

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА У КРАГУЈЕВЦУ



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Дипломске академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Металне конструкције

Број индекса: 81/2001

ДИПЛОМСКИ РАД

Ивана М. Ивановић

**Статичка носивост и замор заварених
спојева**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Весна Марјановић – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Крагујевац, 2012.

Поставка дипломског рада

У оквиру дипломског рада кандидат треба да темељно истражи: заваривање као један од начина спајања металних конструкција, замор материјала и концентрације напона у завареним спојевима. Треба такође да прикаже начин прорачуна статичке и динамичке чврстоће завареног споја са посебним освртом на утицајне факторе и начинима за њихово одређивање.

.

Препоручена литература:

- [1] Јовановић, М. И др., **Машински материјали**, Машински факултет, Крагујевац 2003.
- [2] Јовановић М., Д. Адамовић и В. Лазић, **Технологија заваривања- приручник**, самостално ауторско издање, 2003.
- [3] Николић, Р. и В. Марјановић, **Металне конструкције- Приручник за прорачуне**, Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [4] Николић, Р., **Металне конструкције** – Белешке са предавања, 2008
- [5] Милосављевић, М., М. Радојковић и Б. Кузмановић, **Основи челичних конструкција**, Грађевинска књига, Београд 1986.
- [6] Перовић, З. Д., **Заварене конструкције**, Универзитет Црне Горе, Подгорица, 2002.
- [7] Бабин, Ј. Никола, Бркљач, Б. Никола, Шостаков, С. Растислав, **Металне конструкције**, Нови Сад, 2006.

Крагујевац, јун 2012

ментор:
Др Весна Марјановић, доцент

СТАТИЧКА НОСИВОСТ И ВРСТЕ ЗАМОРА ЗАВАРЕНОГ СПОЈА

Резиме рада: Заварени спојеви због, свог специфичног облика, изазивају поремећај тока линија сила и концентрацију напона. Код статички оптерећених конструкција, концентрација напона (ефекат заеза) није толико неповољна, јер се напонски врхови затупљују при преласку у стање пластичног течења. Рачунски напони се пореде са допуштеним напоном завареног споја који представља производ допуштеног напона основног материјала и фактора заваривања. Фактор заваривања обухвата утицај квалитета и облика завареног споја на чврстоћу. Динамичка издржљивост завареног споја при деловању циклично променљивих напона знатно је мања од динамичке издржљивости основног материјала. Прорачун редуковане динамичке издржљивости изводи се множењем динамичке издржљивости основног материјала факторима који узимају у обзир облик и тип завареног споја, квалитет заваривања, напонско стање и многе друге утицаје. Теоријски фактори концентрације напона најчешће се добијају методом фотоеластичности и методом коначних елемената.

Кључне речи: Заваривање, заварени спој, замор материјала, концентрација напона, статичка издржљивост, динамичка издржљивост

STATIC ENDURANCE AND TYPES OF FATIGUE OF WELDED JOINT

Abstract: Due to their specific shape, welded joints cause disturbance of force flow lines and stress concentration. With statically loaded constructions, stress concentration (tensile strength) is not so unfavorable, because stress peaks blunt during their transformation into the state of plastic flow. Equivalent stresses are compared to allowable stress of a welded joint which represents a product of the allowable stress of basic material and the welding factor. The welding factor includes the impact of quality and shape of the welded joint on the strength. The dynamic endurance of the welded joint during the effect of cyclically varying stresses is significantly lower than the dynamic endurance of basic material. Calculation of the reduced dynamic endurance is carried out by multiplying dynamic endurance of basic material by factors which take into consideration the shape and type of welded joint, welding quality, stress state and many other effects. Theoretical factors of stress concentration are most often obtained using the photo elasticity method and finite element method.

Key words: welding, welded joint, fatigue, stress concentration, static endurance, dynamic endurance

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
2.ВРСТЕ СПОЈЕВА У МЕТАЛНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА.....	2
2.1.Заковани спојеви.....	2
2.2.Завртњеве и чепови.....	3
2.3.Заваривање.....	4
2.3.1 Врсте спојева.....	7
3.ПРОРАЧУН СТАТИЧКЕ ЧВРСТОЋЕ ЗАВАРЕНОГ СПОЈА.....	10
3.1.Прорачун сучеоних спојева.....	10
3.2.Прорачун угаоних спојева.....	12
4. ПРОРАЧУН ДИНАМИЧКЕ ЧВРСТОЋЕ ЗАВАРЕНОГ СПОЈА.....	15
4.1.Врсте замора материјала.....	15
4.1.1.Врсте променљивих напрезања и напона.....	16
4.2.Концентрација напона.....	19
4.2.1.Концентрација напона код сучеоног споја.....	21
4.2.2.Т-спој и крстасти спој.....	24
4.2.3.Преклопни спојеви.....	25
5.ПРОМЕНЕ СВОЈСТАВА ЗОНЕ УТИЦАЈА ТОПЛОТЕ.....	27
5.1.Ниско угљенични и ниско легирани челик.....	27
6.ПРОРАЧУН ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА ИЗЛОЖЕНИХ ПРОМЕНЉИВОМ ОПТЕРЕЋЕЊА.....	30
6.1.Константна амплитуда напона.....	30

7. ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА НАПРЕГНУТИХ ПРОМЕНЉИВОМ ОПТЕРЕЋЕЊУ.....	38
8. ЗАКЉУЧАК.....	47
9. ЛИТЕРАТУРА.....	48

1. УВОД

Свака машина, уређај или конструкција састављена је из више различитих елемената који чине јединствену целину, способну да преноси пројектом предвиђено оптерећење. У случају металних конструкција, конструкцијски систем није монолитан, већ се састоји од делова који се појединачно израђују а затим повезују у радионици (радионички наставци) или на градилишту (монтажни наставци). Настављање и повезивање елемената може да се оствари помоћу механичких спојних средстава (закивци, завртњевци, чепови итд.) или технолошким поступцима (заваривањем или лепљењем).

Заваривање је технолошки поступак за спајање истих или сличних метала помоћу високе температуре која изазива топљење додатног и основног материјала на месту споја. На овај начин се остварује континуалан спој елемената који се заварују. Овакав начин спајања има широку примену за обликовање конструкција од полуфабриката и то од лимених ваљаних производа (резервоари, бункери, коморе, оплате, облоге и сл.), од цевних и ваљаних профила (решеткасти носачи, рамне конструкције, стубови, подупирачи и сл.) као и за израду кућишта, ослонаца, шасија и машинских елемената који се добијају спајањем главчине и венца (зупчаници, каишници и сл.).

Заварене конструкције у мостоградњи, носеће челичне конструкције, котлови и судови под притиском подлежу прописима и стандардима којима се дефинише њихово обликовање и прорачун. У овом раду ће бити речи о завареним конструкцијама примењеним у општем машинству за које важе прорачуни прилагођени таквим конструкцијама. Посебно је дат приказ прорачуна статичке чврстоће завареног споја, а посебно приказ прорачуна динамичке чврстоће.

При прорачуну на статичку чврстоћу полази се од напона завареног споја, који представља производ дозвољеног напона основног материјала и фактора заваривања. Динамичка издржљивост завареног споја при деловању циклично променљивих напона знатно је мања од динамичке издржљивости основног материјала јер сам спој представља извор коцентрације напона, око њега су промењена својства материјала у зони утицаја топлоте а могуће су и грешке у шаву итд.

Прорачун редуковане динамичке издржљивости завареног споја изводи се најчешће множењем динамичке издржљивости основног материјала утицајним факторима (фактором квалитета заваривања, фактором напонског стања, фактором осталих утицаја итд.). Начини одређивања ових фактора су многобројни и често веома компликовани. У овом раду су приказани неки од начина одређивања ових фактора.

2. ВРСТЕ СПОЈЕВА У МЕТАЛНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА

Свака машина, уређај или конструкција састављена је из више делова који се морају међусобно спајати. Избор метода спајања зависи од разних фактора.

- да ли ће се метални делови после спајања раздвајати, а да се притом не оштете ни спојени делови ни делови помоћу којих су спојени, или се делови после спајања неће раздвајати;
- да ли ће на спојеве деловати сила или не или треба ли спојеви да мењају смер делујућих сила;
- какви су услови производње и монтаже, итд.

Сви начини спајања деле се на раздвојиве и нераздвојиве.

Раздвојиви су када се и после спајања метални делови могу раздвојити без оштећења. У ову групу убраја се спајање вијцима и наврткама, чивијама, осовиницама, клиновима, спојницама и др.

Нераздвојиве везе су оне код којих би свако раздвајање спојених делова изазвало оштећење. Овде се убраја и спајање закивањем, лемљењем, заваривањем, пресовањем, лепљењем.

Да ли спој треба да буде раздвојив или нераздвојив зависи пре свега од функције, трајности и економичности спојених делова.

Основни конструктивни елементи (штапови, лимови и профилисани носачи) се склапају у елементе конструкције.

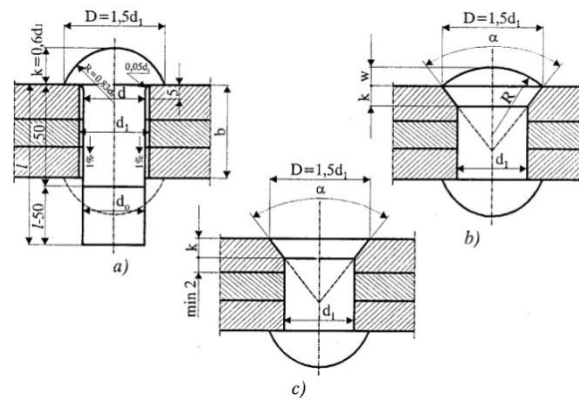
Због ограничене дужине елемената и могућности транспорта елементи се настављају, спајају.

Спајање елемената конструкција се врши:

- закивцима,
- завртњевима,
- чеповима и
- заваривањем.

2.1 Заковани спојеви

Заковани спојеви су чврсти спојеви који се једном спојени, не могу без разарања раздвојити. Остварују се помоћу закивака који се постављају у припремљене отворе у деловима и закивају. Примењују се за спајање лимова, профила и делова мале дебљине. Закивање у знатној мери потискује заваривање. Међутим, због високог степена поузданости закованих спојева њихова примена је још значајна у мостоградњи, градњи дизалица и кранова а посебно при спајању лимова, профила и других делова мале дебљине израђених од лаких метала и њихових легура. Примена закованих спојева нарочито је заступљена у градњи авиона и возила. На слици 1.1 приказане су врсте закивака:



Слика 1.1. Врсте закивака

- а) Закивак са полукружном главом; б) Закивак са полуупуштеном главом;
 ц) Закивак са упуштеном главом

2.2 Завртњеве и чепови

Раздвојива веза помоћу завртња и навртке има велику примену у машинству. То се тумачи сигурношћу у раду, раздвајањем без оштећења (употребљавају се више пута), ниском ценом (масовна производња у специјализованим фабрикама).

Завртњеве се израђују као:

- неподешени
- подешени и
- преднапрегнути.

Према новим називима, ова подела гласи:

- завртњеве без тачног налегања - О завртњеве,
- завртњеве са тачним налегањем - ОТ завртњеве и
- преднапрегнути завртњеве - VV завртњеве

На слици 1.2 приказан је завртањ и његови делови, означене величине су:

d - пречник врата завртња,

d_k - пречник језгра завртња,

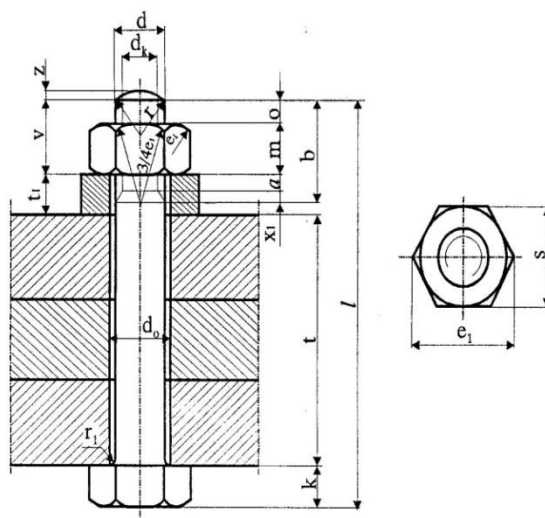
d_0 - пречник рупе,

k - дебљина главе завртња,

m - дебљина навртке,

e, r, r_1 - полупречници заобљења и

l - дужина завртња.

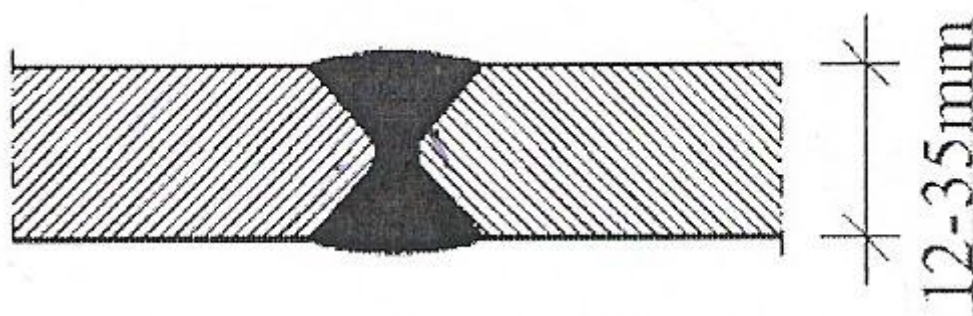


Слика 1.2. Завртањ и његови делови

Веза са чепом реализује се кад је потребно да се оствари кретање између делова у споју.

2.3 Заваривање

Заваривање топљењем је спајање два иста или слична метала којим се помоћу топлотне енергије остварује материјални континуитет тако да спој има што равномерније корисне особине (слика 1.3). Заваривање је један од најважнијих поступака спајања јер је обликовање завареног споја једноставније од закивања, а заварени спојеви су лакши од закованих. Осим тога, код појединачне и малосеријске производње уместо израде делова ливењем и ковањем обликовање се врши заваривањем. На тај начин постижу се уштеде у материјалу и добија уцени коштања по комаду, јер израда делова ливењем и ковањем захтева скупе моделе и алате.



Слика 1.3. – Пример вара

У поређењу са закивањем, заваривање има следеће предности:

- једноставнија је технологија припреме,
- брже је,
- шира је могућност његове примене,
- настале грешке лакше је отклонити на завареном месту,
- заварене конструкције лакше су од закованих.

Зато је, заваривање економичније у односу на закивање и везу завртњевима.

Недостатак заваривања у односу на закивање је што:

- Квалитет завареног споја знатно зависи од заваривача. Чак и исти заваривач постиже различите квалитете у истом радном дану, на истим предметима рада;
- Контрола квалитета спојева у радионици и на градилишту је компликованија
- Осетљивост на климатске услове на градилишту (температура, ветар);
- Већа осетљивост на дејство пожара;
- Заварене везе нису монтажано-демонтажне.

На сликама 1.4 и 1.5 приказани су примери заваривања.



Слика 1.4



Слика 1.5

Заварљивост је способност материјала да може да се завари. Материјал је заварљив ако су испуњена три услова:

1. Оперативна заварљивост-да је могуће остварити материјални континуитет завареног споја између ивица делова које треба спојити, без грешака које се јављају приликом израде шави;
2. Металуршка заварљивост-ако је први услов испуњен, онда даље, шав и њихова околина треба да имају тражене особине;
3. Конструктивна заварљивост-заварена конструкција као целина (с обзиром на њену крутост, облик и сопствене напоне) треба да има особине које одговарају понашању конструкције за време експлоатације.

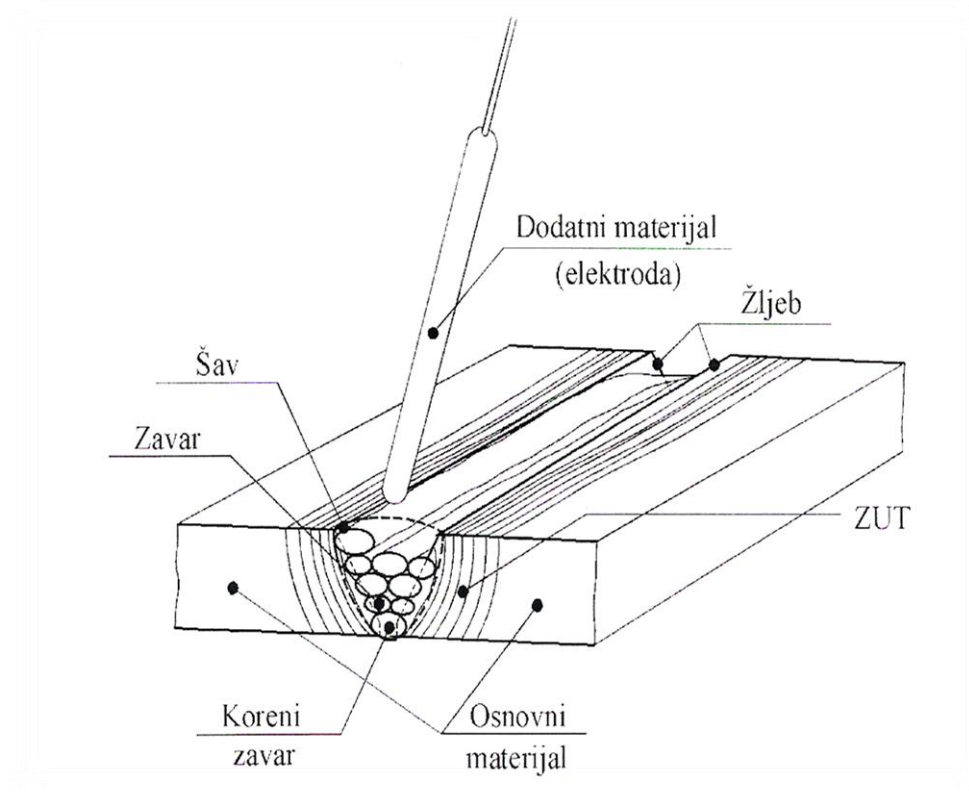
Основни материјал је материјал од кога су израђени делови које треба заваривањем спојити.

Додатни материјал је материјал који пре заваривања не припада деловима које треба спојити, већ се за време процеса заваривања топи и учествује у остваривању континуитета, у спајању делова који се заварују (жица или електрода).

Врсте заваривања се деле према изворима топлотне енергије. Постоји зависност између температуре на коју су доведене ивице делова који се спајају и притиска између површина које се спајају. Што је температура већа то је притисак мањи.

Спој одређује међусобни положај делова који се заварују. Шав је само место спајања а завар показује начин топљења електроде - да ли се празнина између елемената који се спајају попуњава са једним или више слојева.

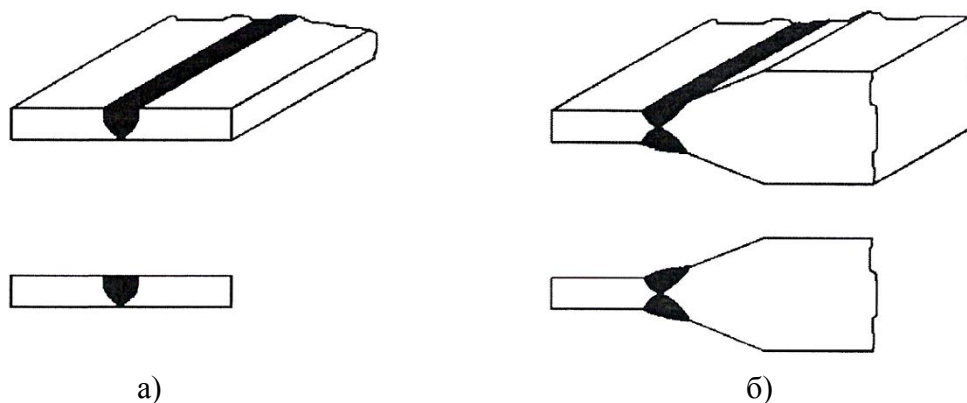
Саставни делови шави су приказани на слици 1.6



Слика 1.6 Саставни делови шави

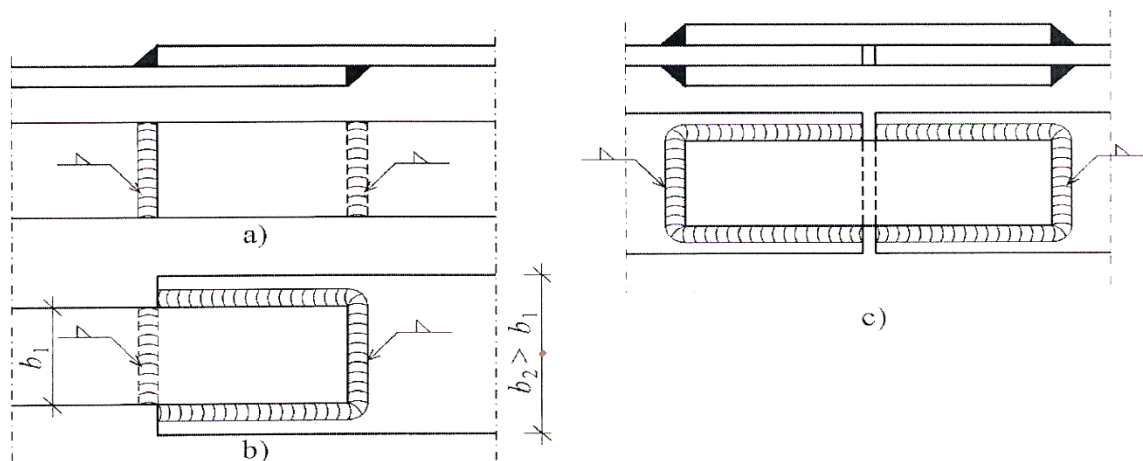
2.3.1 Врсте спојева

Сучеони спој - оба комада леже у истој равни па се доводе до сучељавања и онда спајају, слика 1.7



Слика 1.7. Сучеони спојеви: а) Елементи исте дебљине; б) Елементи различите дебљине

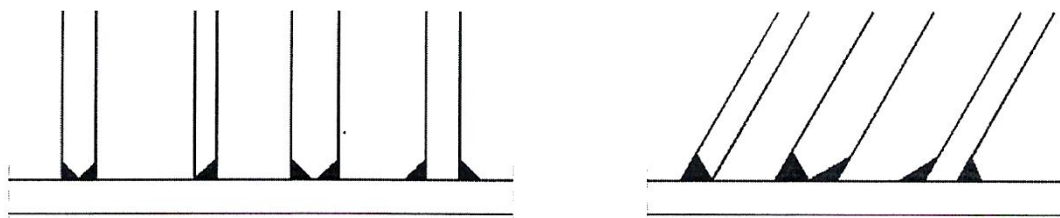
Преклопни – ако се комади преклапају, (или су у истој равни, али се спајају подвезама које их преклапају), слика 1.8



Слика 1.8 Преклопни спојеви: а), б) Директни преклопни спојеви; в) Преклопни спојеви са подвезицама.

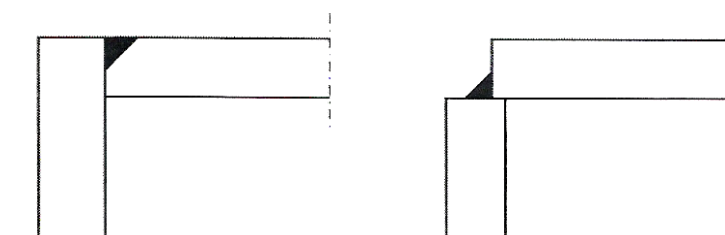
Угаони - ако делови заклапају неки угао - најчешће прав, слика 1.9

Елементи који се спајају под углом различитим од 180.



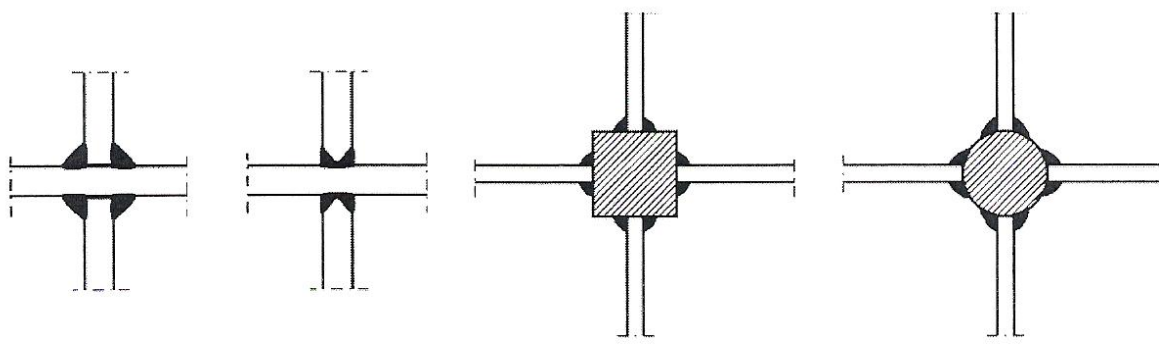
Слика 1.9 а) Прави угаони спојеви (сучеони шавови са пуном пенетрацијом, сучеони шавови са делимичном пенетрацијом, угаони шавови) б) Коси угаони спојеви (сучеони шавови, угаони шавови)

На слици 1.10 приказани су прекинути угаони шавови.



Слика 1.10 Прекинути угаони шавови

На слици 1.11 приказани су крстасти спојеви.



Слика 1.11 Крстасти спојеви

3. ПРОРАЧУН СТАТИЧКЕ ЧВРСТОЋЕ ЗАВАРЕНОГ СПОЈА

Заварени спојеви због свог специфичног облика, изазивају поремећај тока линија сила и концентрацију напона. Код статички оптерећених конструкција, концентрација напона (ефекат заеза) није толико неповољна, јер се напонски врхови затупљују при преласку у стање пластичног течења. Рачунски напони се пореде са допуштеним напоном завареног споја који представља производ допуштеног напона основног материјала и фактора заваривања.

3.1 Прорачун сучеоних спојева

При прорачуну сучеоног споја за дебљину шава се узима дебљина лимова који се спајају. Ако се спајају лимови различитих дебљина, узима се мања дебљина. Прорачунска дебљина шава у сучеоном споју је дужина на којој је постигнута потпуна дебљина шава. По правилу то је дужина или ширина лима који се спаја. Како у шавовима на почетку и завршетку увек има грешака, то треба одговарајућим мерама осигурати да шав има потпуну дебљину на целој дужини спајања. То се остварује коришћењем тзв. полазних плочица које се припоје на почетку и крају жлеба. Оне служе за правилно формирање почетка и краја шава. Након завршеног заваривања ове се плочице одстрани.

Прорачун сучеоних спојева врши се на исти начин као и прорачун елемената који се спајају што значи да је њихова носивост обезбеђена правилним димензионисањем тих елемената. Због могућих грешака при извршењу сучеоних спојева, мора да се изврши њихова контрола и сврставање у одговарајућу класу квалитета.

Према условима израде шавова и извршене контроле, шавови се сврставају у три класе: специјални квалитет S, квалитет I и квалитет II. За материјал шава вредности коефицијента k су дате у Табели 1.

Табела 1. Вредности коефицијента (k)

Квалитет шава	Врсте напрезања	Вредност k	
		Č 0361, Č 0362, Č 0363 Č 0451, Č 0452, Č 0453	Č 0561 Č 0562 Č 0563
Специјални квалитет	Затезање или савијање	1.0	1.0
	Притисак	1.0	1.0
	Смицање	0.6	0.6
Квалитет I	Затезање или савијање	0.8	0.8
	Притисак	1.0	1.0
	Смицање	0.6	0.6
Квалитет II	Затезање или савијање	0.72	0.65
	Притисак	1.0	0.8
	Смицање	0.55	0.5

Допуштени напон шава се рачуна као:

$$\sigma_{s\,dop} = k \sigma_{dop}$$

Шавови класе S квалитета морају да буду:

1. Једри и без напрслина,
2. Без грешака на почетку и крају шави,
3. Са кореном шави који је очишћен и поново заварен,
4. Без зареза и надвишења на лицу и наличју шави,
5. Прозрачени по целој (ознака 100 %) дужини да би се доказао тражени квалитет.

Шавови класе I квалитета треба да задовоље прва три захтева, а четврти и пети захтев су ублажени, пошто не мора да се врши обрада ивица и наличја шави и довољно је прозрачење од 10 до 50 % његове дужине.

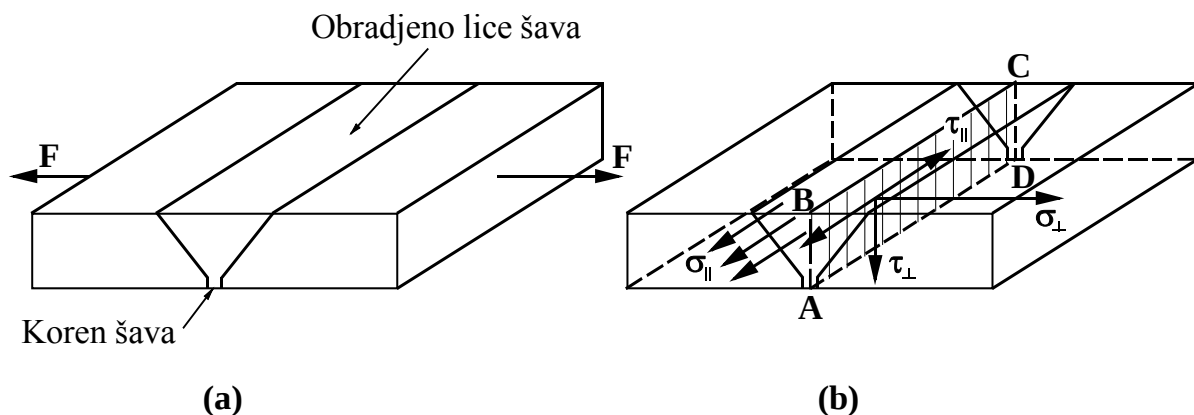
Шавови класе II квалитета треба да задовоље исте захтеве као и шавови класе I квалитета али се не мора вршити прозрачивање.

Прозрачивање је контрола шави без разарања и може се вршити различитим поступцима, као што су радиографска метода, магнетоскопска контрола или ултразвучна контрола.

Упоредни напон код сучеоног шави се одређује по VI хипотези о сломи материјала (Huber-Mises-Hencky), па услов за прорачун гласи:

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp}\sigma_{\parallel} + 3(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel})^2} \leq \sigma_{s\,dop}$$

Где су ознаке напона $\sigma_{\perp}$, $\sigma_{\parallel}$, $\tau_{\perp}$ и $\tau_{\parallel}$ објашњене на слици 1.12



Слика 1.12. а) Изглед сучеоног шави; б) Меридавна равни за прорачун са напонима.

На слици 1.12 приказан је сучеони шав и меридавна равни за његов прорачун. То је равни попречног пресека, ABCD, а не равни споја. Ознаке напона су следеће:

$\sigma_{\parallel}$ - нормални напон на чеону површину шави, усвојен да делује на трагу чеоне и меридавне равни, тако да је паралелан са подужном осом шави;

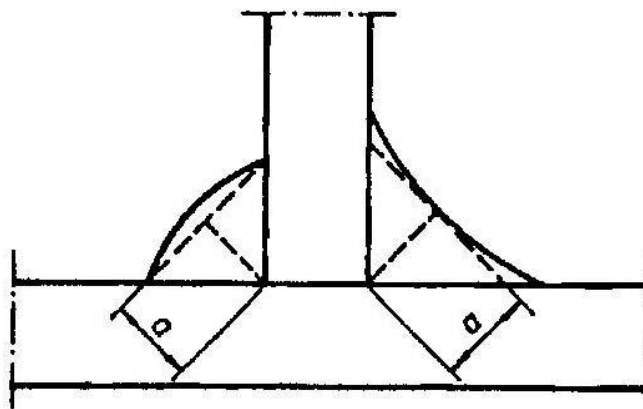
$\sigma_{\perp}$ - нормални напон на меридавну равни шави и на подужну осу шави;

$\tau_{\parallel}$ - смичући напон у меридавној равни паралелан са подужном осом шави и

$\tau_{\perp}$ - смичући напон у меридавној равни управан на подужну осу шави.

3.2 Прорачун угаоних шавова

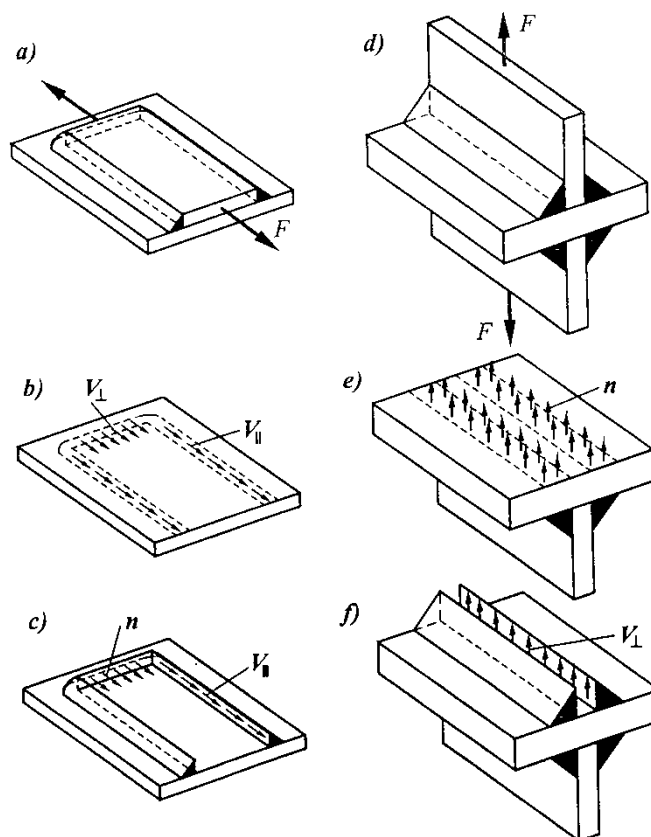
Прорачунска дебљина, a угаоног шави је висина равнокраког правоуглог троугла уцртаног у пресек шави (слика 1.13). При заваривању под заштитом прашка прорачунска дебљина се може због дубљег увара повећати и до $0,6 a \leq 3 \text{ mm}$.



Слика 1.13 Прорачунска дебљина угаоног шави

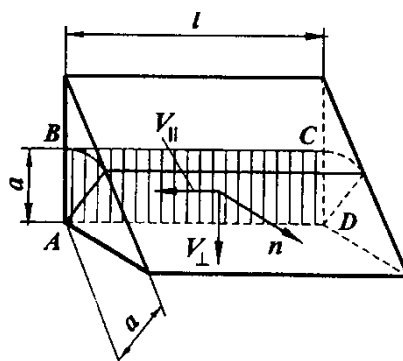
Рачунска дужина l угаоног шави је дужина на којој је постигнута предвиђена дебљина a . Уколико се коришћењем полазних плочица обезбеди да шав има потпуну дебљину по целој дужини спајања, тада је рачунска дужина једнака укупној дужини шави. У супротном случају се рачунска дужина одређује умањењем укупне дужине шави за дужине почетног и завршног кратера, при чему се усваја да је дужина кратера једнака дужини шави.

На слици 1.14 приказани су могући начини оптерећења шавова, односно појаве различитих напонских стања у угаоном шаву.



Слика 1.14 Илустрација напонских стања у угаоним шавовима
зависно од усвојене равни споја

У угаоном шаву владају вишеосна напонска стања. Приликом прорачуна угаоног шави, меродаван је пресек шави ABCD (слика 1.15).



Слика 1.15 Напони угаоног шави у меродавном пресеку

Овде су приказани следећи напони:

n - напон притиска или затезања који делује управно на раван споја ABCD;

$V_{\perp}$ - напон смицања који делује управно на дужину шави, а лежи у равни ABCD;

$V_{\parallel}$ - напон смицања који делује у правцу дужине шави, а лежи у равни ABCD;

Упоредни напон у угаоном шаву се рачуна према изразу:

$$\sigma_u = \sqrt{n^2 + V_{\perp} + V_{II}^2}$$

Доказ сигурности заварене везе изведене угаоним шавовима врши се према изразу:

$$\sigma_u \leq \sigma_{u,dop}$$

Где је $\sigma_{u,dop}$ - допуштени напон за угаоне шавове дат у стандарду JUS и E7.150.

4. ПРОРАЧУН ДИНАМИЧКЕ ЧВРСТОЋЕ ЗАВАРЕНОГ СПОЈА

4.1 Врсте замора материјала

У експлоатацији, при стварним условима рада, машинске конструкције, склопови и делови најчешће су подвргнути променљивим оптерећењима и напонима. Из разлога што су ломови машинских делова при дуготрајном деловању оваквих оптерећења настајали по истеку извесног времена, сматрало се да се сам материјал, на неки начин, заморио и да му се, самим тим, смањила способност да издржава напоне и оптерећења.

Термин замор материјала и до данас се задржао за описивање понашања машинских делова и конструкција у условима деловања дуготрајних променљивих оптерећења.

Сам процес заморног лома данас је добро проучен. Сматра се да је тај процес временски подељен у три фазе.

У првој фази долази до измене механичких и структурних особина материјала под утицајем дуготрајног променљивог напрезања. У другој фази долази до иницирања (настајања) микроскопски малих заморних прслина. Ове прслине настају на хетерогеним местима материјала, било да су та места већ постојала или да су настала у предходним периодима експлоатације конструкције. Практично, заморне прслине најчешће настају на површини машинских делова, јер ту постоје ослабљена места у виду зареза и неравнина насталих при обради и изради. Ако максималне вредности променљивих напона на тим местима нису довољно велике, ове прслине се неће даље ширити и до лома неће ни доћи. Најчешће се прслина шири на месту где је локални напон повећан тј. где постоји концентрација напона услед промене облика машинског дела. Све промене попречног пресека делова као што су углови, жљебови, отвори и слично представљају изворе концентрације напона. Постепено ширење заморних прслина доводи до њеног повећања до макро размера и до смањења површине активног пресека машинског дела тако да, када прслина достигне одређену вредност, долази до наглог завршног лома.

На слици 1.16 дијаграмски су приказане фазе заморног разарања



Слика 1.16 - Фазе заморног разарања

Трајање појединих фаза замора у односу на укупни век зависи од степена концентрације напона и хомогености материјала. У принципу, са повећањем степена концентрације напона и нехомогености материјала скраћује се време за иницирање заморне прслине, а повећава време ширења заморне прслине.

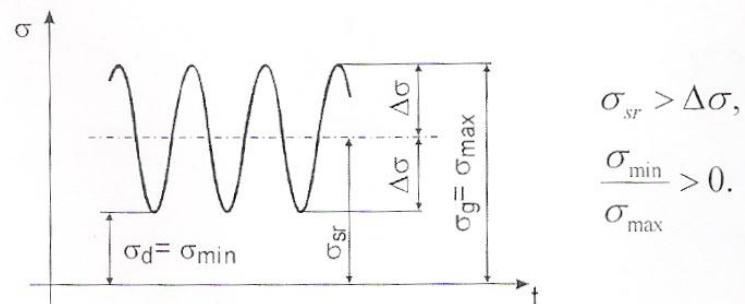
4.1.1. Врсте променљивих напрезања и напона

Променљива напрезања у експлоатацији зависе од режима рада, који може бити стационаран или нестационаран. Стационарни режим рада јавља се код машина које раде непрекидно на постојаном режиму рада са правилним циклусима оптерећења и истим нивоима напона у циклусу (циклична оптерећења и напони). Циклично променљиви напони су најјасније изражени у машинама и механизмима са повратним кретањем.

Код роторних машина неизбежно је циклично оптерећење услед неуравнотежености, радијалних и бочних бацања и сл.

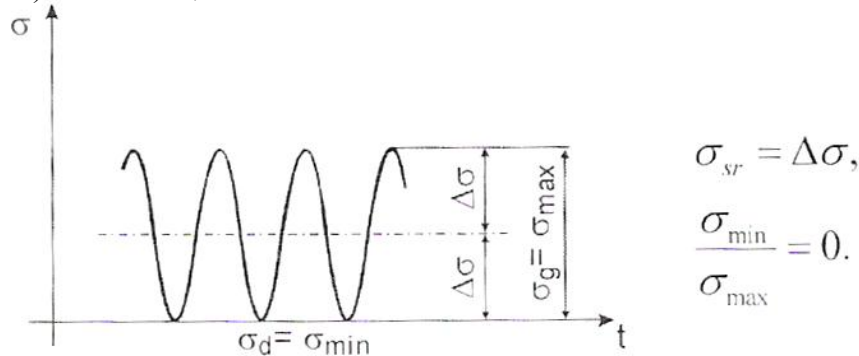
Карактер циклично променљивих напона одговара једном од четири основна случаја:

1. Једносмерно променљив (највећи и најмањи напони су истог знака) слика 1.17;



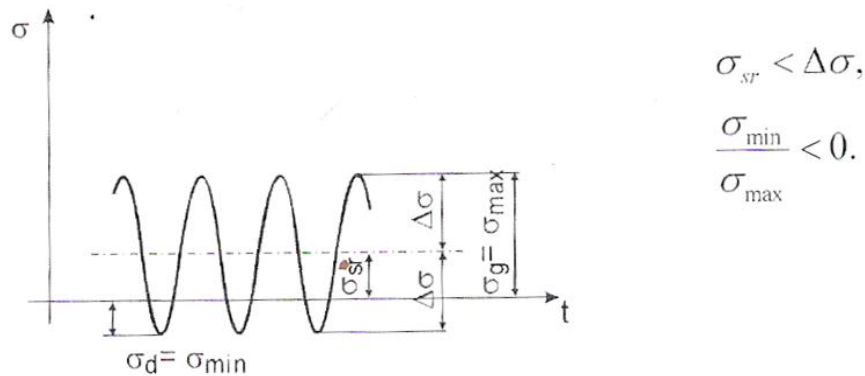
Слика 1.17 - Једносмерно променљив напон

2. Чисто једносмерно променљив (напони се мењају од нуле до максималне вредности) слика 1.18;



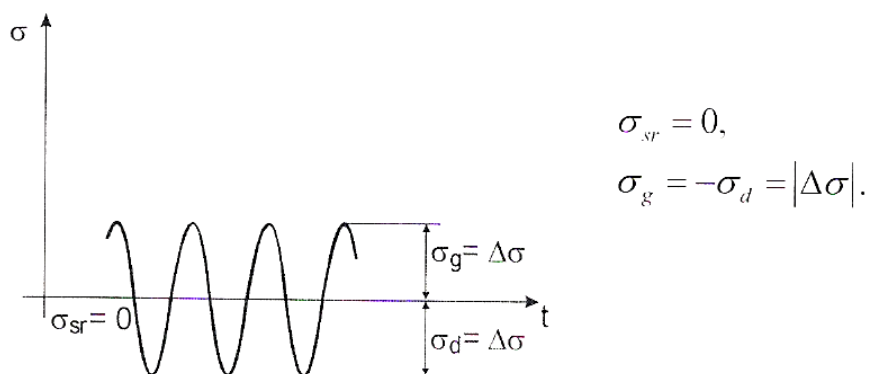
Слика 1.18 - Чисто једносмерно променљив напон

3. Наизменично променљив (најмањи и највећи напони су различитог знака и неједнаког слика 1.19



Слика 1.19 - Наизменично променљив напон

4. Чисто неизменично променљив (највећи и најмањи напони у циклусу су једнаког интензитета, али супротног знака) слика 1.20



Слика 1.20 - Чисто неизменично променљив напон

Основне карактеристике цикличних напона су:

T - период циклуса (време трајања једног циклуса), $f = \frac{1}{T}$ – учесталост (фреквенција циклуса).

σ_g - горњи или највећи напон у циклусу,

σ_d - доњи или најмањи напон у циклусу напона,

$$\sigma_{sr} = \frac{\sigma_g + \sigma_d}{2} \text{ -средњи напон у циклусу,}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_g - \sigma_d}{2} \text{ -амплитудни напон у циклусу и}$$

$$\gamma = \frac{\sigma_d}{\sigma_g} \text{ -коэффициент асиметрије циклуса (степен променљивости напона).}$$

Уколико може наступити лом од замора, онда се рачунски напони упоређују са дозвољеним напонима за променљива оптерећења:

$$\sigma_{dor}^D = Z \cdot \sigma_{dor}$$

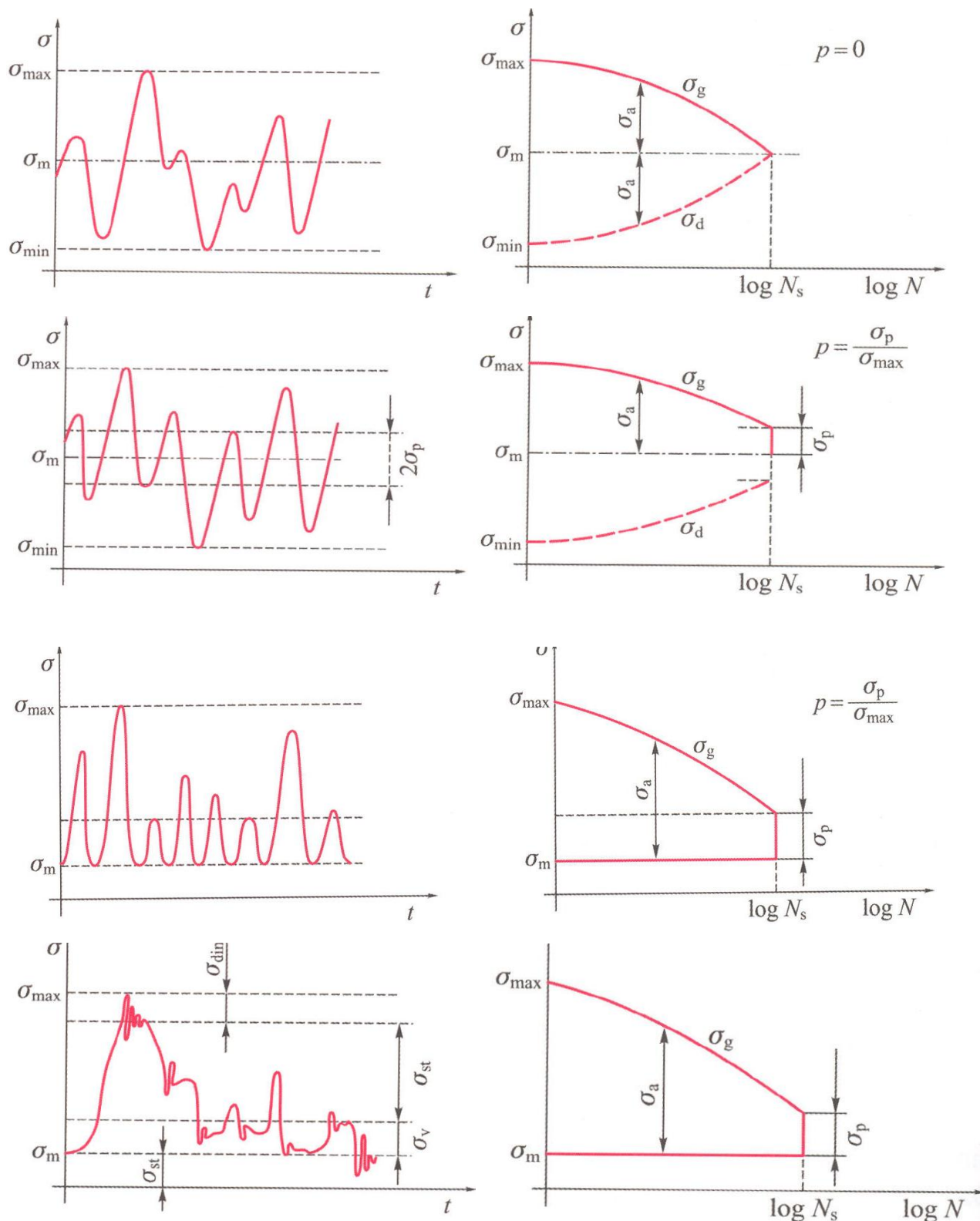
Где су:

σ_{dor}^D -допуштени напон за материјал изложен замору;

σ_{dor} -допуштени напон на затезање;

Z -коэффициент замарања – зависи од врсте материјала и односа граничних вредности напона.

Посебан значај имају променљива оптерећења и напони који се јављају при нестационарним режимима рада машина. Оваква оптерећења и напони настају код машина које раде на променљивим режимима оптерећења и различитим нивоима напона и оптерећења. При нестационарним режимима рада, нивои напона у машинским деловима мењају се у ширим границама, јер се поред нормалног рада машине, узимају у обзир и преоптерећења у радном ходу машине и подоптерећења у празном ходу машине. Често су случајеви у пракси да се машине у процесу рада подвргавају преоптерећењима. Испитивања на замор при нестационарним режимима рада базирају се на образовању тзв. спектра напона на основу вероватног или реалног експлоатационог рада машине.



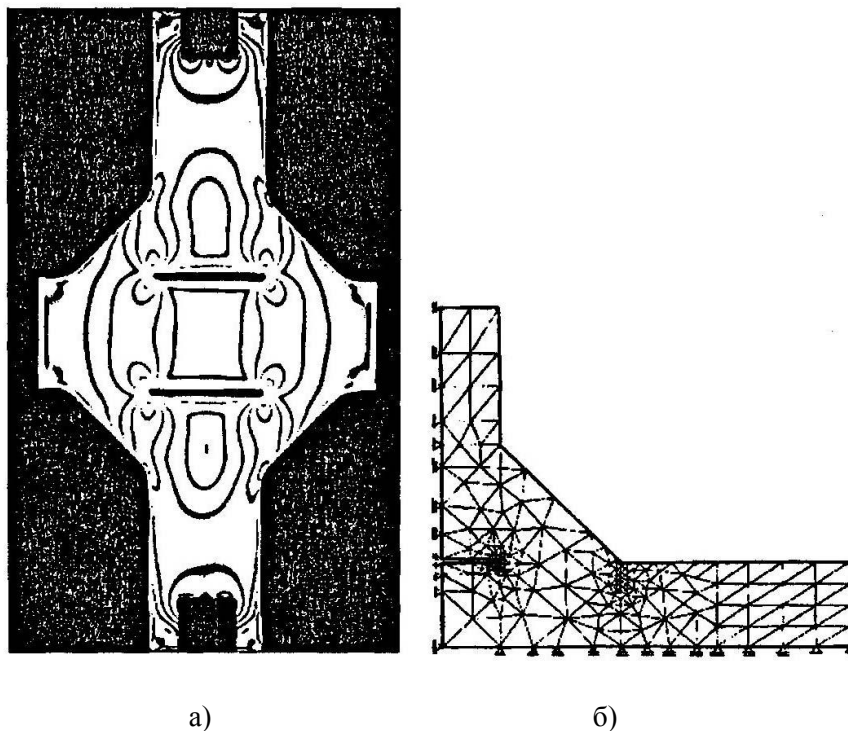
Слика 1.21 – Четири карактеристична облика напрезања и припадни спектри напрезања

4.2 Концентрација напона

На динамичку чврстоћу компоненти машина и конструкција највећи утицај имају концентрација напона, величина попречног пресека, квалитет и стање површинског

слоја, карактер промене радних напона и околна средина. Опште законитости о утицају ових фактора на динамичку чврстоћу (динамичку издржљивост) основног метала важе и код заварених спојева. Као специфичности заварених спојева јављају се карактеристични облици ових спојева и њима изазвана концентрација напона, промена свајстава зоне утицаја топлоте у процесу заваривања, високи заостали напони и могуће грешке у шаву.

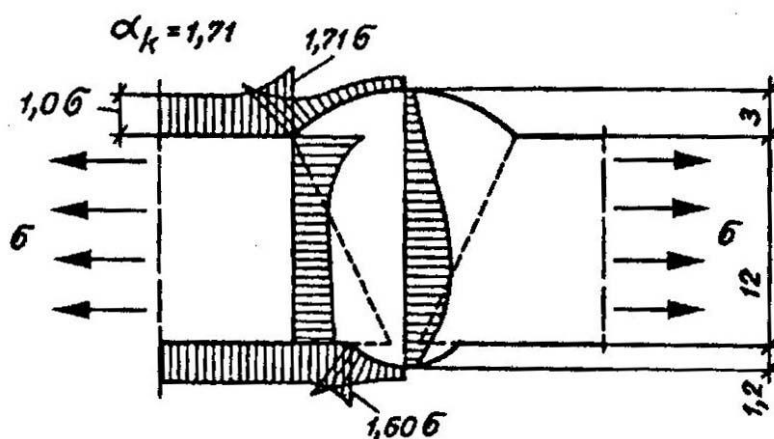
У конструкцијама заморни лом почиње по правилу на местима концентрације напона. У зависности од теоријског фактора концентрације напона, једнаког односу максималног и номиналног напона ($\alpha_k = \sigma_{max}/\sigma$), може доћи до знатног снижења динамичке издржљивости споја. Подаци о теоријском фактору концентрације напона који се могу наћи у литератури најчешће су добијени методом фотоеластичности, као и методом коначних елемената. Анализа напонског стања помоћу методе фотоеластичности заснива се на својству фотоеластичних материјала да у напрегнутом стању постају оптички анизотропни. Свака тачка напрегнутог фотоеластичног материјала понаша се као дволомни кристал, при чему правци главних напона σ_1 и σ_2 представљају брзу, односно спору осу. Пропуштањем поларизоване светлости кроз напрегнути модел направљен од таквог материјала, добија се слика модела са изохроматским линијама које показују сталне напонске разлике (Слика 1.22.а). На основу броја и густине тих линија одређује се фактор концентрације напона. При примени методе коначних елемената, тело се дискретизује на мрежу елемената коначних димензија који могу бити разних облика (троугао и правоугаоник - за раванске проблеме, или тетраедар, паралелопипед - за тродимензионалне проблеме). У околини концентратора напона коначни елементи су мањи (Слика 1.22. б), да би се тачније израчунао напон који на том месту нагло расте. Проблем се своди на решавање система алгебарских једначина по непознатим померањима у чворовима (обично методом Гауса) при задатим граничним условима (силе, померања). Користећи познате формуле из њих се израчунавају деформације и напони.



Слика 1.22 - Одређивање концентрације напона а) методом фотоеластичности и б) методом коначних елемената [6]

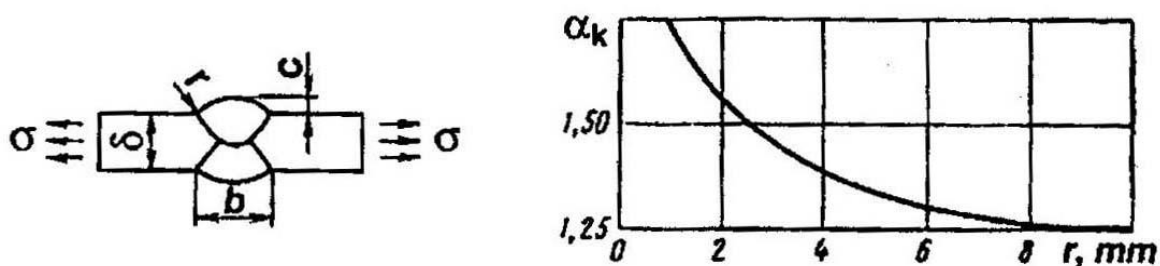
4.2.1. Концентрација напона код сучеоног споја

Расподела напона у аксијално напрегнутом сучеоном споју са V - шавом (са провареним кореном) приказана је на слици 1.23. На местима где се мења контура споја (почетак надвишења лица и корена шави) настаје концентрација напона. Механичком обрадом површине шави тј. скидањем надвишења на лицу и корену шави, елиминише се и концентрација напона.



Слика 1.23-Концентрација напона у сучеоном споју са V - шавом

Теоријски фактор концентрације напона у сучеоном споју са X - шавом приказан је на слици 1.24. Смањењем радијуса прелазног заобљења у подножју шави, повећава се фактор концентрације напона α_k .



Слика 1.24- Концентрација напона у сучеоном споју са X шавом [6]

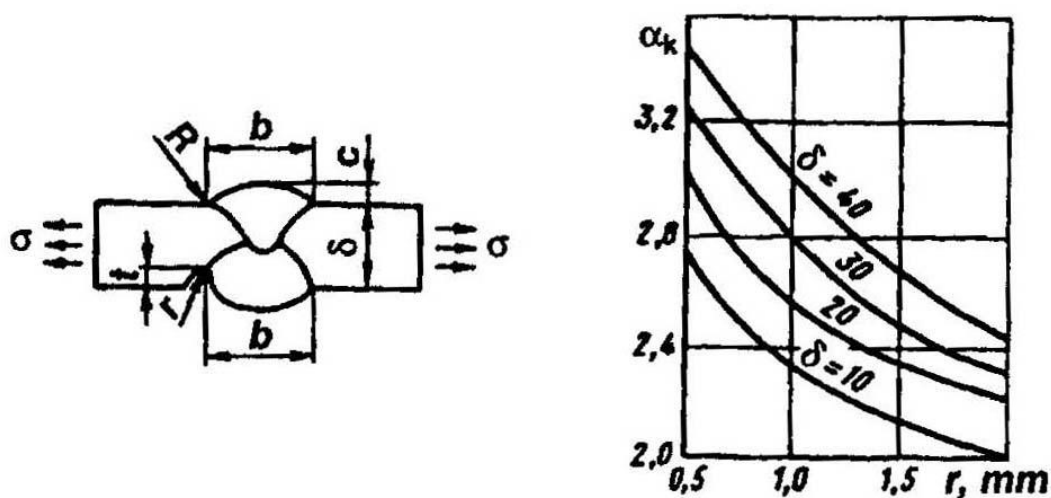
Теоријски фактор концентрације напона при истезању дат је за овај случај изразом добијеним на основу експеримената:

$$\alpha_k = 1 + 1,1c \frac{l_1^2 + 1}{\delta} \sqrt{\frac{c}{r}}$$

Где је $l_1 = b/\delta$.

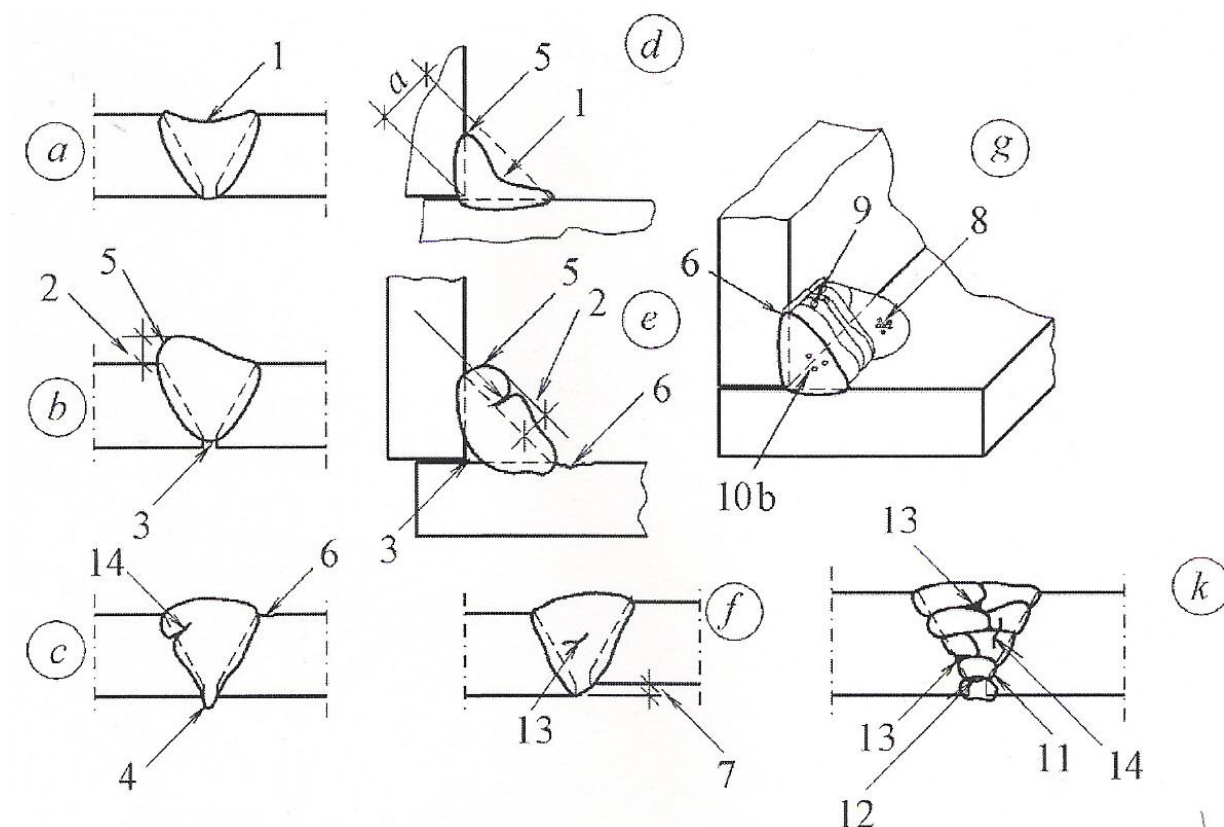
Површинске грешке у споју знатно повећавају напон. При присуству заједа (слика 1.25) фактор α се одређује по формули:

$$\alpha_k = \left[1 + \frac{1}{\sqrt{R(14/b + 17/c + 1,75/\delta)}} \right] \left(1 + 0,58 \sqrt{\frac{t}{r}} \right)$$



Слика 1.25 - Утицај површинске грешке на концентрацију напона [6]

На слици 1.26 приказане су грешке у шавовима.

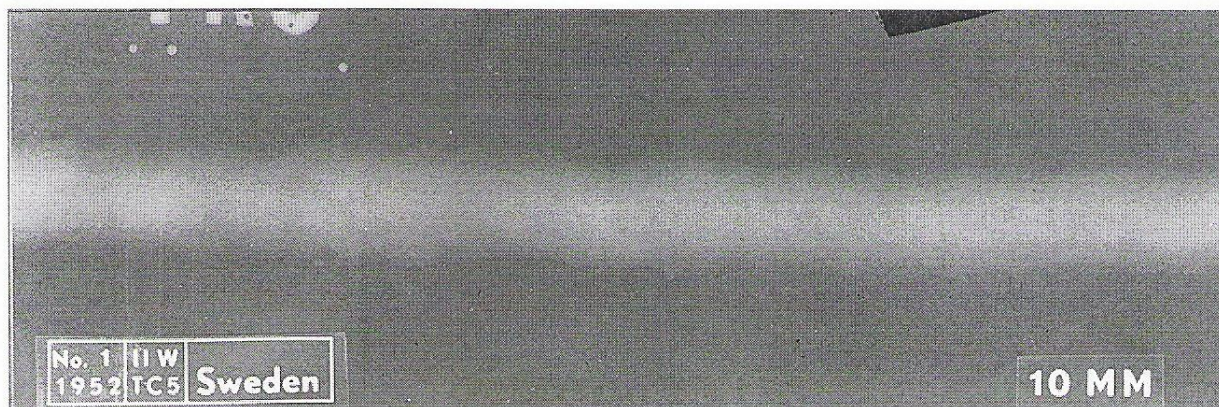


Слика 1.26 – Грешке у шавовима

Обим и врста контроле шавова зависе од: начина, карактера и интензитета напрезања, као и од значаја споја у конструкцији и важности саме конструкције;

Треба изабрати оптималан ниво контроле квалитета шавова имајући у виду техничке и економске показатеље.

На слици 1.27 су дати радиографи сучеоног V шав са и без грешака.



а)

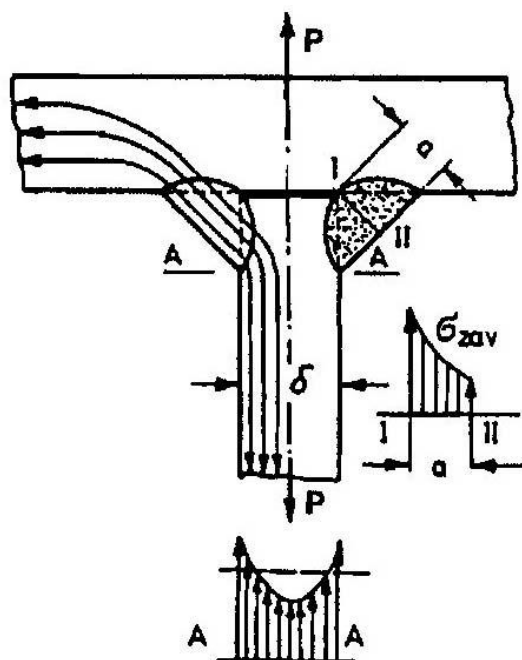


б)

Слика 1.27 – а) Радиограм сучеонеог V шава без грешака б) Радиограм сучеонеог V шава са гасним мехурићима, укључцима троске и непровареним кореном

4.2.2. Т- спој и крстасти спој

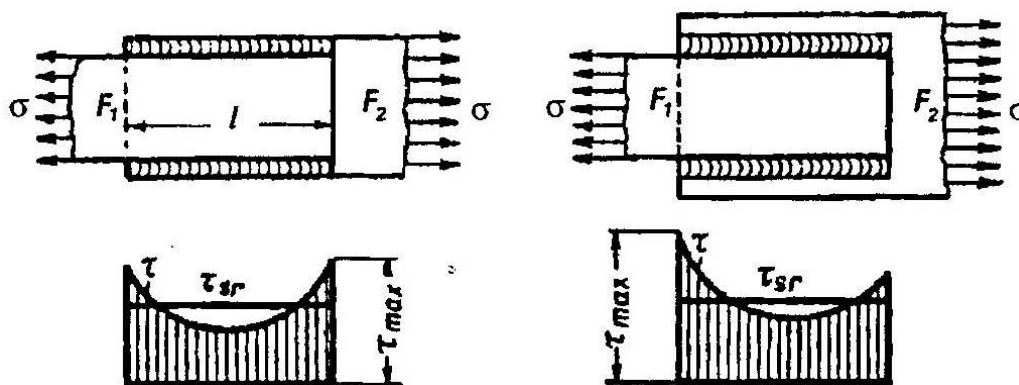
Расподела напона у критичним пресецима Т-споја (иста је и код крстастог споја) приказана је на слици 1.28. Заморни лом почиње у подножју шава (тачка А) или корена шава (тачка I), зависно од релативне дебљине шава $2z/\delta$ (z -катета шава) и дебљине плоче δ . При великим дебљинама шава, заморни лом почиње у подножју шава, док при малим дебљинама лом почиње у корену шава и тада спој има мању динамичку издржљивост.



Слика 1.28 - Расподела напона у критичним пресецима Т – споја

4.2.3. Преклопни спојеви

Расподела тангенцијалног напона у уздужним шавовима преклопног споја при једнаким површинама попречних пресека плоча ($F_1 = F_2$) изражава се функцијом хиперболичног косинуса који се назива ланчаница (слика 1.29).



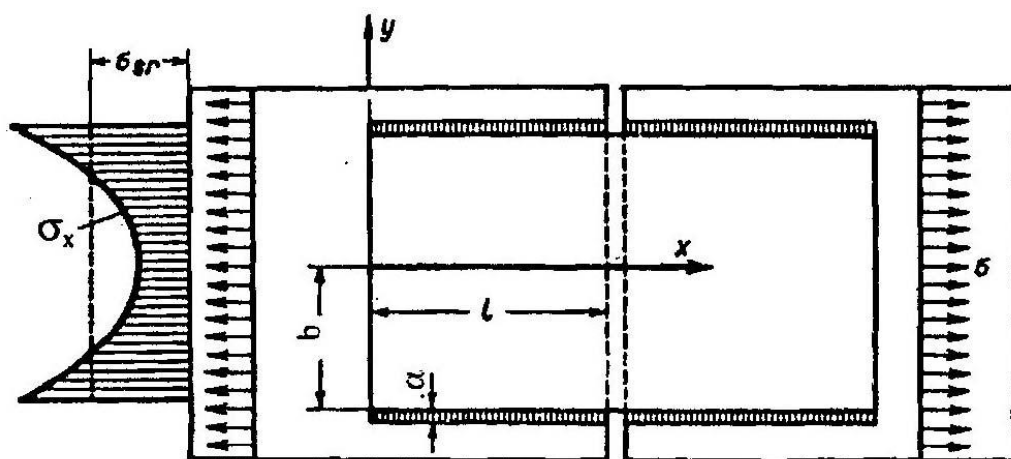
Слика 1.29 – Расподела тангенсијалног напона у бочним шавовима преклопног споја

Теоријски фактор концентрације напона се може одредити по приближном обрасцу:

$$\alpha_k = \frac{\tau_{max}}{\tau_{sr}} = 0.365 \sqrt{\frac{l}{a}}$$

Екпериментални подаци показују да је расподела смичућих напона равномернија него што показују рачунске величине. При $F_1 < F_2$ напони у шаву са стране F_1 показују веће вредности него на супротној страни. Расподела напона у попречном пресеку плоче (подвезице) везане уздужним шавовима приказана је на слици 1.30. Теоријски фактор концентрације напона у подвезици у близини шавова се одређује по образцу:

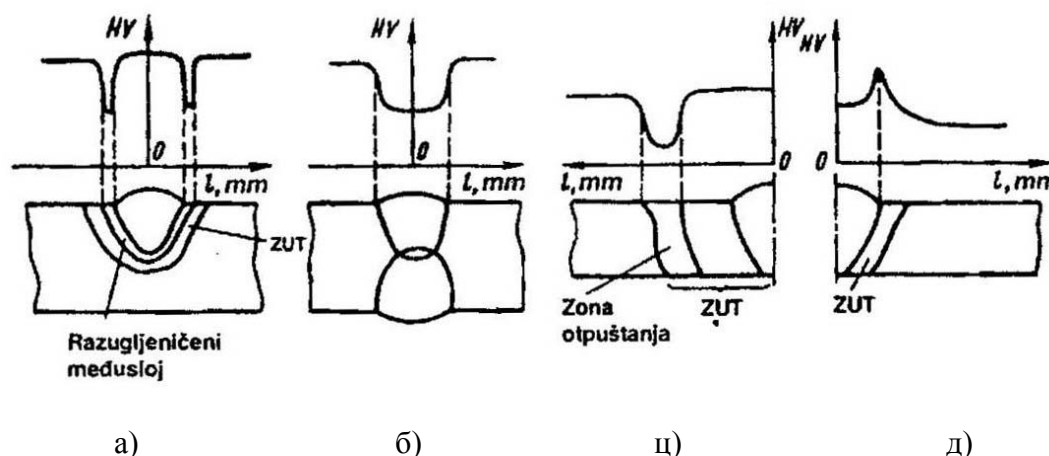
$$\alpha_k = 3.3 \frac{cth 2.3 \frac{b}{l}}{\frac{l}{b}}$$



Слика 1.30 - Расподела напона σ у подвезици

5. ПРОМЕНА СВОЈСТАВА ЗОНЕ УТИЦАЈА ТОПЛОТЕ

У завареном споју од челика који се користе у конструкцијама механичка својства шави и зоне утицаја топлоте су различита од својстава основног метала. Тврдоћа (а према томе и затезна чврстоћа и напон течења) метала шави и зоне утицаја топлоте може бити већа или мања од тврдоће основног метала, тј. у завареном споју постоји механичка нехомогеност (слика 1.31). Повишене и снижене механичке карактеристике метала шави и ZUT проузроковане су термичким циклусом заваривања.

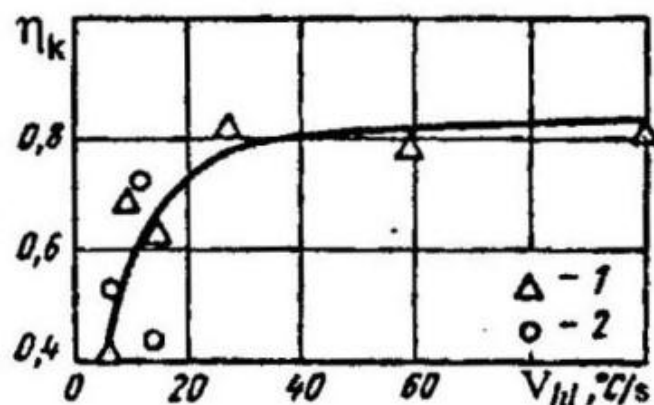


Слика.1.31 – Механичка нехомогеност у завареним спојевима: а)- Разугљеничење; б)- примена електрода са ниским механичким карактеристикама; ц)-заваривање каљених челика; д)-заваривање конструкционих угљеничних и нисколегираних челика; ZUT- зона утицаја топлоте

Делови завареног споја са слабијим механичким карактеристикама у односу на основни метал, називају се меки међуслојеви. Меки међуслојеви настају услед разних узрока: услед разугљеничења у подручјима метала поред линије стапања (слика 1.31 а); при коришћењу електрода чијим се топљењем добија метал снижених механичких својстава у односу на основни метал (слика 1.31 б); као резултат отпуштања у ZUT-у при заваривању каљених челика (слика 1.31 ц). Зона утицаја топлоте у завареним спојевима од конструкционих угљеничних и нисколегираних челика, карактерише се порастом механичких својстава идући од основног метала ка линији стапања (1.31 д).

5.1. Ниско угљенични и ниско легирани челик

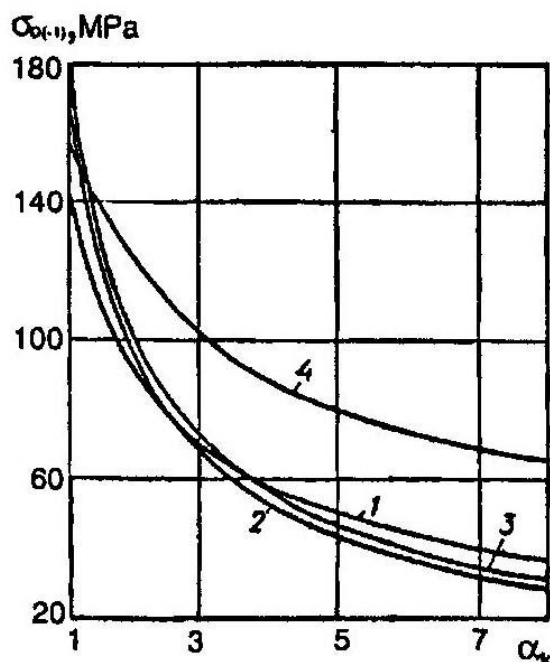
Осетљивост на концентрацију напона и динамичка издржљивост разних зона завареног споја експериментално су одређене за случај нискоугљеничног челика ($R_e = 233 \text{ MPa}$, $R_m = 389 \text{ MPa}$). На плочу од овог челика се наноси навар, чије је надвишење скидано механичком обрадом. Кружни жљебови су прављени на бочним странама у зони основног метала, шави и линији стапања. При одсуству концентратора напона, динамичка издржљивост метала шави и ZUT-а се повећава за 15-30% у односу на основни метал (као последица пораста механичких својстава). При присуству концентратора напона (жљебова) у шаву или ZUT долази до повећања коефицијента осетљивости на концентрацију напона η_k , при брзинама хлађења које се обично јављају код реалних процеса заваривања (слика 1.32).



Слика 1.32. Зависност коефицијента η_k од брзине хлађења: 1- ZUT; 2-шав [6]

За метал шава и ZUT са повећањем брзине хлађења до 40 степени коефицијент осетљивости на концентрацију напона етака расте до 0,8 (за основни метал $\eta_k \sim 0,55$), а при брзини хлађења $V_{hl} > 40^{\circ}C$ остаје приближно константан. Карактеристично је да се и механичка својства R_e, R_m , HV метала зоне утицаја топлоте знатније мењају само до $V_{hl} = 40 - 50^{\circ}C/s$. Повећана осетљивост на концентрацију напона метала шава може се објаснити повећаном затезном чврстоћом $R_m = 560-590 MPa$, која је приближно 1,5 пута већа него код основног метала $R_m = 389 MPa$.

Повећање осетљивости на концентрацију напона у шаву и ZUT промениће величину њихове динамичке издржљивости у односу на динамичку издржљивост основног метала. Експериментално је показано да разлика између динамичке издржљивости $\sigma_{D(-1)}$ (при коефицијенту асиметрије циклуса $R = -1$) метала ZUT и динамичке издржљивости основног метала није велика при брзинама хлађења које се обично срећу (слика 1.33). Метал ZUT има нешто нижу динамичку издржљивост у области високих вредности α_k , а нешто већу при $\alpha_k = 1$. Знатније снижење осетљивости метала ZUT на концентрацију напона могуће је при веома ниским брзинама хлађења ($V_{hl} = 7^{\circ}C/s$) што резултира повећаном динамичком издржљивошћу (крива 4).



Слика 1.33. Зависност динамичке издржљивости $\sigma_{D(-1)}$ од коефицијента концентрације напона α_k : 1-основни метал; 2-4- метал ZUT при брзинама хлађења 100,28 и 7 °C/s [6]

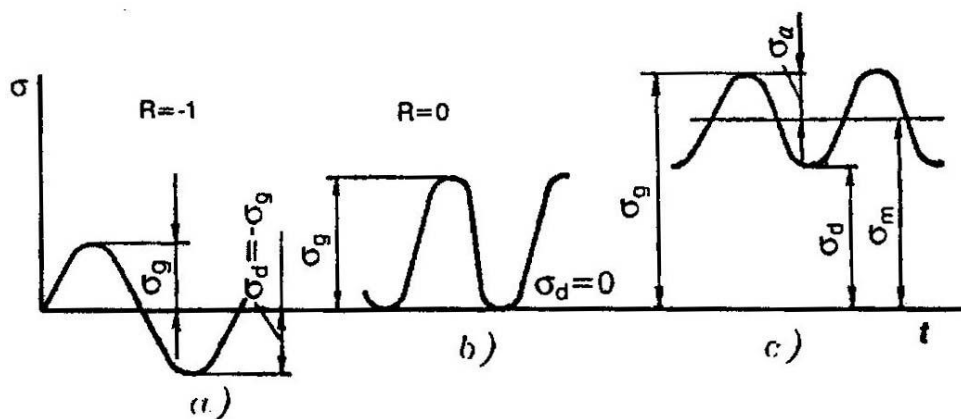
Експериментална истраживања показују да и у случају примене нисколегираних челика при препорученим режимима заваривања, промена својства метала ZUT не утиче у знатној мери на динамичку издржљивост завареног споја. У новије време у израду заварених конструкција се уводе челици повишене ($R_e > 400-500$ МПа) и високе ($R_e > 600-750$ МПа) чврстоће. У основи то су нисколегирани челици, термички обрађени. Код њих при заваривању може доћи до локалног смањења чврстоће, услед чега се у ZUT појављује изразита нехомогеност механичких својстава.

Експериментална испитивања показују да у реалним завареним спојевима, меки међуслојеви који су обично мале дебљине, не утичу на динамичку издржљивост, ако у тим међуслојевима нису присутни концентратори напона. Присуство концентратора напона у неким међуслојевима знатно мења динамичку издржљивост споја. Код заварених спојева од челика ојачаних термичком обрадом, зоне са мањом чврстоћом (меки међуслојеви) су мало померене у односу на концентратор напона, који се најчешће поклапа са границом стапања. Уколико се у неком случају концентратор напона нађе у зони меког међуслоја, тада је динамичка издржљивост споја одређена издржљивошћу метала са сниженим механичким својствима. За оцену динамичке издржљивости завареног споја, који има концентратор напона у зони снижених механичких карактеристика (меки међуслој), дозвољено је користити испитивања хомогених епрувета од метала чија својства одговарају својствима ове зоне.

6. ПРОРАЧУН ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА ИЗЛОЖЕНИХ ПРОМЕНЉИВОМ ОПТЕРЕЋЕЊУ

6.1. Константна амплитуда напона

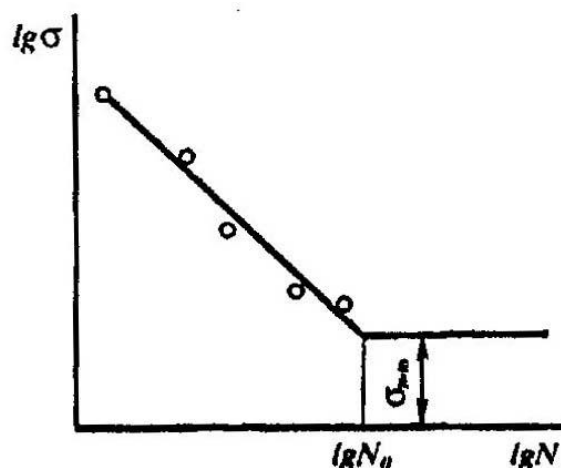
За одређивање динамичке издржљивости метала, испитује се глатке епрувете при променљивом оперећењу (слика 1.34)



Слика 1.34 – Промена напона у току времена: а) наизменични циклус;

б) пулсирајући циклус; ц) асиметрични циклус

Према резултатима испитивањима одређује се крива динамичке издржљивости у координатама $\log \sigma - \log N$, слика 1.35) где је σ највећи напон у циклусу - релативна динамичка издржљивост, а N број циклуса оптерећења који је епрувета издржала до лома.



Слика 1.35 – Експериментална крива динамичке издржљивости [6]

Лева грана криве издржљивости има облик:

$$\sigma^m N = \sigma_{D(R)}^m N_0$$

И у логаритамским координатама постаје права линија (слика 1.35)

$$m \log \sigma + \log N = \text{const}$$

Где је: m -параметар који одређује нагиб леве гране

N_0 - број циклуса који одређује тачку прелома криве издржљивости

$\sigma_{D(R)}$ -динамичка издржљивост (јачина замора) при коефицијенту асиметрије циклуса R .

То је највећа вредност максималног напона циклуса при коме епрувета може издржати бесконачан број циклуса без лома. При испитивању се она одређује на основу коначног (довољно великог) броја циклуса N_B , који се назива база испитивања. За челике је обично $N_B = 10 \cdot 10^6$ циклуса.

Одређивањем трајне динамичке издржљивости за разне вредности коефицијента асиметрије циклуса R добија се Смитов (Smith) дијаграм који је приказан на слици 1.36. Зависност динамичке издржљивости од средњег напона може се одредити на основу једначине праве кроз две тачке и то $(0; \sigma_{D(-1)})$ за $R = -1$ и $(\sigma_{D(0)/2}; \sigma_{D(0)})$ за $R=0$.

$$\sigma_{D(R)} = \sigma_{D(-1)} + \frac{\sigma_{D(0)} - \sigma_{D(-1)}}{\frac{\sigma_{D(0)}}{2}} \sigma_m$$

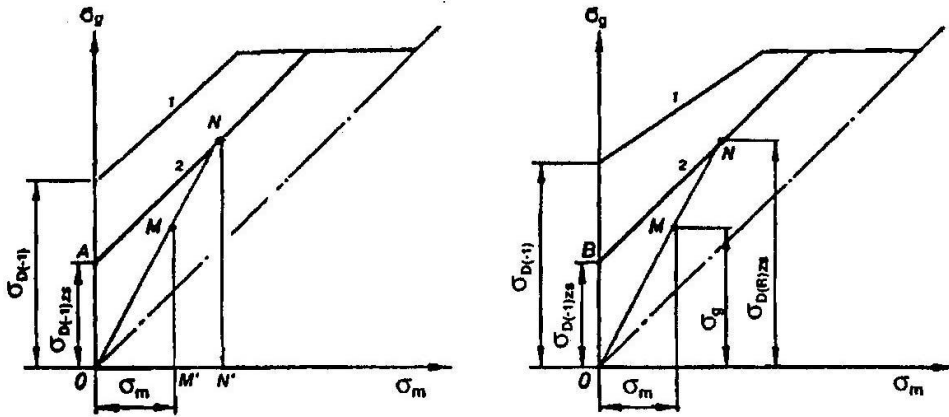
Или

$$\sigma_{D(R)} = \sigma_{D(-1)} + (1 - \Psi) \sigma_m$$

Где су $\sigma_{D(R)}$, $\sigma_{D(-1)}$, $\sigma_{D(0)}$, динамичке издржљивости при коефицијенту асиметрије циклуса R , односно $R=-1$, $R=0$; σ_m – средњи напон циклуса; $\Psi = (2\sigma_{D(-1)} - \sigma_{D(0)})/\sigma_{D(0)}$ коефицијент који показује утицај асиметрије циклуса на динамичку издржљивост. Амплитуда динамичке издржљивости се мења према изразу:

$$\sigma_{A(R)} = \sigma_{D(R)} - \sigma_m = \sigma_{D(-1)} - \Psi \sigma_m$$

Динамичка издржљивост заварених спојева је смањена услед утицаја низа фактора (концентрација напона, величина пресека, стање површине,...). Ако се за заварени спој усвоји, као и за друге машинске елементе, да однос граничних амплитуда (динамичке издржљивости) напона глатке епрувете и завареног споја остаје константан независно од величине средњег напона добије се:



Слика 1.36 – Шема одређивања степена сигурности завареног споја
а) без заосталих напона; б) са високим заосталим напонима
гранична амплитуда напона завареног споја

$$\sigma_{A(R)zs} = \frac{\sigma_{A(R)}}{K_D} = \frac{\sigma_{D(-1)} - \Psi \sigma_m}{K_D}$$

и динамичка издржљивост завареног споја (гранични напон)

$$\sigma_{D(R)} = \sigma_{A(R)zs} + \sigma_m = \frac{\sigma_{D(-1)} - \Psi \sigma_m}{K_D} + \sigma_m = \frac{\sigma_{D(-1)}}{K_D} + \left(1 + \frac{\Psi}{K_D}\right) \sigma_m$$

где је K_D редукциони фактор динамичке издржљивости који обухвата утицај разних фактора на динамичку издржљивост. Овај дијаграм је приказан на слици 1.36. Нека су номинални радни напони у завареном споју σ_g (горњи напон) и σ_m (средњи напон циклуса) (тачка М на слици 1.36 а).

Предпоставимо да је при евентуалном порасту оптерећења у току експлоатације однос $\sigma_g/\sigma_m = const$. Тако оптерећење се назива простим. При простом оптерећењу, тачка која дефинише циклус напона, помераће се од тачке М ка тачки N по дужи ON која полази из координатног почетка. При томе ће коефицијент асиметрије циклуса остати константан. То произилази из зависности:

$$tg\beta = \frac{MM'}{OM'} = \frac{\sigma_g}{\sigma_m} = \frac{2\sigma_g}{\sigma_g + \sigma_d} = \frac{2}{1+R}$$

Степен сигурности је:

$$n = \frac{NN'}{MM'} = \frac{\sigma_{D(R)zs}}{\sigma_g}$$

Величину $\sigma_{D(R)zs}$ (ординату тачке N) наћи ћемо одређивањем пресека линије AN (линија граничних напона тј. динамичке издржљивости) и дужи ON (линија пораста радних напона).

$$\sigma'_{D(R)zs} = \frac{\sigma_{D(-1)}}{K_D} + \left(1 - \frac{\Psi}{K_D}\right) \sigma'_m$$

$$\sigma'_g = \frac{\sigma_g}{\sigma_m} \sigma'_m$$

Где су $\sigma'_{D(R)zs}, \sigma'_g, \sigma'_m$ текуће координате, а σ_g, σ_m координате тачке М.

Решавањем ових једначина добија се ордината тачке N:

$$\sigma_{D(R)zs} = \frac{\sigma_{D(-1)} \cdot \sigma_g}{\sigma_a K_D + \Psi \sigma_m}$$

Где је $\sigma_a = \sigma_g - \sigma_m$ амплитуда радног напона у тачки М. Одавде следи израз за степен сигурности:

$$n = \frac{\sigma_{D(-1)}}{\sigma_a K_D + \Psi \sigma_m}$$

У присуству великих заосталих напона долази до промене нагиба линије граничних напона (динамичке издржљивости). Као што је предходно објашњено, ефект заосталих напона се повећава са снижењем радних напона. Аналогно томе, он расте са смањењем асиметрије циклуса па се може узети да је величина $\sigma_{A(R)zs}$ константна са променом средњег напона σ_m слика 7.3б. У том случају једначина линије граничних напона завареног споја (линија BN) је:

$$\sigma'_{D(R)zs} = \sigma'_m + \sigma_{D(-1)zs} = \sigma'_m + \frac{\sigma_{D(-1)}}{K_D}$$

Где су апострофима означене текуће координате.

Ако је задато напонско стање приказано великом тачком М са координатама σ_m, σ_g , то се гранично напонско стање завареног споја при простом оптерећивању (одређено положајем тачке N), а такође и степен сигурности, одређују заједничким решењем једначине линије граничних напона и дуж ON.

Како једначина дужи ON има облик

$$\sigma'_g = \frac{\sigma_g}{\sigma_m} \sigma'_m$$

а у тачки N је

$$\sigma'_g = \sigma'_{D(R)zs} = \sigma_{D(R)zs}$$

Заједничко решење једначина даје

$$\sigma_{D(R)zs} = \frac{\sigma_{D(R)zs} \sigma_m}{\sigma_g} + \frac{\sigma_{D(-1)}}{K_D}$$

Одатле следи

$$\sigma_{D(R)zs} = \frac{\sigma_{D(-1)}\sigma_g}{K_D(\sigma_g - \sigma_m)} = \frac{\sigma_{D(-1)}\sigma_g}{K_D\sigma_a}$$

И степен сигурности

$$n = \frac{\sigma_{D(R)zs}}{\sigma_g} = \frac{\sigma_{D(-1)}}{K_D\sigma_a}$$

Редукциони фактор динамичке издржљивости K_D који узима у обзир утицај свих фактора на динамичку издржљивост може се одредити према изразу

$$K_D = \frac{\beta_k k_1 k_2}{k_3 k_4 k_5}$$

Где је β_k ефективни фактор концентрације напона; k_1 - фактор нехомогености зоне утицаја топлоте; k_2 - фактор утицаја заосталих напона; k_3 - фактор који узима у обзир утицај величине попречног пресека; k_4 - фактор који узима у обзир квалитет обраде површине метала; k_5 - фактор утицаја технолошких одступања (може се изразити у зависности од квалитета шава).

Ефективни фактор концентрације напона може се приближно одредити на основу познате вредности тероријског фактора концентрације напона:

$$\beta_k = (\alpha_k - 1)\eta_k + 1$$

Где је η_k фактор осетљивости на концентрацију напона. Фактор осетљивости на концентрацију напона зависи не само од материјала већ и од градијента напона у близини концентратора напона.

Вредности фактора нехомогености материјала зоне утицаја топлоте, могу се оријентационо усвојити према слици 6.3. за нискоугљеничне и нисколегиране челике:

$$k_1 = 1,1 \div 1,3 \text{ за } \alpha_k > 3$$

$$k_1 = 1 \text{ за } \alpha_k \leq 3$$

Величину фактора утицаја заосталих напона тешко је проценити с обзиром да он зависи од низа параметара (врста споја, величина радних напона, асиметрија циклуса, величина попречног пресека, механичка својства метала).

Повећање величине попречног пресека у знатној мери смањује динамичку издржљивост. Сматра се да је овај ефект проузрокован металуршким и технолошким факторима као и величином градијента напона. Металуршки фактори се објашњавају тиме да се са повећањем димензија полуфабриката повећава нехомогеност материјала, отежавају услови квалитетног извођења термичке обраде. Смањење динамичке издржљивости услед повећања пречника или дебљине полуфабриката може се изразити коефицијентом k_{3M} :

$$k_{3M} = \frac{\sigma_{D(-1)}}{\sigma'_{D(-1)}}$$

За легиране челике:

$$k_{3M} = 1 - 0,2 \log \frac{d}{d_o} \quad \text{за} \quad d \leq 150mm$$

$$k_{3M} = 0,74 \quad \text{за} \quad d > 150mm$$

За угљеничне челике:

$$k_{3M} = 1$$

Ефект величине градијента напона се доказује чињеницом да са порастом величине попречног пресека опада динамичка издржљивост глатких епрувета изложених савијању или увијању, док при истезању остаје непромењена (уколико је утицај претходно поменутих фактора елиминисан). Овај ефект се може изразити коефицијентом K_{3G} :

$$K_{3G} = \frac{\sigma_{D(-1)d}}{\sigma_{D(-1)}} \quad \text{или} \quad K_{3G} = \frac{\tau_{D(-1)d}}{\tau_{D(-1)}}$$

Где је $\sigma_{D(-1)d}$, $\tau_{D(-1)d}$ — динамичка издржљивост при савијању и увијању глатких епрувета пречника d једнаког пречнику (или дебљини) конструкцијске компоненте, $\sigma_{D(-1)}$, $\tau_{D(-1)}$ — то исто за глатке епрувете пречника $d_o = 7,5mm$. Код истезања је овај коефицијент једнак јединици, док код савијања и увијања износи:

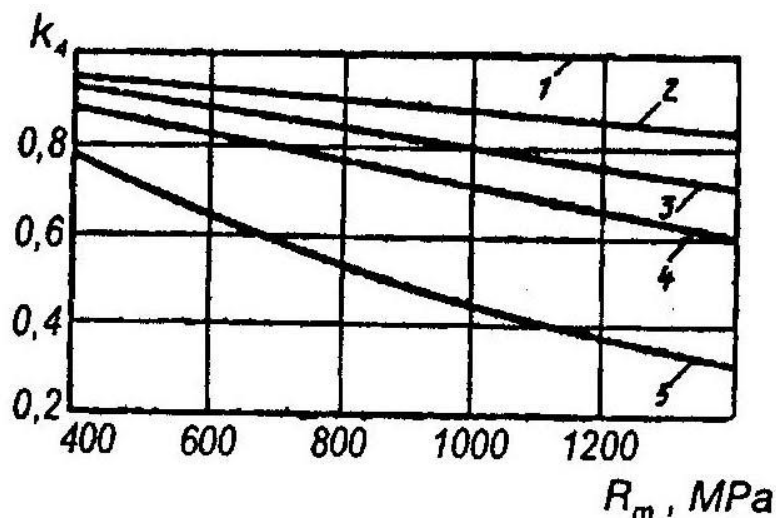
$$K_{3G} = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_{D(-1)i}}{\sigma_{D(-1)}}\right) 0,77 \log \frac{d}{d_o} \quad d \leq 150 mm$$

$$K_{3G} = \frac{\sigma_{D(-1)i}}{\sigma_{D(-1)}} \quad d > 150 \text{ mm}$$

стога се може узети да је укупни фактор који узима у обзир величину попречног пресека K_3 једнак:

$$K_3 = K_{3M} K_{3G}$$

Заморна прелина обично настаје на површини елемента с обзиром на повећање радног напона услед концентрације напона. Због тога квалитет обраде површине (тј. микронеравнине) има велики утицај на динамичку издржљивост. Утицај микронеравнина је већи код материјала веће чврстоће. На слици 1.37. је приказана зависност динамичке издржљивости од квалитета обраде површине. Фактор $K_4 = \sigma_{D(-1)_h} / \sigma_{D(-1)}$ представља однос динамичке издржљивости епрувете са датим квалитетом обраде површине $\sigma_{D(-1)_h}$ и динамичке издржљивости полираних епрувета $\sigma_{D(-1)}$.



Слика 1.37 – Утицај стања површине на динамичку издржљивост: 1- полирање; 2- брушење; 3- фино стругање; 4-грубо стругање; 5- ваљане површине са кором [6]

Утицај могућих грешака у шаву на динамичку издржљивост може се проценити у зависности од квалитета шави.

7. ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА НАПРЕГНУТИХ ПРОМЕНЉИВОМ ОПТЕРЕЋЕЊУ

Наглашено је већ раније да су заварени делови оптерећени променљивим оптерећењем осетљиви према дејству зареза, односно концентрацији напона, па се при димензионисању ових спојева о томе мора водити рачуна.

Као извори концентрације појављују се геометријски утицаји промене пресека, односно унутрашње грешке настале у току заваривања, што све изазива на тим местима дисконтинуитет и концентрацију напонских линија. На овим местима се при нормалном напонском стању појављују напони који могу да пређу границу течења, изазивајући на тим локалитетима пластичну деформацију уз промену тврдоће у материјалу. Исто тако, након заваривања заостали термички напони уносе дисконтинуитет у напонска стања у материјалу, па на тај начин утичу на замор, што се посебним разматрањем мора узети у обзир. Поновљена оптерећења и растерећења на оваквим местима у којима је дошло до прекорачења границе течења односно пластичне деформације, изазивају микропрскотине, које се временом шире, угрожавајући носивост пресека. Из тих разлога, динамички оптерећене конструкције, па самим тим и места спојена заваривањем, морају се димензионисати према динамичкој чврстоћи. Одређивање динамичке чврстоће споја је сложен поступак. Да би се он ипак на задовољавајући начин дефинисао, одговарајућим испитивањима на завареним спојевима са одговарајућим квалитетом њиховог извођења дошло се до дефинисања одговарајућих група изведених спојева, који имају приближно исте утицаје на динамичку чврстоћу споја.

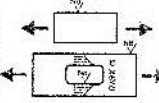
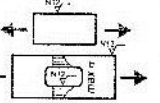
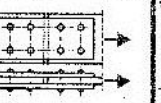
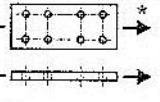
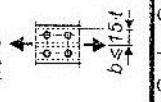
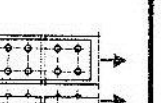
Сходно томе, стандарди дефинишу квалитет заварених спојева (табела 2) на основу чега се дефинишу групе испитаних спојева са приближно истим утицајем на замор.

Табела 2. Употребљене ознаке за врсту, квалитет и контролу шави

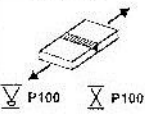
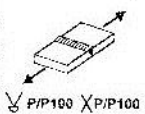
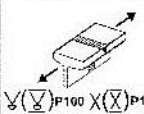
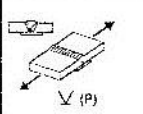
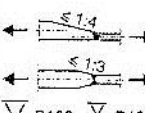
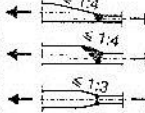
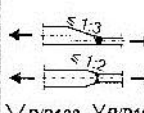
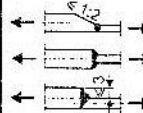
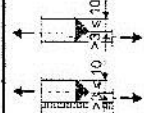
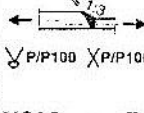
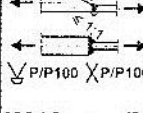
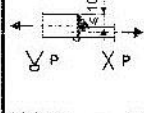
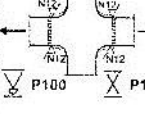
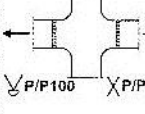
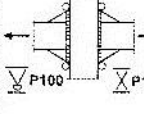
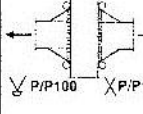
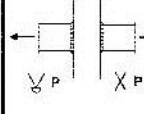
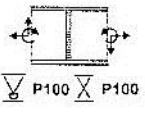
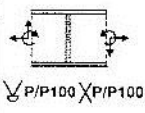
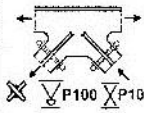
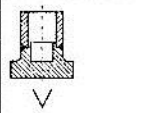
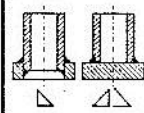
Симбол	Врста и квалитет шави	Знак	Врста и обим контроле
	сучеои V (одн. X) шав, специјални квалитет, корен ижљебљен и потпуно проварен, без кратера на крајевима, обрадом у правцу напона поравнат са површином лима	P100	шав испитан без разарања на 100 % дужине
	сучеои V (одн. X) шав, квалитет I, корен ижљебљен и потпуно проварен, без кратера на крајевима	P100	шав испитан без разарања на 100 % дужине ако је највећи напон истезања $\sigma_{\text{сmax}} \geq 0,8 \cdot \sigma_{\text{сDdoz}}$ а при најизменично променљивом напону када је највећи напон притиска $\sigma_{\text{рmax}} \geq 0,8 \cdot \sigma_{\text{рDdoz}}$
	сучеои V шав са поткорсном плочицом	P	остали најважнији шавови испитани без разарања на најмање 10 % дужине шави сваког заваривача
	K (одн. 2-страни полуУ) шав са обостраним угаоним шавом, специјални квалитет, ижљебљен и проварен корен, прелаз шави без зареза, по потреби обрађен	D	шав чија је равна нормална на правац затезног оптерећења лима, испитан без разарања, на двоплатност и структурне грешке у околини шави
	K (одн. 2-страни полуУ) шав са обостраним угаоним шавом, квалитет I, ширина процела у корену $\leq 3 \text{ mm}$ и $\leq 0,2$ дебелина тањег лима у споју		
	2-страни (одн. 1-страни) угаони шав, специјални квалитет, прелаз шави без зареза, по потреби обрађен		
	2-страни (одн. 1-страни) угаони шав, квалитет I		
	полуV (одн. полуУ) шав са угаоним шавом		
	механичка обрада шави		
	прелаз шави на основни материјал без зареза		

Групе са истим утицајем облика споја и зареза на динамичку чврстоћу означене су са W_0 ; W_1 ; W_2 ; K_0 ; K_1 ; K_2 ; K_3 ; K_4 ; и дате су у табелама 3 и 4.

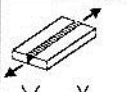
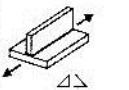
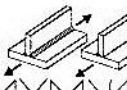
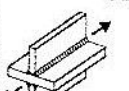
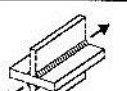
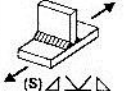
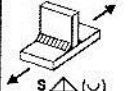
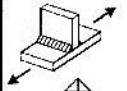
Табела 3. Случајеви зареза незаварених делова, вијчаних и закованих спојева

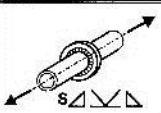
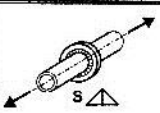
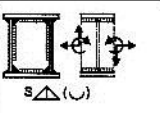
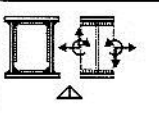
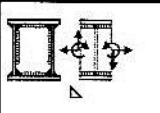
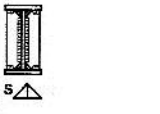
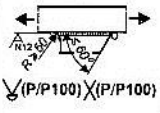
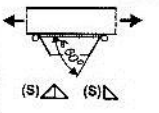
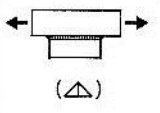
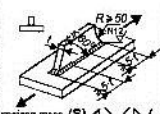
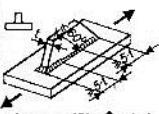
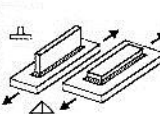
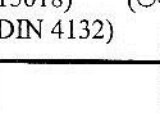
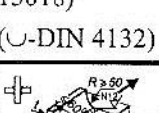
Случај зареза незавареног споја				
Бр.	W0	W1	W2	Напомене:
1	 W01	 W11	 W21	Напомене: * празни отвори или отвори са: - заковицама или вијцима оптерећеним до 20 % дозвољеног оптерећења, - VV вијцима оптерећеним до дозвољеног оптерећења
2		 W12	 W22	
3		 W13 - DIN 4132	 W23	

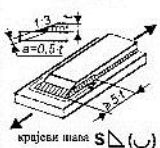
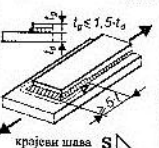
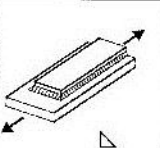
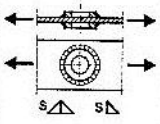
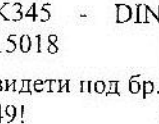
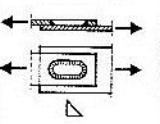
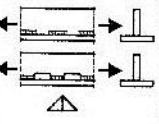
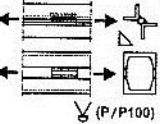
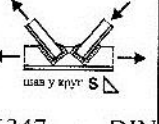
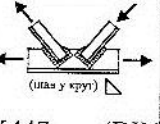
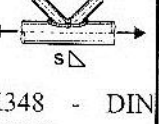
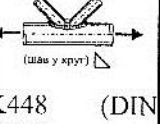
Табела 4. Случајеви зареза заверених спојева

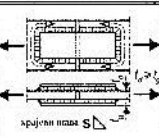
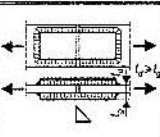
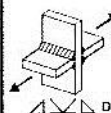
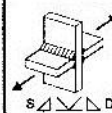
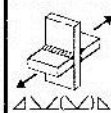
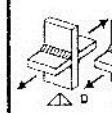
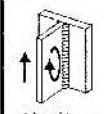
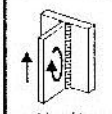
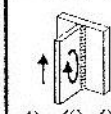
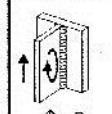
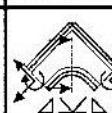
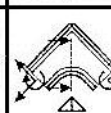
Бр.	Случај зареза завареног споја				
	K0	K1	K2	K3	K4
11	 K011	 K111	 K211 (DIN 15018)	 K311 (DIN 4132)	
12	 K012	 K112	 K212	 K312 - DIN 4132	 K412 - DIN 4132
			 K212 - DIN 4132	 K312 - DIN 15018	 K412 - DIN 15018
13	 K013 - DIN 15018	 K113 - DIN 15018	 K213 - DIN 15018	 K313	 K413
14	 K014 - DIN 15018 = = K011 - DIN 4132	 K114 - DIN 15018 = = K111 - DIN 4132	 K214 - DIN 15018	 K314 - DIN 15018	 K414 - DIN 15018

Наставак Табеле 4.

Бр.	K0	K1	K2	K3	K4
21, 23	 $\sqrt{P/P100} \times P/P100$ K021	 $\sqrt{X}$ K121 - DIN 15018			
	 K021 - DIN 4132	 K123 - DIN 4132 (DIN 15018)			
	 K023 - DIN 15018 = K021 - DIN 4132	 K123			
22	 $\sqrt{P/P100} \times P/P100$ K022				
31		 K131 (DIN 15018)	 K231 (DIN 4132)	 K331	

Бр.	K0	K1	K2	K3	K4
32		 K132-DIN 15018	 K232-DIN 15018		
33		 K133-DIN 15018	 K233 (DIN 4132)	 K333	 K433
			 K233-DIN 4132	 K333-DIN 4132	 K433-DIN 4132
41			 K241 (DIN 4132)	 K341 (DIN 15018)	 K441 (DIN 4132)
42			 K242(S-DIN 15018) (DIN 4132)	 K342(S-DIN 15018) (DIN 4132)	 K442
43			 K343	 K443	

Бр.	K0	K1	K2	K3	K4
44			 K244 (DIN 4132)	 K344	 K444
45			 K245 - DIN 15018	 K345 - DIN 15018 видети под бр. 49!	 K445 - DIN 15018
46				 K346	 K446 (DIN 15018)
47				 K347 - DIN 15018	 K447 (DIN 4132)
48				 K348 - DIN 15018	 K448 (DIN 4132)

Бр.	K0	K1	K2	K3	K4
49, 45				 K345 - DIN 15018	 K449 - DIN 4132
51		 K151 - DIN 4132	 K251 - DIN 15018	 K351 (DIN 15018)	 K451
52		 K152 - DIN 4132	 K252 - DIN 15018	 K352 (DIN 15018)	 K452
53		 K153 - DIN 4132	 K253 - DIN 15018	 K353 (DIN 4132)	 K453
54		 K154-DIN 15018	 K254-DIN 15018	 K354-DIN 15018	

Случај зареза је меродаван за одређивање дозвољеног напона у тачки само у непосредној околини зареза (шава, отвора и сл.) и само за правац напона који одговара правцу оптерећења датом на скици. Доказ напона се врши на основу израза $\sigma_u \leq \sigma_{D_{dop}}$ где је σ рачунски упоредни напон. Допуштени напони дати су у табелама 5 и 6.

Избор допуштеног напона $\sigma_{D_{dop}}$ сада за заварени спој изведен на деловима израђеним из ових материјала за $N_e \geq 2 \cdot 10^6$ оптерећења, своди се на сврставање посматраног споја у једну од група наведених са одговарајућим квалитетом завареног споја и коефицијента χ као односа минималног и максималног напона који се појављује у споју тј. $\chi = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ па се на основу тога из табела 5 и 6 одређује допуштени напон за одговарајуће χ и врсту зареза. За случај претежно мирног оптерећења, када је број промена оптерећењ $N_e \leq 10^5$, важе вредности $\chi = 1$ у наведеним табелама.

Код вишеосног напонског стања, при прорачуну на замор одређује се меродавни упоредни напон, који мора бити мањи од допуштеног напона на замор.

Када се еквивалентни број оптерећења крећу границама $10^5 \leq N_e \leq 2 \cdot 10^6$, при чему је:

$$N_e = \sum \left[n_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \right)^{\frac{1}{k}} \right]$$

Допуштени напони при замору одређује се према изразу:

$$\sigma_{D_{dop}}^N = \sigma_{D_{dop}} \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N_e} \right)^k$$

Где је:

n_i - број промена оптерећења са напонима σ_i

$\sigma_{D_{dop}}$ -допуштени напон на замарање при $N_e = 2 \cdot 10^6$ промена

k - експонент за поједине групе са подједнаким утицајима на замор

σ_i - променљиви амплитудни напон

σ_{max} - максимални напон у посматраном пресеку

Наведена методологија прорачуна завареног споја на замор базира се на испитивањима која су вршена са хармонијским променама напона са константним амплитудама, што не одговара реалним променама оптерећења у пракси. Зато се у новије време у случају одговорних конструкција замор испитује на реално изведеном споју, који се током испитивања оптерећује симулацијом колектива реално снимљених оптерећења у животној веку исте или сличне конструкције и на тај начин одређује експлоатациони век конструкције односно споја.

8. ЗАКЉУЧАК

У другом делу говорило се о методима спајања машинских делова и врстама спојева у металним конструкцијама.

Највише је наглашено спајање машинских делова заваривањем.

Заваривање је један од важнијих поступака спајања јер је обликовање завареног споја једноставније од закивања а заварени спојеви су лакши од закованих. У поређењу са закивањем заваривање има доста предности (једноставнија је технологија, брже је, шира је могућност његове примене, настале грешке је лакше отклонити на завареном месту итд.).Спој је нераздвојив па је то мана.

У трећем делу приказан је прорачун статичке чврстоће завареног споја односно прорачун сучеоних и угаоних спојева.Заварени спојеви због свог специфичног облика изазивају поремећај тока линија сила и концентрацију напона.Рачунски напони се пореде са допуштеним напоном завареног споја.

У четвртном делу приказан је прорачун динамичке чврстоће завареног споја, концентрацији напона,стварање заморног лома материјала, утицај грешака у шаву и утицај ових фактора на динамичку чврстоћу.

Објашњена је промена својства зоне утицаја топлоте, затим, прорачун заварених спојева изложених променљивом оптерећењу и на крају димензионисање заварених спојева напрегнутих променљивим оптерећењем.Динамичка издржљивост заварених спојева је смањена услед низа фактора.Дат је један од начина одређивања утицајних коефицијената при динамичком оптерећењу са константном амплитудом што није реално.Одређивање динамичке чврстоће је сложен поступак.Да би се он ипак на задовољавајући начин дефинисао,дошло се до дефинисања одговарајућих група заварених спојева који имају приближно исте утицаје на динамичку чврстоћу споја.

С тога се при димензионисању ових спојева о томе мора водити рачуна и из тих разлога,динамичко оптерећење конструкције па самим тим и места спојена заваривањем,морају бити димензионисана према динамичкој чврстоћи.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Јовановић, М. И др., **Машински материјали**, Машински факултет, Крагујевац 2003.
- [2] Јовановић М., Д. Адамовић и В. Лазић, **Технологија заваривања- приручник**, самостално ауторско издање, 2003.
- [3] Николић, Р. и В. Марјановић, **Металне конструкције- Приручник за прорачуне**, Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [4] Николић, Р., **Металне конструкције – Белешке са предавања**, 2008
- [5] Милосављевић, М., М. Радојковић и Б. Кузмановић, **Основи челичних конструкција**, Грађевинска књига, Београд 1986.
- [6] Перовић, З. Д., **Заварене конструкције**, Универзитет Црне Горе, Подгорица, 2002. [7] Бабин, Ј. Никола, Бркљач, Б. Никола, Шостаков, С. Растислав, **Металне конструкције**, Нови Сад, 2006.