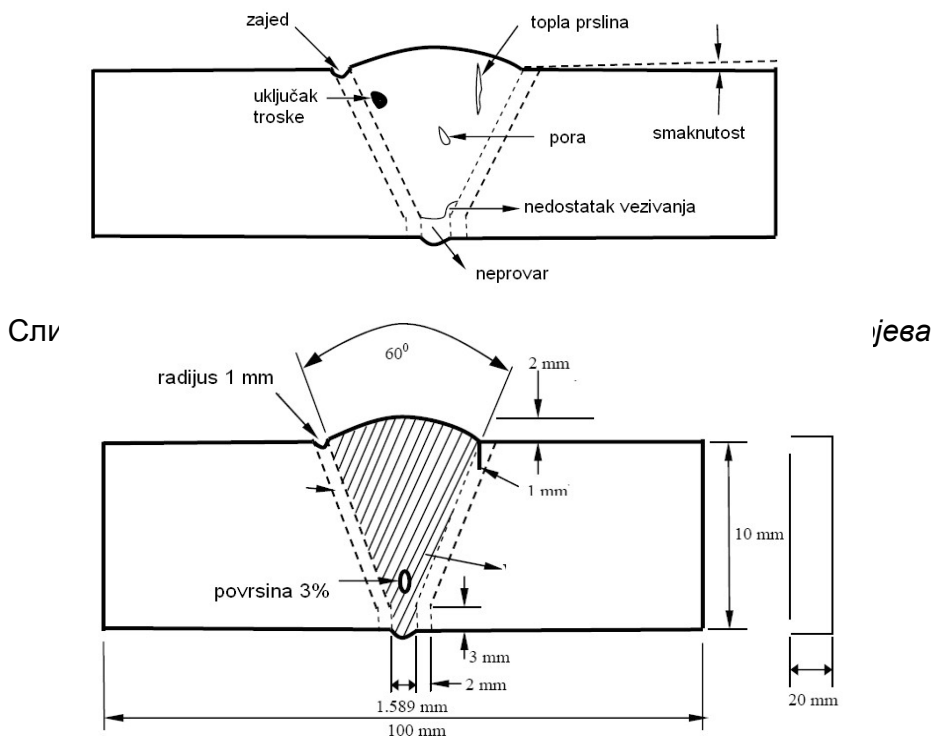
- грешка,
- дисконтинуитет,
- оштећење;

**Грешка** - подразумева све оне несавршености које су настале током израде неког дела. Грешке најчешће доводе до пада носивости попречног пресека, ограничавајући употребљивост конструкције или потпуно елиминишу конструкцију за употребу. Прихватљиве врсте и величине грешака најчешће су регулисане стандардима.

**Дисконтинуитет** - представља прекид или **нехомогеност** у основној структури материјала, и односи се на локална одступања у механичким, металуршким или физичким карактеристикама. Дисконтинуитети или нехомогености не морају увек да буду грешке. Пример за ово је податак да је дозвољено одступање неких механичких особина од номиналне вредности и до  $\pm 20\%$ , што је последица несавршености материјала.

**Оштећење** – представља нарушавање полазног стања неког дела током експлоатације. **Узроци настанка оштећења се у основи деле према утицају радних напона, материјала или радне средине на њихову појаву.**

Грешке заваривања обухватају порозност, укључке, грешке везивања, непроварен корен, прслине, заједе, грешке надвишења и површине вара (храпавост, кратери,...). Ове грешке смањују носивост попречног пресека споја и стварају концентрацију напона у врху грешке. Пример различитих врста грешака и како се оне мере приказан је на сликама 1.10. и 1.11.



Слика 1.11. Карактеристичне димензије појединих грешака

## Природа прслина код заварених спојева

Различите врсте прслина, које се јављају код заварених спојева, могу да се, у зависности од времена образовања, сврстају у:

- прслине образоване током фабрикације (производње), и
- прслине образоване током експлоатације.

Свакако, могуће је и комбиновано дејство код којег иницијација прслине (која регуларним методама контроле не може да буде детектована) настаје током фабрикације, а до развоја, односно ширења прслине долази током експлоатације.

### *Прслине настале током заваривања*

Грешке заваривања и заварених спојева су бројне, а са аспекта експлоатације и радне способности материјала елемената непожељне. Поштовањем свих прописаних параметара заваривања, под условом да је технологија заваривања коректно прописана и спроведена и да су сагледани сви неповољни утицаји, могуће је спречити појаву ових грешака.

**Прслине, које настају при заваривању током различитих фаза фабрикације, у највећем броју случајева могу да буду откривене при контроли квалитета производа методама без разарања, а то значи и отклоњене.** Међутим, у извесним условима се не откривају и то када:

- је дошло до њихове иницијације, а величина грешке је тако мала да је испод прага осетљивости примењене методе контроле,
- је геометрија завареног споја таква да је недоступан за контролу,
- током контроле квалитета, грешка и њен значај нису препознати и вредновани на одговарајући начин;

У производне прслине се сврставају: топле прслине, хладне прслине, ламеларне прслине и прслине жарења.

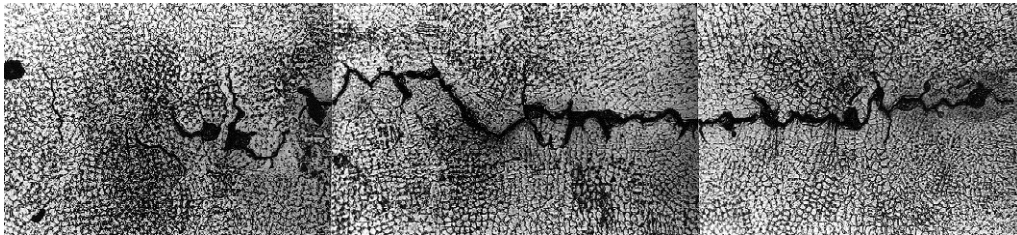
### *Експлоатационе прслине*

Прслине које се у завареним спојевима образују током експлоатације настају:

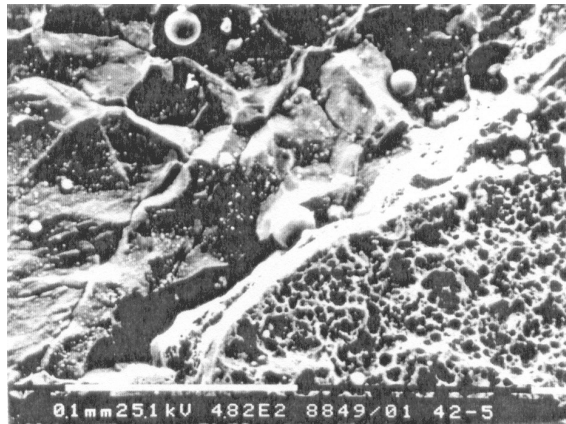
- због преоптерећења (искључиво експлоатационе природе),
- на већ постојећим грешкама из фабрикације, с тим што су радни услови такви да може да дође до њиховог ширења;

Ову групу прслина чине:

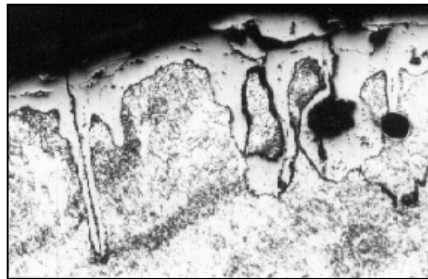
- заморне прслине,
- напонске прслине,
- прслине услед преоптерећења,
- прслине услед напонске корозије, корозионо заморне прслине,
- прслине услед пузања..., слике 1.12-1.14;



Слика 1.12. Аустенитни заварени спој – разгранате корозионо напонске прслине у метал шаву инициране на укључцима

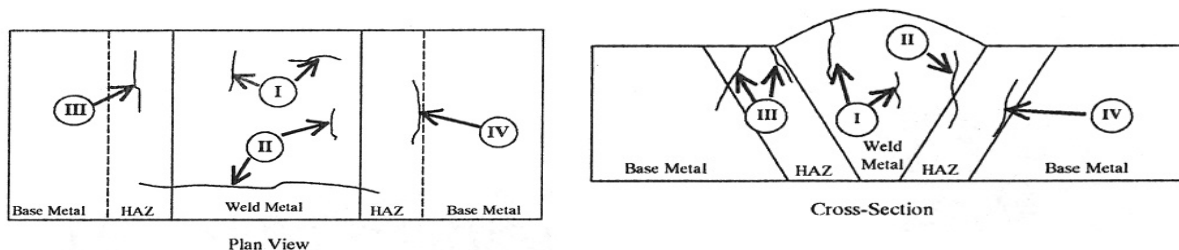


Слика 1.13. СЕМ микрофотографија. Прслина између пролаза урађених са две различите електроде: феритном и аустенитном



Слика 1.14. Оксидационо заморне прслине

Сви типови грешака настали током израде могу да се уоче одговарајућим контролама без разарања. **Употреба неинвазивних техника са циљем да се одреди интегритет материјала, компоненте или конструкције, или квантитативно измере неке карактеристике објекта назива се испитивањем без разарања.** Обим и врста контроле су најчешће дефинисани стандардом у свакој фази израде и употребе производа, **међутим неке конструкције су толико сложене да се обим контроле не изводи у целости, већ се испитује само један њен мањи део**, а за квалитет извођења гарантују квалификације поступака израде, такође урађене према одговарајућим стандардима. Ради лакше оцене прслина код заварених спојева, оне су означене по локацијама њиховог настанка, слици 1.15.



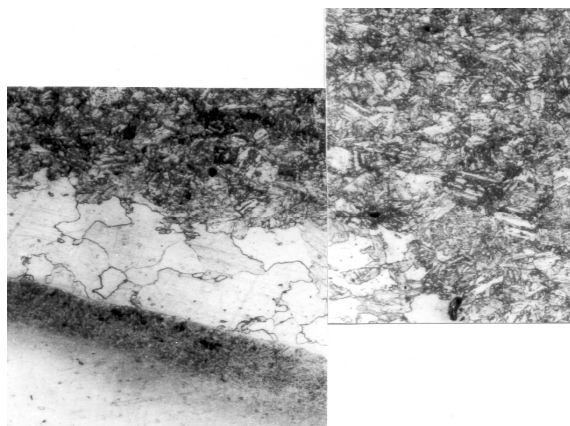
Слика 1.15. Прслине код заварених спојева у два пресека  
 прслине типа I – прслине у МШ  
 прслине типа II – прслине које обухватају прелаз МШ и ЗУТ  
 прслине типа III – прслине у ЗУТ-у  
 прслине типа IV – прслине на прелазу ЗУТ – ОМ

## Микроструктурне грешке

Микроструктурне грешке или промене у микроструктури и промене својстава завареног споја у односу на основни материјал се увек појављују у завареним спојевима. Обично се манифестују кроз:

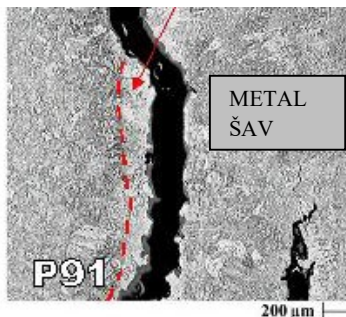
- повећање величине зрна,
- стварање структура каљења,
- издвајање карбида, сигма фазе (код високолегираних челика) и других неповољних фаза или
- издвајање неметалних укључака;

При заваривању долази до сагоревања неких елемената, а уношење других зависи од реакције троска - метал и гас-метал. Микроструктурне грешке могу да узрокују неповољна снижења особина завареног споја, нпр. жилавост, чврстоћу, напон течења, дуктилност, отпорности према корозији итд. На слици 1.16 је приказана грешака које настају код заваривања челика са различитим садржајем хрома, која се одликује појавом зоне осиромашене на угљенику и карбидне траке. Током експлоатације као последица постојања оваквог дисконтинуитета долази до појаве појаве прслина, слика 1.17.

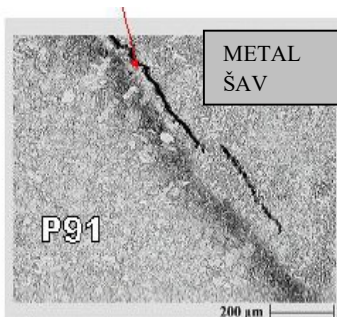


Слика 1.16. Зона разугљеничења и карбидна трака у завареном споју Цр-Мо челика

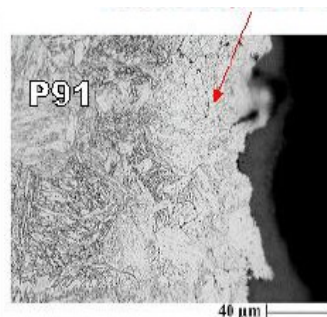
Zona osiromašena na ugljeniku



Zona osiromašena na ugljeniku



Zona osiromašena na ugljeniku

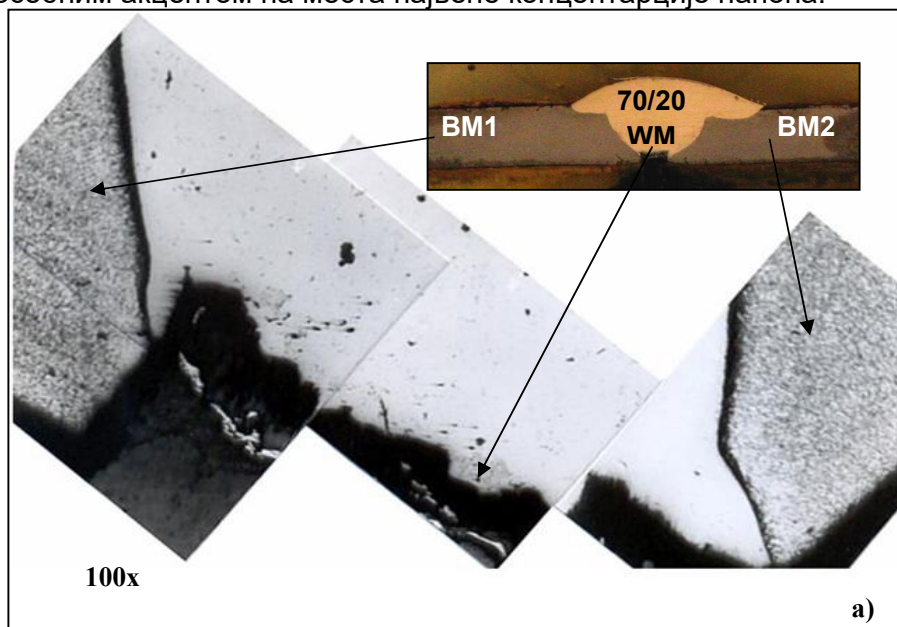


Слика 1.17. Прслина услед разугљеничења у метал шаву – погрешан избор електроде (Извор АЛСТОМ)

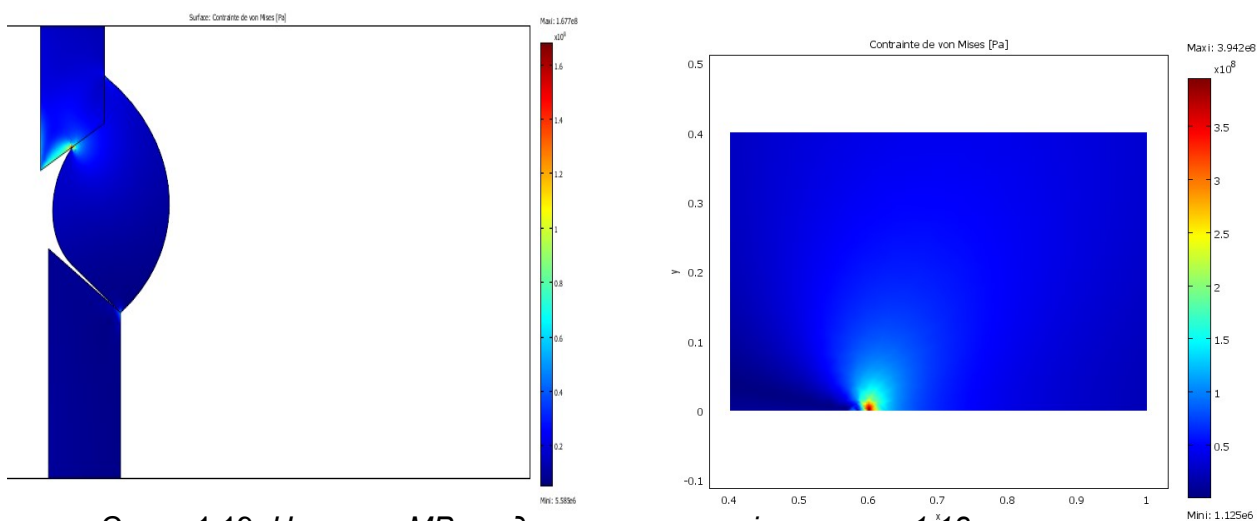
## Геометријске грешке

Геометријске грешке **обухватају** одступања од захтеваних димензија и облика завареног споја.

Ове грешке су проузроковане лошом припремом и/или лошим извођењем заваривања и насталим деформацијама. Геометријске грешке додатно доводе до појаве концентрације напона, што смањује носивост завареног споја у целини. За заварени спој на слици 1.18, приказана је симулација напона у зиду цеви, слика 1.19., са посебним акцентом на места највеће концентарције напона.



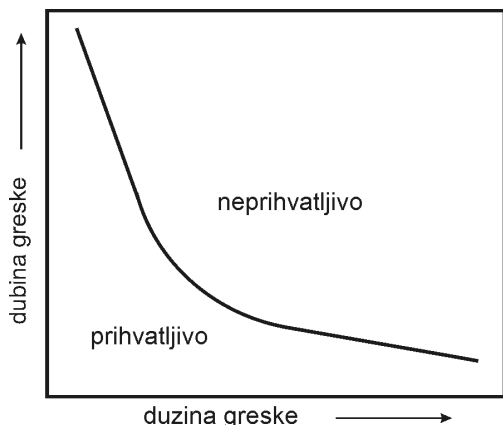
Слика 1.18. Заварени спој мартензитног челика са аустенитним додатним материјалом



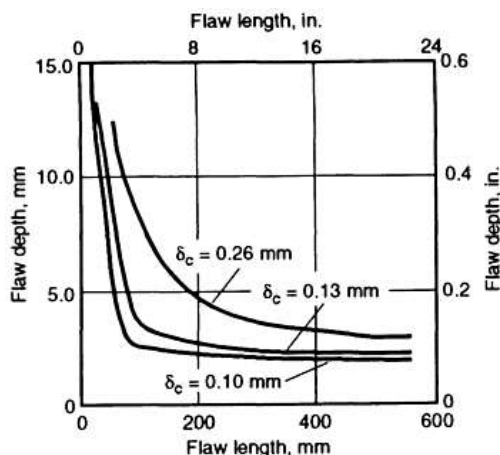
Слика 1.19. Напони у МПа код завареног споја са слике 1.18, на месту непровареног корена

## Гранична величина грешке

Интегритет и особине заварених конструкција изразито зависе од процењене "тежине" грешке откривене током испитивања. У ту сврху развијен је низ аналитичких метода за оцену "тежине" односно критичности грешке. Добар део тих метода заснован је на процени да ли ће одређена грешка да доведе до лома и под којим условима, а основа ових метода је утврђивање **критичне величине грешке**. На слици 1.20. приказан је општи шематски приказа подручаја са дозвољеним и недозвољеним грешкама, док је на слици 1.21. приказан један релан дијаграм ове категорије добијен за конкретан материјал за нафтоводе.



Слика 1.20. Шематски дијаграм дозвољених грешака код заварених спојева



Слика 1.21. Дозвољена величина грешке за цевоводе израђене од челика X70 (АПИ), под претпоставком да се критична дужина прслине мења од 0.1 до 0.25 мм, да је напон на месту грешке 520 МПа а радни напон 435 МПа

## Толеранција грешака

Особине материјала које дозвољавају да заварени спој ради са грешкама одређују се затезањем (одређивањем дуктилности), испитивањем жилавости и одређивањем параметра механике лома, као што је критична дужина прслине. Ова испитивања се спроводе на завареним спојевима направљеним према квалификованим процедурама заваривања, а саме особине се одређују посебно за метал шав, основни метал и зону утицаја топлоте.

## 1.4. Особине материјала и заварених спојева

### 1.4.1. Статичка чврстоћа

Одређивање утицаја спољашњих сила на конструкцију преко генерисаних напона и деформације је основа анализе напона. Основна веза напона и деформација је илустрована конвенционалним испитивањем затезањем епрувете из кога се добијају основни подаци потребни за анализу напона. Спољашњој сили  $\Phi$  се супротстављају унутрашње силе, равномерно распоређене по површини  $A_0$ , које се називају напонима, чија је величина

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.3)$$

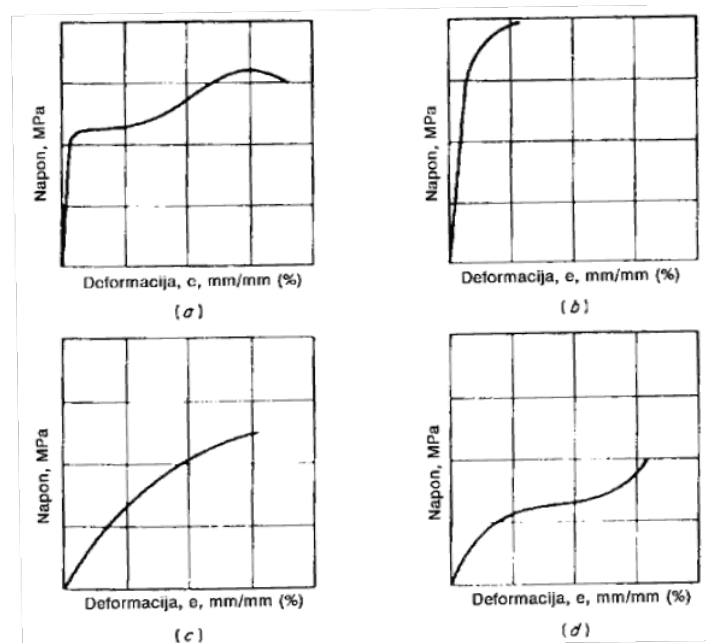
У једначини 1.3 сила  $F$  (N), а површина  $A_0$  (m<sup>2</sup>), напона  $\sigma$ , паскал (Pa). Напон се може дефинисати као унутрашња сила, изазвана дејством спољашње силе.

Сила  $F$  изазива издужење епривете. Како је напон равномерно распоређен по мерној дужини  $L_0$ , а на основу идеално хомогеног материјала, претпоставља се да овај равномерни напон изазива равномерно укупно издужење  $\Delta L$ . Деформација се одређује као

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (1.4)$$

Издужење  $\Delta L$  и мерна дужина  $L_0$  се мере у mm; деформација  $\varepsilon$  се мери у mm по mm, односно у %. Деформација може да се дефинише као промена јединице дужине под утицајем напона.

Основно аналитичко решење напона укључује зависност напона и деформације материјала. Ова је зависност различита за различите материјале и одређује се једноставним испитивањем затезањем или притиском материјала, у коме се записује дијаграм напон - деформација (слика 1.22). Слика 1.22. приказује неколико типова дијаграма. Слика 1.22.а одговара дуктилним челицима, код којих се пре лома јавља велика деформација. Слика 1.22.б се односи на кртије материјале, какви су високо легирани челици, код којих се пре лома јавља мала деформација. Овај тип дијаграма је типичан и за неке неметалне крте материјале, као што су неке врсте пластичних маса. Неки материјали, као бетон и ливено гвожђе, имају дијаграм напон - деформација као на слика 1.22.ц. Гума, врло еластичан материјал, има другачији тип криве напон - деформација, приказан на слици 1.22.д.



Слика 1.22. Неки типични дијаграми напон - деформација

Инжењерски материјали који се користе у конструкцијама имају линеаран почетни део зависности напон - деформација, па су напон и деформација директно пропорционални, према једначини

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (1.5)$$

то је познати Хуков закон. Величина  $E$  се зове модул еластичности или модул Јунга, и то је нагиб праволинијског дела дијаграма. Модул  $E$  се мери истом јединицом као и

напон. Његова вредност се разликује за различите врсте материјала, а мења се са температуром околине. Приближна вредност овог модула на собној температури за челик је  $210 \times 10^9$  Pa (210 GPa), а за легуре алуминијума, 70 GPa.

Модул еластичности је и мера крутости материјала. Материјал је крут ако је његова деформација у еластичном подручју мала. Према јед. 6. се види да ће за дати напон деформација бити мања за веће вредности  $E$ . **На пример, деформације компоненте од алуминијума ће бити већа од деформације исте такве компоненте од челика ако су изложене истом напону, за онолико пута колико је однос њихових модула еластичности (70) : (210) = 1 : 3.** Крутост је врло важна карактеристика када деформација мора да буде мала, нпр. код алата, турбинских ротора, заптивних спојева и код неких елемената нуклеарних реактора.

Анализа дијаграма напон - деформација указује на два основна дела - почетно еластично подручје, у коме се примењује Хуков закон и пратеће пластично подручје, у коме су деформације велике и Хуков закон не важи. Еластичност је особина материјала да се врати у првобитно стање по престанку дејства оптерећења. Еластично подручје је прва фаза оптерећења. У многим конструкцијама се захтева да се избегне трајна деформација да би се осигурала функција и непрекидна поуздана експлоатација; зато је пожељно да се дефинишу најважније механичке карактеристике у овом подручју.

Еластично подручје описују следеће механичке карактеристике:

- *Граница пропорционалности* је највећи напон, који материјал може да издржи без одступања од директне пропорционалности напона и деформација.
- *Граница еластичности* је највећи напон, који материјал може да издржи без појаве трајне деформације после потпуног отпуштања напона. Она је сасвим близу границе пропорционалности, коју је лакше одредити.

*Напон течења* је напон, при коме се јавља видљив пораст деформације без повећања напона. Појава течења настаје због тренутне пластичне деформације материјала и повезана је клизањем дуж појединих равни кристала материјала. Ова се вредност одређује из дијаграма напон - деформација. Неки материјали имају дијаграм са горњом тачком течења и доњом тачком течења. Други материјали немају тако изражену карактеристику, и за њих се обично дефинише напон течења при коме трајна деформација достиже договорену величину. То је конвенционални напон течења и најчешће се узима трајна деформација,  $\epsilon_0$ , једнака 0,2% као меродавна. У практичној примени тачка течења је прелаз између еластичног и пластичног подручја. Како су граница еластичности, граница пропорционалности и тачка течења конструкцијских челика врло блиске, дијаграм напон - деформација се може упростити са две праве линије, које се пресецају у тачки течења. Ова упрошћена варијанта, у којој Хуков закон важи до тачке течења, се обично користи у еластичној и еласто-пластичној анализи напона код ове врсте материјала.

Карактеристике пластичности материјала су оне које одређују његову способност да се супротстави лому, да се деформише и да апсорбује енергију. Три основне карактеристике у пластичном подручју се добијају из дијаграм напон - деформација материјала као и еластичне карактеристике материјала.

*Затезна чврстоћа* је максимални напон, који материјал може да издржи. Овај је напон једнак количнику максималног оптерећења и површине првобитног попречног пресека епрувете. Понекад се напон лома користи као мера чврстоће при пластичности. Напон лома је количник оптерећења при лому и почетног попречног пресека епрувете. За многе пластичне материјале су ове вредности блиске; за крте материјале оне су идентичне. Затезна чврстоћа је важна карактеристика при пројектовању. То је посебно случај код посуда под притиском где је материјал изложен затезању, као и у испитивању затезањем, и у условима статичког

оптерећења затезна чврстоћа се користи за одређивање притиска распрскавања посуде.

#### 1.4.2. Пластичност (дуктилност)

То је особина материјала да може да се деформише. Обично се мери на два начина. Први је начин процентуално издужење мерне дужине при лому, чему одговара процентуална деформација. Ако је, као на сл. 1.,  $L$ , коначне величина мерне дужине при лому, а  $L_0$  почетна величина мерне дужине, онда је процентуална деформација

$$A_e = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (1.6)$$

Други начин мерења дуктилности је *релативно сужење површине* исказано у виду

$$Z_a = \frac{s_0 - s_r}{s_0} \cdot 100 \quad (1.7)$$

где је  $s_0$  површина почетног попречног пресека, а  $s$  површина попречног пресека при лому. На ову карактеристику у извесној мери утиче величина епрувете.

Пластичност је важна особина материјала како за пројектовање тако и за производњу. Она се исказује као уграђен компензатор локалних напона, који нису разматрани или укључени у прорачун. На пример, у закованим спојевима мостова и зграда при нормалном оптерећењу и преоптерећењу може доћи до локалне пластичне деформације компоненти у околини закивака. То неће условити лом, јер конструкцијски челик има велику пластичност која омогућава прераспodelу и смањење локалних напона на месту концентрације напона. Слично, у посудама под притиском на спојевима, прикључцима и отворима се јављају велики локални напони, који се битно смањују течењем материјала. Пластичност је важна особина материјала у производњи и преради, као што је ваљање, ковање, извлачење и истискивање. Ако пластичност није адекватна, велике деформације, које се јављају у тим процесима могу довести до лома.

#### 1.4.3. Жилавост

*Жилавост* је способност материјала да апсорбује енергију током пластичне деформације. Често се мери апсорбованом енергијом у јединици запремине при оптерећењу до лома. Како је укупна енергија производ силе и померања, енергија по јединици запремине је једнака производу напона и деформације. Према томе, укупна енергија до лома је:

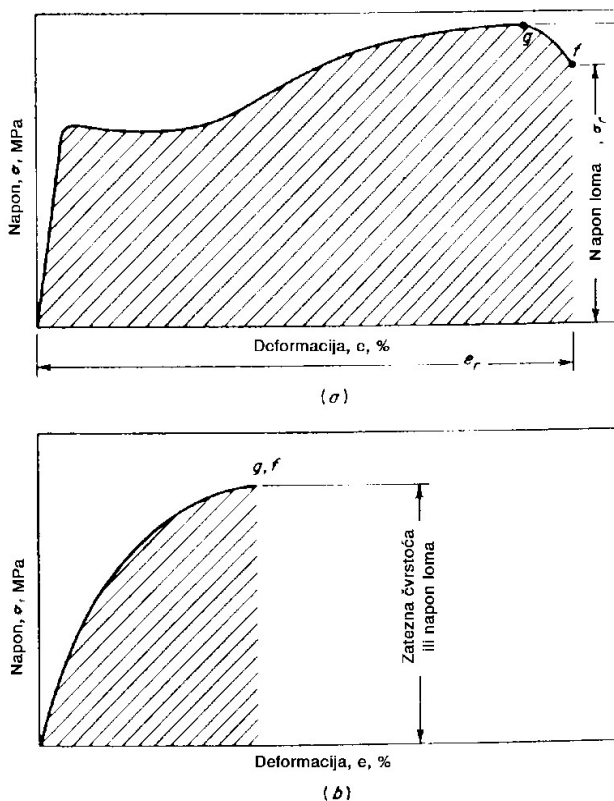
$$T_0 = \int_0^{\epsilon_r} \sigma \cdot d\epsilon \quad (1.8)$$

Жилавост је битна за делове, конструкције и посуде изложене механичким и термичким шокovima, и представља укупну површину испод дијаграма напон - деформација, слика 1.23. Ова се површина може одредити планиметром или приближним методама. Довољно је тачно за многе пластичне материјале да се узме производ затезне чврстоће и издужења при лому,  $R_m \cdot \epsilon_p$  као приближна мера површине испод дијаграма напон - деформација. Крти материјали имају малу жилавост, јер имају малу пластичну деформацију при лому.

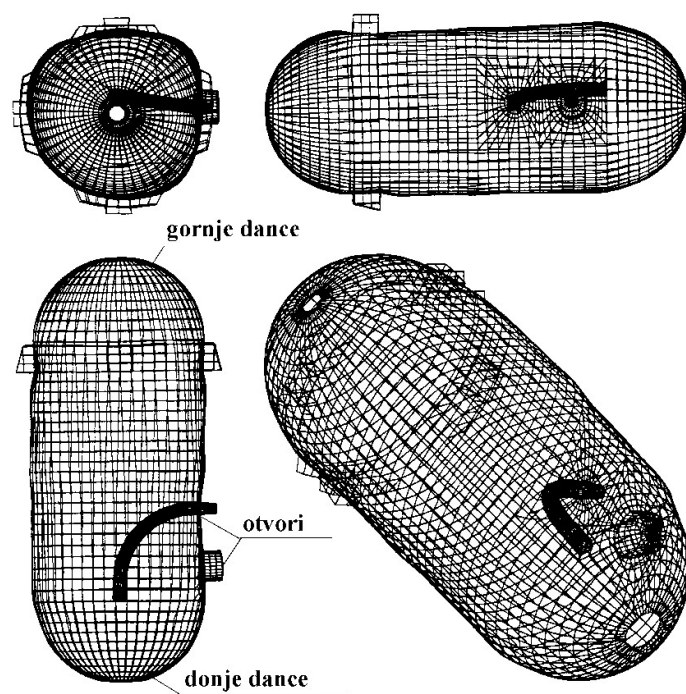
Посебан вид жилавости је она која се мери на епруветама са зарезом, названа "зарезна жилавост". Када је зарез врло оштар, у виду прслине, ова особина постаје

основа за одређивање поља напона у уском подручју врха прслине у оквиру механике лома.

Аналитичке формуле за одређивање напона су обично засноване на теорији еластичности и еластичном понашању материјала, тј. материјала који следи Хуков закон, и на први поглед би могло да се помисли да је најбољи за коришћење материјал који следи овај закон до лома. То није случај. Пластичне особине материјала, са могућношћу течења при вршним или локалним напонима и тиме прилагођавања делујућем оптерећењу прикладном прерасподелом унутрашњих напона, су најважније код многих конструкцијских материјала. На основу еластичности срачуната или стварна чврстоћа многих компоненти, разматрајући конструкцију у целини, биће знатно смањена ако није подупрta пластичном деформацијом на различитим малим подручјима компоненте где се јављају високи локални напони, слика 1.24.



Слика 1.23. Енергија као мера жилавост



Слика 1.24. Глобална слика деформација површинских и линијских елемената бидона

## 1.5. Прилог

### 1.5.1. Класификација заварених спојева према критичности

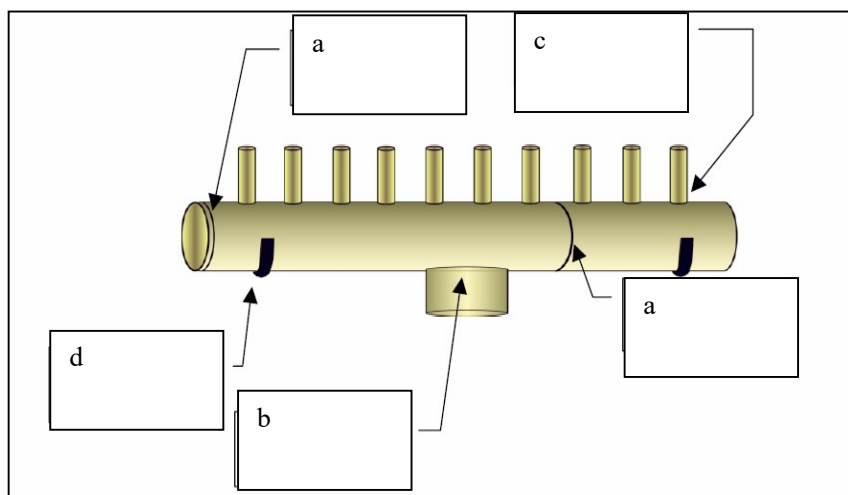
Стандардима су прописани услови остваривања и контроле заварених спојева као и дозвољена одступања за поједине класе квалитета. С обзиром да се ризици за околину разликују у зависности од положаја и функције споја, није могуће поуздано генерално и једнозначно извршити класификацију конструкција/производа добијених заваривањем. Конструкције истих особина у зависности од положаја и примене могу бити различите класе.

Класе квалитета заварених спојева у једној класи завареног производа су:

- а - Заварени спојеви изложени најоштријим условима експлоатације
- б - Заварени спојеви изложени оштрим условима експлоатације
- ц - Заварени спојеви изложени просечним условима експлоатације
- д - Заварени спојеви изложени исподпросечним условима експлоатације

Ова подела представља релативну скалу класификације заварених спојева.

На слици 1.25 види се пример врста заварених спојева једне посуде под притиском.



Слика 1.25. Класификација заварених спојева на колектору

Степен критичности ових спојева је:

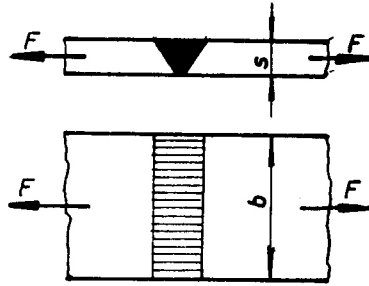
- Врло висок ниво (а) за радијалне заварене спојеве колектора и цеви.
- Висок ниво (б) за заварени спој између колектора и већих прикључака ( $D_e \geq 100\text{mm}$ )
- Низак ниво (ц) за заварени спој између колектора и прикључака прегрејача ( $D_e < 100\text{mm}$ )
- Врло низак (д) за заварене спојеве који нису изложени унутрашњем притиску

### 1.5.2. Прорачун статичке чврстоће завареног споја

Сучеони заварени спој је најчешће оптерећен на затезање или притисак, слика 1.26, па напон затезања  $\sigma_{zv}$  или напон притиска  $\sigma_{pv}$  у шаву треба да је мањи од допуштеног за ту врсту оптерећења ( $\sigma_{zvdop}$ ,  $\sigma_{pvdop}$ ). Према томе важе односи:

$$\sigma_{zv} = \frac{F}{s \cdot b_v} \leq \sigma_{zvdop} \quad (1.11)$$

$$\sigma_{pv} = \frac{F}{s \cdot b_v} \leq \sigma_{pvdop} \quad (1.12)$$



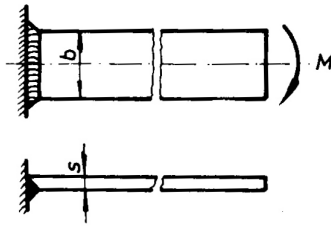
Слика 1.26. Сучеони заварени спој оптерећен затезањем

Овде је  $F$  затезна или притисна сила,  $s$  дебљина тањег дела у завареном споју (могућа већа дебљина шава се не узима у обзир), а  $b_v$  је активна дужина шава, која се може узети да је једнака дужини шава  $b$  (најчешће одговара ширини делова који се заварују), или се одређује према формули:

$$b_v = b - 2s \quad (1.13)$$

Сучеони шав може бити оптерећен и савијањем, слици 1.27, када на њега делује момент савијања  $M$ . У том случају напон савијања  $\sigma_{sv}$  шава треба да је мањи од допуштеног напона  $\sigma_{svdop}$ , па је:

$$\sigma_{sv} = \frac{M}{W} = \frac{M}{\frac{s \cdot b_v^2}{6}} \leq \sigma_{svdop} \quad (1.14)$$



Слика 1.27. Сучеони заварени спој, оптерећен савијањем

Одавде је  $W = \frac{s \cdot b_v^2}{6}$  аксијални отпорни момент пресека шава, при чему се  $b_v$  узима једнако  $b$ , с обзиром на конструкцију шава.

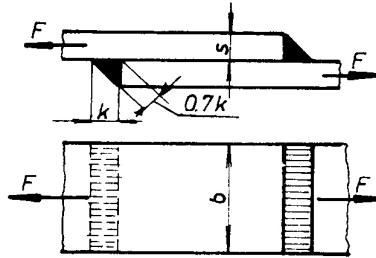
У случају истовременог деловања силе затезања  $F$  и момента савијања  $M$  на заварени спој, резултујући напон  $\sigma_{rv}$  ће бити:

$$\sigma_{rv} = \sigma_{sv} + \sigma_{zv} \leq \sigma_{svdop} \quad (1.15)$$

Ако је заварени преклопни спој оптерећен затезањем, слика 1.28, чеони угаони шав се прорачунава на смицање према површини најмањег (критичног) попречног пресека, чија је дужина  $b_v = b$ , а ширина  $0,7k$ , где је  $k$  величина катете шава. Најчешће се узима да је  $k = s$ . Напон смицања  $\tau_{cv}$  у шаву треба да је мањи од допуштеног напона  $\tau_{cvdop}$ , па како у преношењу оптерећења учествују две површине смицања  $2 \cdot 0,7k \cdot b_v$ , то је:

$$\tau_{sv} = \frac{F}{2 \cdot 0,7k \cdot b_v} \leq \tau_{svdop} \quad (1.16)$$

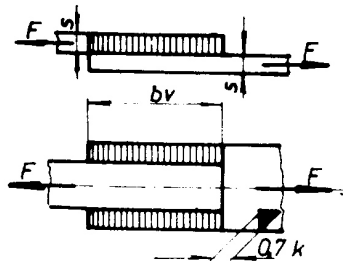
Овде је  $F$  сила затезања споја.



Слика 1.28. Преклопни заварени спој, оптерећен затезањем (шавови су оптерећени смицањем)

Код преклопног завареног споја, чија је конструкција приказана на слици 1.29, задатак прорачуна се најчешће своди одређивање потрбне дужине преклопа  $b_v$  према допуштеном напону на смицање бочног угаоног шава  $\tau_{свдоп}$ :

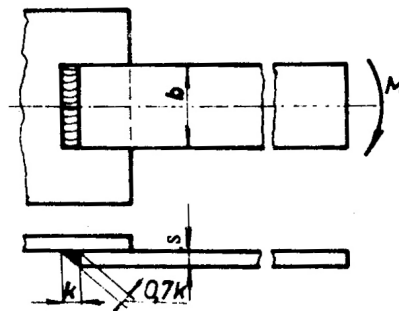
$$b_v = \frac{F}{2 \cdot 0,7k \cdot \tau_{svdop}} \quad (1.17)$$



Слика 1.29. Преклопни заварени спој, оптерећен затезањем, код кога се одређује дужина шавова  $b_v$

Ако на преклопни заварени спој делује момент савијања  $M$ , слика 1.30, у шаву ће се јавити напон смицања  $\tau_{св}$ , који треба да буде мањи од допуштеног напона смицања  $\tau_{свдоп}$ :

$$\tau_{sv} = \frac{M}{0,7k \cdot b_v^2} \leq \tau_{svdop} \quad (1.18)$$



Слика 1.30. Преклопни заварени спој, оптерећен савијањем

Ако истовремено делује сила  $F$  и момент  $M$ , изазивајући напон смицања, онда се одређује резултујући напон смицања  $\tau_{рс}$  у шаву:

$$\tau_{rv} = \tau_{sv} + \tau_{vm} \leq \tau_{svdop} \quad (1.19)$$

Карактеристичан је случај оптерећења када на заварени спој делује сила  $F$  паралелна шаву. Тада је шав, слика 1.31, оптерећен по дужини  $b$  силом и моментом савијања те силе. Напон смицања  $\tau_{св}$  од силе  $F$  и  $\tau_{свм}$  од момента  $M$  делује у две међусобно управне равни, тако да је резултујући напон смицања  $\tau_{рс}$ :

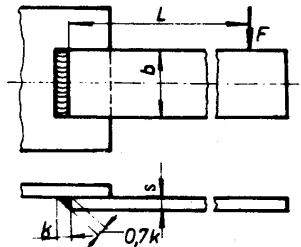
$$\tau_{rv} = \sqrt{\tau_{sv}^2 + \tau_{vm}^2} \leq \tau_{svdop} \quad (1.20)$$

при чему су компонентни напони:

$$\tau_{sv} = \frac{F}{2 \cdot 0,7k \cdot b_v} \quad (1.21)$$

$$\tau_{vm} = \frac{M}{0,7k \cdot b_v^2 \cdot 6} \quad (1.22)$$

и момент савијања.  $M = F \cdot L$

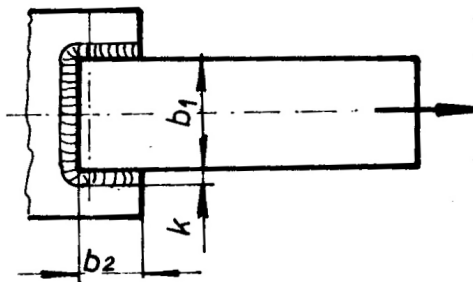


Слика 1.31. Преклопни заварени спој, оптерећен силом паралелном шаву

Ако се преклопни заварени спој састоји од бочних и чеоних угаоних шавова, сл. 32, и ако је изложен затезању силом  $F$ , напон смицања шавова  $\tau_{св}$  одређује се према формули:

$$\tau_{sv} = \frac{F}{0,7k(b_1 + 2b_2)} \quad (1.23)$$

где је  $b_1$  дужина чеоног угаоног шавова, а  $b_2$  дужина бочног угаоног шавова, тако да је  $b_1 + 2b_2$  укупна дужина шавова у споју. И овај задатак се може свести на одређивање дужине преклопа  $b_2$  према допуштеном напону смицања зава  $\tau_{свдоп}$ .



Слика 1.32. Преклопни заварени спој са бочним и чеоним угаоним шавовима