

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Александар О. Малетић

**Постојаност електрода при тачкастом
заваривању површински заштићених
ЛИМОВА
Мастер рад**

Крагујевац, 2019.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Наука о заваривању

Број индекса: 393/2016

Александар О. Малетић

**Постојаност електрода при тачкастом
заваривању површински заштићених лимова**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Примарни задатак овог мастер рада јесте одређивање постојаности електрода при тачкастом заваривању каросеријских и површински заштићених лимова, као и дефинисање и избор најповољнијег режима тачкастог заваривања. У овом раду треба да се објасни суштина електроотпорског заваривања, да опис материјала електрода, изврши избор најповољнијих параметара тачкастог заваривања (пречник врха електроде, јачина струје, време заваривања, сила притиска и минимална сила разарања споја) и изврше сва неопходна експериментална испитивања. Она се односе пре свега на испитивања затезањем и металографска испитивања, како на обичним каросеријским лимовима тако и на површински заштићеним лимовима. Описаће се и нумеричка симулација тачкастог заваривања у циљу скраћења времена и замене скупог и дуготрајног експеримента. Овим радом кандидат ће бити оспособљен да самостално бира најповољнији режим тачкастог заваривања, правилно одабере електроде за тачкасто заваривање у условима заваривања обичних и површински заштићених каросеријских лимова.

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
2. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: *Технологија заваривања* – приручник, друго издање Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
3. О. Поповић, Р. Прокић Цветковић: *Поступци заваривања*, Машински факултет у Београду, Београд, 2016.
4. В. Лазић: *Постојаност електрода при тачкастом заваривању површински заштићених лимова*, дипломски рад, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1979.

Крагујевац, 2019. године

Ментор:
Проф. др Вукић Лазић

САДРЖАЈ

САДРЖАЈ.....	I
ПОПИС ОЗНАКА	III
РЕЗИМЕ.....	IV
АВСТРАСТ.....	V
1. УВОД.....	1
1.1 ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ЗАВАРИВАЊА.....	1
1.1.1 Електрични лук	2
1.1.2 Притисак и топлота	2
1.1.3 Гасно заваривање.....	2
1.1.4 Специјални методи заваривања	2
1.2 КЛАСИФИКАЦИЈА МЕТОДА ЗАВАРИВАЊА	3
1.3 ОСНОВИ СПАЈАЊА ЗАВАРИВАЊЕМ	5
1.4 ФИЗИЧКИ ОСНОВИ ЗАВАРИВАЊА.....	6
1.5 ИЗБОР ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА ЗА ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ	9
1.6 ПРЕДНОСТИ И МАНЕ СПАЈАЊА ЗАВАРИВАЊЕМ.....	12
1.6.1 Предности заваривања у односу на друге методе спајања метала.....	12
1.6.2 Недостаци заваривања	13
2. ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ И ПОДЕЛА ПОСТУПАКА ЕЛЕКТРООТПОРСКОГ ЗАВАРИВАЊА	14
2.1 ОСНОВЕ ЕЛЕКТРООТПОРСКОГ ЗАВАРИВАЊА	15
2.2 ПОДЕЛА ПОСТУПАКА ЕЛЕКТРООТПОРСКОГ ЗАВАРИВАЊА.....	16
2.2.1 Шавно заваривање.....	17
2.2.2 Брадавичасто (пројекционо) заваривање.....	22
2.2.3 Сучеоно заваривање са електричним отпором	24
2.2.4 Сучеоно заваривање збијањем.....	24
2.2.5 Сучеоно заваривање варничењем	25
3. ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ	26
3.1 УРЕЂАЈИ ЗА ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ	27
3.2 ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЈА ТАЧКАСТОГ ЗАВАРИВАЊА	28
3.2.1 Параметри тачкастог заваривања.....	28
3.2.2 Режији тачкастог заваривања	34
3.2.3 Технологија тачкастог заваривања.....	41
4. ЕЛЕКТРОДЕ ЗА ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ	44
4.1 ЕЛЕКТРОДНИ МАТЕРИЈАЛИ	46
4.1.1 Основне врсте легура за израду електрода и начини повећања механичких карактеристика	52
4.1.2 Класе бакра и његових легура према RMA стандарду	53
4.2 КОНСТРУКЦИОНИ ОБЛИЦИ ЕЛЕКТРОДА	55
4.3 САВРЕМЕНИ ЕЛЕКТРОДНИ МАТЕРИЈАЛИ.....	61
4.3.1 Електродне превлаке.....	63
5. МЕТОДИ КОНТРОЛЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА	64
5.1 МЕТОДЕ КОНТРОЛЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА БЕЗ РАЗАРАЊА	64
5.1.1 Визуелна контрола	64
5.2 ПЕНЕТРАНТНЕ ПРОБЕ	65
5.2.1 Радиографска проба.....	65

5.2.2	Магнетна метода	66
5.2.3	Ултразвучна испитивања	67
5.3	МЕТОДЕ КОНТРОЛЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА СА РАЗАРАЊЕМ	68
5.3.1	Испитивање затезањем	68
5.3.2	Испитивање савијањем	70
5.3.3	Испитивање ударне жилавости	71
5.3.4	Металографска испитивања	72
5.4	МЕТОДИ КОНТРОЛЕ ТАЧКАСТО ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА	73
5.4.1	Мерење основних параметара тачкастог заваривања	73
6.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ТАЧКАСТО ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА ..	75
6.1	ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ И НАМЕНА ИСПИТИВАНИХ МАТЕРИЈАЛА	75
6.2	ОДРЕЂИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ИСПИТИВАНИХ МАТЕРИЈАЛА	76
6.2.1	Испитивање затезањем	77
6.2.2	Одређивање кривих ојачања	83
6.3	ИЗБОР ПАРАМЕТАРА ТАЧКАСТОГ ЗАВАРИВАЊА ЗА РАЗЛИЧИТЕ ДЕБЉИНЕ И СПОЈЕВЕ	85
6.4	МЕТАЛОГРАФСКА ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА	86
6.5	ИСПИТИВАЊЕ УВИЈАЊЕМ	89
6.6	РЕЗУЛТАТИ НУМЕРИЧКИХ ИСПИТИВАЊА	90
7.	ПОСТОЈАНОСТ ЕЛЕКТРОДА ПРИ ЗАВАРИВАЊУ ОБИЧНОГ И ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНОГ КАРОСЕРИЈСКОГ ЛИМА Č0148 P4	95
7.1	ВРСТЕ ПРИМЕЊИВАНИХ ЛИМОВА	95
7.1.1	Декапирање	95
7.1.2	Механичке карактеристике испитиваног челичног лима Č0148 P4	97
7.2	РЕЗУЛТАТИ МЕХАНИЧКИХ ИСПИТИВАЊА	97
7.3	ПОСТОЈАНОСТ ЕЛЕКТРОДА	98
7.4	ИСПИТИВАЊЕ ПОСТОЈАНОСТИ ЕЛЕКТРОДА ПРИ ЗАВАРИВАЊУ КАРОСЕРИЈСКИХ НЕЗАШТИЋЕНИХ И ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНИХ ЛИМОВА	102
7.4.1	Практична проба на незаштићеним лимовима	102
7.4.2	Практична проба на површински заштићеним лимовима	103
7.5	ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНИХ ЛИМОВА	105
7.5.1	Појам и дефиниција заварљивости	105
7.5.2	Методe за испитивање заварљивости	108
7.6	ЗАВАРИВАЊЕ ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНИХ ЛИМОВА	108
7.6.1	Проблеми електроотпорског заваривања површински заштићених челичних лимова	108
7.6.2	ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНИХ ЛИМОВА (ПОЦИНКОВАНИХ) ..	109
8.	ЗАКЉУЧАК	114
9.	ЛИТЕРАТУРА	115

ПОПИС ОЗНАКА

Ознака	Јединица	Опис
Q	J	Количина топлоте
I_z	A	Струја заваривања
t_z	s	Време заваривања
v_z	m/s	Брзина заваривања
F_z	kN	Сила притиска на електродама
D	mm	Пречник електроде
a	m	Растојање између средишта узастопних тачака
s	mm	Дебљина лима
f	Hz	Фреквенција наизменичне струје
U''	V	Напон секундарног кола
L	H	Индуктивност секундарног кола
X	Ω	Индуктивни отпор
d_e	mm	Пречник врха електроде
d_s	mm	Пречник сочива
h	mm	Улегнуће после заваривања
H	mm	Висина сочива
R	Ω	Омски отпор
R_1	Ω	Контактни отпор између лимова
R_2	Ω	Отпор лимова
R_3	Ω	Отпор на местима налегања електрода
i_z	A	Струја жарења
t_z	s	Време жарења
T	per	Период протицања наизменичне струје
i_o	A/mm^2	Густина струје
p	MPa	Специфични притисак електрода
n	MPa	Периоде наизменичне струје
R_m	MPa	Затезна јачина (чврстоћа)
A	$\%$	Додирна површина електроде са лимовима
I_s	mm^2	Струја шентирања
F_m	N	Максимална сила
S_0	mm^2	Површина почетног попречног пресека врха електроде
ΔL	mm	Трајно издужење
$F_p (F_{0.2})$	N	Сила на граници течења
L_0	mm	Почетна дужина
E	MPa	Модул еластичности
F	N	Сила затезања
L_e	mm	Усвојена мерна дужина екстензометра
k_m		Коефицијент искоришћења топлотног процеса
$R_{0.2}^s$ и $R_{0.2}$	MPa	Технички напон течења
A_0	J	Утрошени рад за лом епрувете

РЕЗИМЕ

Електроотпорско тачкасто заваривање има највећу примену при изради шкољки аутомобила, кабина камиона и других производа од лима. Поступак се сврстава у термомеханичке методе заваривања, јер се чврст спој између преклопљених делова остварује комбинованим дејством топлоте и силе притиска.

У овом раду спроведена су опсежна теоријска експериментална и нумеричка истраживања у циљу утврђивања постојаности електрода при заваривању обичних каросеријских и површински заштићених лимова $\check{C}0148P4$, као и одређивања најповољније технологије тачкастог заваривања одговорних склопова аутомобила на преклопно тачкасто завареним спојевима и различитим дебљинама лимова $(0.8+0.8)$ и $(1.2+1.2)$ mm. Експериментална истраживања послужила су као основа за верификацију, развој и доградњу примењеног нумеричког модела.

Пре избора технологије заваривања, најпре су одређена најважнија механичка својства основног материјала у различитим правцима и на већем броју епрувета. Основни параметри тачкастог заваривања (јачина струје, сила притиска, време заваривања и пречник врха електроде) бирају се тако да пречник растопљеног језгра (сочива) одговара приближно пречнику врха електроде.

Провера квалитета тачкасто завареног споја изведена је експерименталним и нумеричким методама. Испитивања затезањем и “методом на момент увијања” су послужила за избор најповољнијег режима тачкастог заваривања, као и за верификацију нумеричке методе коначних елемената.

Кључне речи: електроотпорско тачкасто заваривање, електроде, заварљивост, поцинковани лим, параметри заваривања, ауто-индустрија, експерименталне методе, нумеричке методе.

ABSTRACT

Resistance spot welding is usually used in production of auto bodies, truck cabs and other products of sheet metal. This procedure belongs to a thermo-mechanical methods of welding, because the solid joint between overlapped parts is realised by combined influence of heat and force pressure.

Detailed theoretical, experimental and numerical investigations are carried out in this paper with the aim to determine the most appropriate technology of spot welding of reliable automotive assemblies, on overlapping spot welded joints and with different sheet metal thickness.

The paper contains results of experimental and numerical investigations with aim to determine the stability of the electrode when welding car body sheets and coated sheets (galvanized) Č0148P4, as well as the technology of spot welding of reliable automotive assemblies on overlapped bonds of sheets with different thickness (0.8+0.8) and (1.2+1.2) *mm*. Comprehensive experimental data were used as a base for verification, development and upgrade of applied numerical model.

Before selection of the weld technology, we first determined the most important mechanical properties of the base material in different directions and on a great number of test workpieces. The most important welding parameters are: diameter of the electrode tip, welding current, welding time and electrode force. Parameters are chosen in such a way that the diameter of the melted core corresponds approximately to the diameter of the electrode tip.

The quality testing of the spot welds is done by experimental and numerical methods. Tensile and twisting testing are used for selection of the most suitable spot welding regime, as well as for verification of the numerical finite element method analysis.

Key words: resistance spot welding, electrodes, weldability, galvanized coatings, welding parameters, auto-industry, experimental methods, numerical methods.

1. УВОД

1.1 ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ЗАВАРИВАЊА

Заваривање је процес нераздвојивог спајања металних или неких полимерних материјала, путем успостављања међуатомских веза између предмета који се заварују, при чему се појединачно или комбиновано користе топлота и механичка енергија, а по потреби и додатни материјал. Заваривањем се успешно спајају: метал и метал, неметал и неметал, као и неметал и метал. Ипак, најширу примену има спајање метала, односно техничких легура гвожђа и других легура.

Технологија заваривања најмлађа је грана механичке (машинске) технологије. Нагли развој технологије заваривања настао је крајем XIX и средином XX века када је почела примена горивих гасова и електричног лука као снажних топлотних извора. Од тада се ова технологија непрестано развија захваљујући примени нових достигнућа како у фундаменталним наукама тако и у рачунској техници, роботизици и другим дисциплинама.

Иако на први поглед изгледа да успех заваривачких радова зависи само од вештине и искуства заваривача, у стварности се технологија заваривања заснива на одређеним научним концептима које морају познавати не само инжењери и техничари већ у извесној мери и заваривачи.

У групи заваривачких поступака најстарије је ковачко заваривање (познато још од 1400. године пре Христа), па је зато дуго времена појам ковности материјала значио исто што и заварљивост. Основа за ширу примену заваривања створена је проналаском извора велике концентрације топлотног флукса, што је неопходан услов за локално топљење метала. 1802. године у САД конструисан је први горионик са водоником и кисеоником, а готово век доцније (1901.) у Француској је израђен први горионик са окси-ацетиленским пламеном. Седамдесетих година прошлог века експериментирало се и са заваривањем помоћу електричног лука; најпре 1862. године са угљеном електродом, па 1891. године са голом електричном жицом, да би у првој декади овог века Швеђанин Кјелберг (1908.) први применио обложену электроду.

Још у првим данима заваривања електричним луком запажено је да голе електроде дају заварени спој рђавих особина, због тога што растопљен метал апсорбује гасове из ваздуха. Даљим развојем дошло се до закључка да се заштита растопља од спољне атмосфере у принципу може остварити на два начина: (1) применом топитеља (преко облоге електроде или у облику праха); (2) потискивањем ваздуха из зоне заваривања (довођењем аргона, хелијума, угљен-диоксида или њихове мешавине). На основу тих сазнања уведени су следећи поступци електролучног заваривања: ручно-електролучно (РЕЛ, 1908.), под прахом (ЕПП, 1928.), под троском (ЕПТ, 1953.), и поступци заваривања у заштити гаса (МИГ/ТИГ/МАГ, у раздобљу од 1940. до 1950.)

Поред наведених поступака заваривања топљењем велику примену имају термо-механички поступци од којих су најважнији електроотпорски начини заваривања. Овде спадају: тачкасто, шавно, пројекционо као и сучеоно заваривање збијањем и варничењем.

Најзад се последњих тридесетак година развијају, а неки увелико и примењују, тзв. физички методи заваривања: електронским снопом, ласерским зрацима, ултразвучним осцилацијама, дифузијом, трењем, експлозијом итд.

Хронолошки приказ историјског развоја и примене појединих начина заваривања приказан је у табели 1.1.

1.1.1 Електрични лук

Таблица 1.1 Преглед данас примењиваних начина заваривања

1881.	У Француској (Демеритон) – спајање оловних акумулаторских поча.
1882.	Бернардос изводи електролучно заваривање челика графитном електродом помоћу једносмерне струје из акумулатора. Примена ове методе остала је ограничена за репаратуру и наваривање из два разлога: први је што честице угљеника настале делимичним топљењем врха електроде дају тврд и крт спој, а други јер долази до апсорпције (O_2 и N_2 из ваздуха) те се погоршавају све механичке особине завареног споја.
1888. 1889.	Славјанов (Русија) је успешно применио топљиву челичну электроду у електричном луку једносмерне струје из посебног генератора чиме је отклоњена опасност од угљеника, што је омогућило успешније спајање два метална радна предмета.
1907.	Кјелберг (Шведска) је 1908. године први применио обложену электроду, што је омогућило да ручно-електролучно заваривање (РЕЛ) постане доминантно од 20-тих година XX века.
30-тих година XX века	Развијени су методи електролучног заваривања топљивом електродном жицом под прашком – ЕПП (у САД и СССР-у), чиме је знатно повећана производност и побољшани радни услови.
1941.	Почела је примена ТИГ (нетопљива волфрамска електрода у заштити инертног гаса (Аг или Не) САД)
1948.	МИГ (САД) – топљива електродна жица у инертном гасу (Аг, Не).
1951.	Заваривање под троском (СССР).
1953.	МАГ (СССР) – челична гола жица у заштити CO_2 (знатно јефтинији гас од Аг и Не, као и могућност механизације).

1.1.2 Притисак и топлота

1886.	У САД, Томпсон је увео сучеоно електроотпорско заваривање.
1905.	Тачкасто електроотпорско заваривање.
1922.	Шавно електроотпорско заваривање.

1.1.3 Гасно заваривање

1894.	Гасно заваривање ацетиленом (C_2H_2) (окси-ацетиленско) (Француска).
1902.	Шира примена због добијања O_2 из ваздуха (Линде).
1911.	Ацетилен (C_2H_2) у комбинацији са кисеоником (O_2) најпре је коришћен за термичко сечење челика.

1.1.4 Специјални методи заваривања

1895.	Алуминотермијско заваривање.
1935.	Заваривање ултразвуком.
1946.	Хладно заваривање.
1955.	Заваривање плазмом
1956.	Заваривање трењем.
1957.	Заваривање електронским снопом.
1960.	Заваривање експлозијом и ласерским зрацима.

1.2 КЛАСИФИКАЦИЈА МЕТОДА ЗАВАРИВАЊА

Заваривање, као технологија спајања два или више елемената у јединствену целину, различитим методама, непрекидно се развија и све више примењује због низа техничко-економских предности у односу на друге начине спајања. Као што је већ споменуто, данас је у индустријски развијеним земљама у примени знатно већи број метода заваривања него код нас, што указује на то да је потребно више користити заваривање за израду металних конструкција. Примена разних метода заваривања у односу на све остале производне процесе (ливење, ковање, пресовање, дубоко извлачење, резање, итд.) достиже 25%, што потврђује економску исплативост спајања метала заваривањем. Осим тога, око 50% свих произведених челика (фолија, лимова, плоча, цеви, профилних цеви, жица, профила) прерађује се у некој фази производног процеса заваривањем или сродним поступцима.

За међусобно спајање материјала потребна нека врста и количина енергије, под чијим утицајем може настати одређено кретање и премештање материјалних честица (металних јона), односно образовање заједничких кристалних решетки на граничним површинама спајања. Без обзира на врсту коришћене енергије (хемијска, механичка, топлотна), увек је потребно да та енергија буде већа од енергије потребне за активацију атома, јер је њихово побуђивање услов за међусобно спајање, тј. образовање заједничких кристалних решетки.

Бројне методе и варијетети заваривања могу се класификовати према:

- намени (заваривање, наваривање, метализација);
- агрегатном стању основног материјала у зони споја (топљењем, притиском);
- врсти електрода (топљива, нетопљива, гола, обложена, са језгром, итд.);
- заштити растопа (без заштитне атмосфере или у заштитној атмосфери инертног или активног гаса);
- стању електричног лука (отворени, покривени лук, итд.);
- врсти енергије (хемијска, електрична, механичка).

У **методе заваривања притиском** спадају: хладно заваривање, заваривање трењем, заваривање ултразвуком, заваривање експлозијом и др.

У **методе заваривања топљењем** спадају: *гасно заваривање* (заваривање пламеном, окси-гасно или окси-ацетиленско заваривање), *електричним луком обложеном електродом* (или ручно-електролучно заваривање - РЕЛ, понекад се у литератури означава и као Е- заваривање), *аутоматско заваривање под прахом* (ЕПП), *електричним луком у заштитном гасу* (МИГ, МАГ, ТИГ), *електролучно под троском* (ЕПТ), *термитно* (алуминотермијско) *заваривање*, *плазмено заваривање*, *заваривање електронским снопом*, *ласерско заваривање* и др. Заварени спојеви добијени локалним топљењем имају нехомогену структуру, што је последица неравномерног хемијског састава и различитих услова кристализације појединих зона завареног споја. Због тога су механичке и технолошке особине метала у зони утицаја топлоте неравномерне; на нехомогеност нарочито утичу:

- ливена структура метала шава;
- физичке и хемијске промене метала шава у току заваривања (оксидација, разугљеничење, образовање нитрида, апсорпција гасова, дифузија неких елемената из шава у основни материјал и обрнуто и др.);
- појава унутрашњих грешака у металу шава (грешке типа прслина: хладне, топле, ламеларне и прслине жарења, неметални укључци, гасни мехурови и др.);

- структурне промене у ЗУТ-у (грубозрнаста структура, закаљивање, старење, отпусна крост и др.);
- појава унутрашњих напона и деформација, због неравномерне термичке дилатације и контракције појединих делова завареног споја при загревању односно хлађењу.

Термомеханичко заваривање остварује се превођењем зоне спајања у стање пластичности и затим увођењем силе притиска. Сила притиска може бити ударна (ковачко заваривање), или се уводи постепено: заваривање електричним отпором, заваривање притиском: термитно, индукционо, плазмено.

Методска подела заваривања према врсти примењене енергије дата је у табlici 1.2.

Таблица 1.2 Класификација начина заваривања према врсти енергије

Врста енергије		Извор топлоте		Начин заваривања
Хемијска	Гориво у чврстом и течном стању	Ковачка ватра		Ковачко
		Експлозив		Експлозијом
		Термитна реакција		Термитно
	Гориво у гасовитом стању	Пламен (C ₂ H ₂ +O ₂) Пламен водоника и других горивих гасова (угљоводоника)		Гасно пламено: топљењем и притиском
Електрична	Једносмерна или наизменична струја	Електрични лук		РЕЛ, ЕПП, ТИГ, МАГ, МИГ, плазмено
		Електрични отпор	Растопа	Под троском
			Чврстог метала	Електроотпорско
		Електронски сноп у вакууму		Електронским снопом
		Светлосни зраци		Ласером
Механичка	Притисак Трење Ултразвук	Унутрашње трење		Хладно, ковачко, експлозијом
		Површинско трење		Трењем
		Механичко треперање		Ултразвучно
Остале	Соларна	Сунчева светлост		У развоју
	Ел. маг. зрачење	Волфрамско влакно у инертном гасу		
	Зрачење	Халогено-кварцне лампе		
Цулова топлота и трење се сврставају у унутрашње топлотне изворе.				

У пракси се понекад међусобно комбинују наведене врсте енергија, односно начини извођења заваривања са гледишта механизације, тако да дата подела није оштро условљена; то значи да се неки метод заваривања може сврстати и у другу групу.

Начини заваривања према средини у којој се образује метално купатило (купка) могу да буду: заваривање у ваздуху, вакууму, заштитним гасовима, под прахом, са топитељем и са комбинованом заштитом. Као заштита могу се применити: *активни гасови* (CO_2 , N_2 , водена пара, смеша активних гасова), *инертни гасови* (Ar, He, Ar+He) и такође смеша инертних и активних гасова (Ar+ CO_2 , Ar+1-5% O_2).

1.3 ОСНОВИ СПАЈАЊА ЗАВАРИВАЊЕМ

Према основним концепцијама спајања елемената конструкције, посебно заваривањем, уочава се да је експлоатациона сигурност заварене конструкције према лому од радног оптерећења један од најважнијих захтева при њеном пројектовању, конструисању и изради.

И поред правилно предвиђених и примењених конструкционо-сигурносних мера, ипак у пракси долази до ломова, што усмерава на даља нова истраживања и проучавања критеријума сигурности, односно испитивања услова и узрока настајања лома, као и мера потребних за добијање производа траженог и одрживог квалитета.

Како нема технички и економски идеалног решења, то се при изради неке заварене конструкције (елемента) тежи оптимизацији и рационализацији производног процеса, односно тежи се подесном избору:

1. Елемената-конструкције,
2. Материјала и
3. Технологије.

Истраживање и проучавање ова три чиниоца производног система заснива се на утврђивању:

- подобности материјала за заваривање, односно да ли се разматрани материјал може спојити одређеним начином и поступком заваривања, а да се при томе битно не погоршају својства спајаног материјала;
- поузданости изведеног споја, односно да ли су конструкциона решења и заварени спојеви тако изведени да задрже пројектована својства отпорности у току предвиђеног времена рада;
- могућности спајања, тј. да ли се може остварити спајање изабраним начином заваривања у датим производним условима.

За практично остваривање пројектног захтева одговоран је:

- конструктор, за конструкциона решења укључујући и избор материјала;
- произвођач, за тражена својства основног и додатног материјала;
- технолог заваривања, за разраду технолошког процеса и његово извођење.

При томе се тежи оптималном избору и остваривању параметара производног система, чије се узајамно деловање (интеракција) може приказати схемом:



Како су техничко-економска својства заварених елемената конструкције повезана са квалитетом и функцијом одабраног материјала и технологије, то је критеријум за њихов оптималан избор заснован на понашању материјала при извођењу технолошког поступка и при експлоатацији.

Заварене конструкције израђују се од различитих врста материјала, па је веома тешко навести све карактеристике које показују погодност материјала за дату конструкцију; ипак се може истаћи да се првенствено користе квантитативне процене одређених механичких особина, нпр. напона течења, жилавости, тврдоће, динамичке издржљивости и тсл.

Промена врсте материјала условљава и измену технологије заваривања, а у току процеса долази до спонтане промене својства материјала због структурних и других промена

(према Киркендалу: технологија → структура → својства), па се настоји да одабрани материјал има добру заварљивост што омогућава да спој има потребна својства за очекиване услове експлоатације (погодност за дате сврхе).

Технологија заваривања се бира према врсти материјала и облику елемената конструкције и повезује се са резултатима анализе утицајних параметара који доводе до спонтане или дириговане промене својстава основног материјала око шава. Стога недовољно познавање проблематике заваривања може довести до појаве грешака завареног споја и опасних хаварија за време експлоатације, што се из аспекта сигурности, поузданости и економичности у сваком случају мора узети у обзир при разради технолошког процеса заваривања.

У највећем броју случајева за израду заварених производа се користе нискоугљенични и нисколегирани челици, а у последње време и тзв. челици повишене јачине, као и друге легуре. За њихово спајање у савременој техници развијени су бројни методи и поступци, уз све већу примену аутоматизације чиме се повећава и лакше одржава тражени квалитет, производност и економичност. Због тога се данас у свету користи више од 100 метода заваривања, а код нас око двадесетак. Будући да расте примена заваривања, потискују се ранији начини спајања металних материјала (нпр. закивање). Заварени спојеви у поређењу са закованим имају равномерније особине споја, економичније извођење, сигурнију експлоатацију и дужи век рада. Међутим, за израду заварених производа тражи се већа стручност радника, а посебно су појачани захтеви за контролу припреме и извођења заваривачких радова, као и завршне контроле. Исто тако су веома оштри захтеви у погледу повремене контроле квалитета значајних заварених конструкција.

1.4 ФИЗИЧКИ ОСНОВИ ЗАВАРИВАЊА

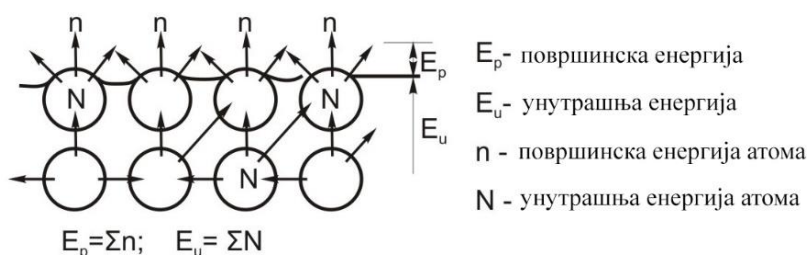
Заваривање метала заснива се на образовању споја захваљујући дејству међуатомских привлачних сила које повезују граничне површине спајаних предмета. Привлачне силе између атома могу довести до формирања заједничких кристалних решетки на додирној површини металних предмета. Овај начин спајања омогућава да се одржи непромењен облик спојених предмета (супротно од механичких операција - закивања или везе остварене помоћу завртњева) где се због преклопних спојева и трајних деформација мање или више мења и облик спајаних делова).

Да би између атома граничних површина два метала почеле деловати међуатомне привлачне силе, потребно је приближити атоме на размак мањи од параметра кристалне решетке. Ако се то оствари по целој додирној површини, нестаће подеона граница и добиће се, мање или више, савршен спој.

Површинске и потповршинске кристалне решетке металних предмета знатно се разликују од кристалних решетки у унутрашњости материјала. То је последица разлике у енергетским нивоима које имају гранични и приповршински атоми и они у унутрашњости предмета. Вишак енергије на површини предмета у односу на његову унутрашњост носи назив слободна површинска енергија. У кристалографији се проучавају специфичности које се односе на посебне особине површинских слојева. Оне проистичу из различитих физичких услова у којима се налазе атоми и молекули у близини граничних површина. Површински слојеви имају повећану активност и различиту оријентацију молекула (сл. 1.1) и друкчији хемијски састав у односу на друге делове основног материјала. Од свих површинских појава највећи значај има промена површинске енергије.

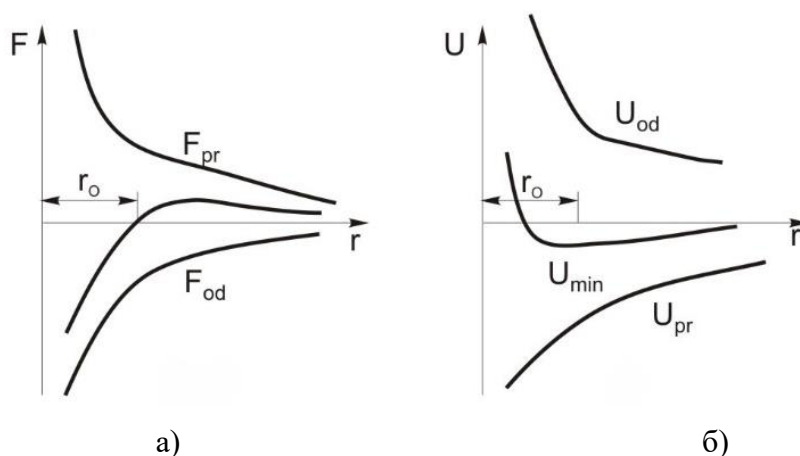
Проучавањем различитих метала утврђено је да се сваки од њих одликује посебном поликристалитном грађом тј. структуром. Унутрашња грађа метала (легуре) условљена је

врстом кристалне решетке, распоредом атома, као и појавом и размештајем структурних фаза и грешака у кристалним решеткама. Врсте међуатомских веза у чврстим металима одређују њихове физичке, хемијске и механичке особине. Унутрашњи атоми у чврстом телу су у равнотежени, јер су опкољени околним атомима, док се спољни атоми граниче са ваздухом или другим срединама те су неуравнотежени (сл. 1.1) и стога поседују површинску енергију. Довођењем спољне енергије мења се стање посматраног система, а промена се испољава у већим амплитудама осциловања атома, посебно на граничним површинама. У случају када су спољне енергетске побуде довољно велике може доћи до савлађивања тзв. енергетске баријере између додирних површина два метална предмета и образовања заједничке металне везе, услед активације валентних електрона и формирања заједничког електронског облака.



Слика 1.1 Приказ енергетског стања атома

Ниједним поступком механичке обраде, па ни полирањем дијамантским прахом, не могу се граничне површине толико приближити да им средња висина површинских неравнина буде мања од параметра кристалне решетке. Довољно приближавање граничних површина може се постићи довођењем спољне енергије (топлоте) или механичког притиска. При заваривању притиском, на граничној површини настају електростатичке силе привлачења и одбијања услед дејства јона и електрона распоређених на тим површинама. На неком растојању r_0 укупне силе привлачења и одбијања, F_{pr} и F_{od} , биће у равнотежи (сл. 1.2а), али остаје разлика одговарајућих потенцијалних енергија, U_{pr} и U_{od} (сл. 1.2б), која представља енергетску баријеру. Равнотежно међуатомско растојање r_0 приближно одговара параметру кристалне решетке, а даљим приближавањем граничних површина руши се баријера и образује се заједничка метална веза.



F_{pr} - привлачна сила

F_{od} - одбојна сила

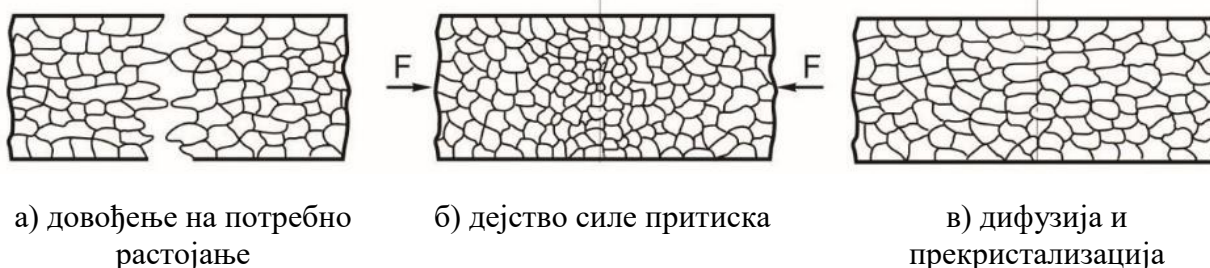
U_{pr} - привлачна енергија

U_{od} - одбојна енергија

Слика 1.2 Зависност сила (а) и енергија (б) од међуатомског растојања r_0

Из горњег произлази да се спајање заваривањем може остварити било топљењем или притиском (сл. 1.3). Заваривање притиском се остварује:

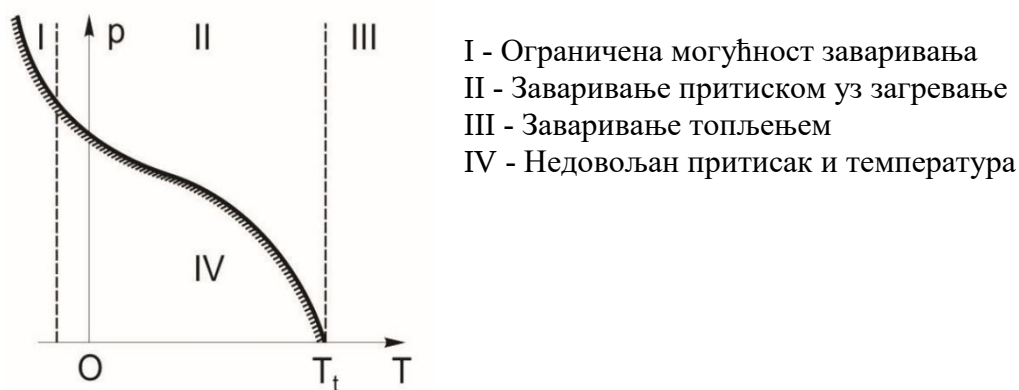
- међусобним приближавањем радних предмета (сл. 1.3а),
- деловањем силе притиска (сл. 1.3б) и
- дифузијом и прекристализацијом (сл. 1.3в).



Слика 1.3 Фазе образовања споја притиском

Уколико се у зону контакта допунски доведе топлотна енергија, радни предмети се локално загревају и омекшавају, а повећава се пластичност загрејаних зона, побољшавају дифузиони процеси па тиме расте и могућност да површински атоми лакше савладају енергетску баријеру. Из овога проистиче да се, са физичке тачке гледишта, спајање заваривањем може остварити *деловањем притиска, довођењем топлоте и комбиновано*.

Услови за образовање завареног споја могу се приказати и помоћу дијаграма притисак-температура (сл. 1.4). За сваки метал се може конструисати овакав дијаграм и одредити граничне вредности и подручја притисака и температуре потребних за остварење завареног споја.



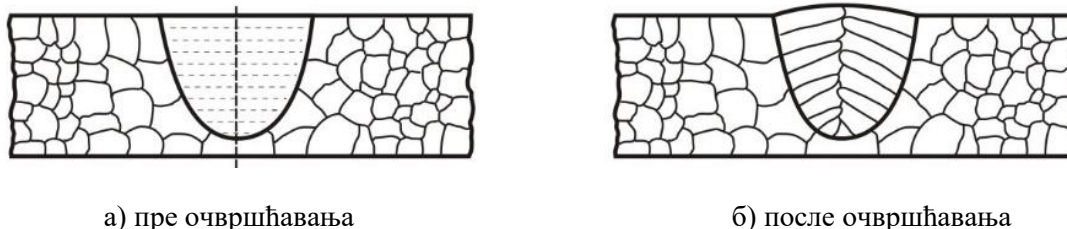
Слика 1.4 Приказ граничних параметара заваривања (T_t - температура топљења)

Из горе реченог произлази да се заваривање метала може извести:

- Топљењем,
- Притиском и
- Комбиновано (термомеханичко).

Заваривање топљењем је процес нераздвојивог спајања радних предмета при температурама на месту спајања вишим од температуре топљења, уз примену додатног материјала или без њега (сл. 1.5). За овај начин заваривања неопходни су снажни извори топлоте који локално топе метал. Тако се образује метални растоп тј. заваривачко купатило чијом кристализацијом настаје шав. За заваривање се практично користе покретни извори

топлоте која се ослобађа дуж линије споја. У овом случају енергетска баријера је савладана, јер се атомске везе успостављају кристализацијом растопа (кад се извор топлоте довољно удаљи од почетног купатила (купке)). При заваривању топљењем битну улогу игра и појава која се зове површински напон течног метала.



Слика 1.5 Заварен спој добијен топљењем

Заваривање притиском је процес спајања применом механичког дејства силе, статичког или динамичког карактера (сл. 1.3). У пракси ови процеси спајања нису увек јасно разграничени. Ако се код појединих метода допуњују - спајање спада у поступке термомеханичког заваривања (ковачко, електроотпорско и др.)

За нераздвојиво спајање металних конструкција увелико се користе и процеси сродни заваривању: термичко резање, жлебљење, наваривање, метализација, а такође и лемљење и лепљење. За задње две методе веома је значајан површински напон лема (односно лепка).

1.5 ИЗБОР ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА ЗА ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Одговарајући метод и технологија заваривања бирају се према врсти металне конструкције. Односно, материјал за израду елемената (делова конструкције) или целу конструкцију бира конструктор, из постојећег великог асортимана материјала различитих особина, с циљем да се добрим избором одговарајућег материјала и методе заваривања оствари поуздан заварени спој који се може трајно експлоатисати у очекиваним радним условима.

Овај, по дефиницији једноставан задатак, у суштини је врло сложен, јер захтева свеобухватна техничка сазнања, која се у савременим условима сложених послова могу остварити "тимским радом" стручњака различитих специјалности. Стога су инжењери заваривања, специјалисти за заваривање или сродне технике, при изради готово свих заварених конструкција и њихових елемената, од најкрупнијих до оних најмањих, одговорни у погледу концепције, производње и економије - јер заваривање као поступак спајања има пресудан утицај на понашање и чврстину конструкција при експлоатацији у предвиђеном радном времену.

Основни захтев који се мора испунити у циљу добијања заварених спојева тражених особина, своди се на добро познавање целокупне проблематике од стране инжењера и технолога, јер у супротном долази до неодговарајућег избора материјала, до погрешне локације заварених шавова на местима великих локалних променљивих оптерећења, као и до тешкоћа око заваривања неприступачнијих делова конструкције.

Ако се ова проблематика недовољно познаје или не уважава, добијају се неекономични и непоуздани заварени производи. У том случају су потребне споре и скупе поправке које проузрокују закашњење у испоруци или пак хаварије у радним условима.

Велики број метода заваривања омогућава економски исплативо и поуздано извођење заварених конструкција, будући да се данас могу користити различити материјали - различитих хемијских састава, механичко-технолошких својстава, структура и заварљивости,

што све подиже технолошки ниво у машинској производњи. Другим речима, данас се могу спајати делови конструкција свих дебљина и конфигурација, од најситнијих до гигантских, применом механизованих, полуаутоматизованих или потпуно аутоматизованих поступака заваривања, што доводи до повећања производности рада, корисних особина, економичности и појефтињења производње.

Усавршавање постојећих начина заваривања омогућило је спајање разних врста челика, обојених и других метала и легура, као и неметалних материјала: полимерних материјала (пластика), керамика и др. Наведени материјали се све више користе у енергетици, електроници, базној и прерађивачкој хемији, ваздухопловству, ракетној техници и др., где су изложени различитим радним условима, нпр. високим температурама, притисцима, убрзањима, различитим агресивним срединама, продуктима сагоревања, брзим променама температуре и напрезања, итд.

Примена металних и неметалних материјала уз оптимално спајање саставних делова осигурава постојаност заварене конструкције у радним условима, узимајући у обзир да се корисне особине погоршавају при заваривању и у току експлоатације.

Према свему наведеном, од избора основног материјала у великој мери зависи успешна израда заварене конструкције. Такође је од значаја да се при заваривању, мора очекивати да дође до знатних промена - механичких, хемијских, структурних и других особина, те се при избору поступка руководи тиме да основни материјал мора да задржи тражена својства на неком нивоу и после заваривања, базирајући то на доброј заварљивости и економичности. Стога се при избору поступка заваривања тежи да се уштеди највише на материјалу, тако што се праве уски жлебови и користе поступци који дају дубље уваривање.

У највећем броју случајева овај захтев испуњавају, као што је већ истакнуто, угљенични челици, а у случају рада на повишеним и високим температурама као и у корозионој средини, специјални челици или друге легуре. У специјалне челике спадају: нерђајући челици (отпорни на киселине и ватропостојани), термостојани Cr-Mo-V челици и челици отпорни на хабање (на ударно хабање отпоран је Хадфилдов челик: ~1% C, 13% Mn, 1.5% Cr).

Савремена тежња је да се смањи тежина заварене конструкције:

- погодним конструкционим решењем које даје што равномерније оптерећење свих носећих елемената заварене конструкције;
- коришћењем одговарајућег материјала, као и побољшањем његових особина неком технолошком обрадом нпр. термичком или термохемијском обрадом, деформацијом на хладно и тсл.

При избору материјала, нпр. челика, поред економске оправданости, треба узети у обзир чиниоце које за саму конструкцију и услове рада није лако квалитативно утврдити. И поред тога чиниоци као:

- температура експлоатације,
- дебљина радних предмета (лимова, плоча) и
- степен значаја појединих елемената (подсклопова) конструкције.

Врста оптерећења и напонско стање, морају се увек узети у обзир. Јер, нпр. ниска радна температура, већа дебљина елемената и повећани радни захтеви, ударна динамичка оптерећења, а посебно промена напона од једноосног на двоосно или троосно у присуству концентратора напона, условљавају да конструктор мора горе наведено узети у обзир и експериментално проверити њихово деловање.

Смањење тежине конструкције може се постићи правилним избором погодног материјала и поступка обраде. Тежња да се тежина конструкције смањи, допринела је развоју

нових врста материјала повишене механичке отпорности, међу којима велику примену имају микролегирани челици повишене јачине као и посебна класа челика добијених поступком термомеханичке обраде (ТМО челици).

Карактеристично за микролегиране челике је да у односу на угљеничне челике имају повећана својства отпорности и поред тога што су нискоугљенични ($C < 0.22\%$). Повећање чврстине код ових челика резултат је позитивног дејства малих количина легирајућих елемената (микросастојака) који не погоршавају заварљивост, насупрот угљеничним челицима код којих својства отпорности расту са повећањем садржаја угљеника, што је праћено погоршањем заварљивости.

Осталим заварљивим металима и легурама, нпр. алуминијуму, титану, бакру и др., односно њиховим легурама, треба посветити такође пажњу при изради заварених конструкција, узимајући у обзир и њихову заварљивост и специфичну тежину.

При избору материјала било којег конструкционог елемента, експлоатациона сигурност конструкције, посебно према лому од предвиђеног оптерећења, битан је захтев при пројектовању, конструисању и изради. Због тога се као предмет многих истраживања проучава општа концепција конструисања: (1) одређује се допуштени напон према предвиђеном степену сигурности $\sigma_{\text{doz}} = R_e / \nu$ и (2) одређују се гранична стања.

Код прорачуна на основу допуштених напона коефицијент сигурности (ν) зависи од врсте оптерећења, дебљине лимова, врсте челика итд. Ово је доста упрошћен прорачун, јер се не узимају у обзир радни услови конструкције.

Тачнији метод прорачуна конструкције који узима у обзир радне услове, једнородност материјала и др., јесте метод прорачуна према граничним стањима. Полазна једначина за овај прорачун је $\frac{F_r}{S_0} \leq mR$, где је: F_r -рачунска сила, S_0 - површина попречног пресека датог елемента, R - рачунска чврстина (јачина материјала), m - коефицијент радних услова. Коефицијент (m) узима се у обзир радне услове конструкције, крутост делова, појава допунских деформација при експлоатацији, итд.

Углавном се прорачун по допуштеним напонима примењује у машинству, а по граничним стањима при пројектовању грађевинских конструкција. Међутим, као што је познато, у пракси долази до ломова елемената, односно заварених конструкција, и поред свих предвиђених и примењених конструкционо-сигурносних мера, што указује да усвојени критеријуми оцене сигурности нису увек били потпуни. Стога се испитивања неких заварених конструкција усмеравају ка проучавању случајева и услова појаве прелина и њиховог распрострања до потпуног лома као завршне фазе декохезије и деформације материјала при одређеним условима. Неминовно је да заварени производи имају одређену поузданост, која се може предвидети лабораторијским испитивањима на пробним узорцима, као и процесним испитивањима у експлоатацији; претходно се одређују карактеристике материјала односно напонско-деформационо стање. Посебна истраживања односе се на откривање узрока и тренутка настанка прелина и њиховог даљег ширења.

Обимна и разноврсна производња различитих заварљивих материјала проширила је могућност повољног избора основних материјала који повећавају поузданост конструкције; то су нпр. угљенични и легирани челици или у последње време микролегирани челици повишене чврстине (јачине) као и неки ТМО челици и нежелезне легуре. Две задње врсте челика углавном се производе у високоразвијеним индустријским земљама.

За правилан избор основног материјала позван је и одговоран конструктор, а за квалитет произвођач. Технолошка разрада поступка заваривања и његова примена су у домену технолога за заваривање, односно руководиоца производње и стручно проверених (сертификованих, атестираних) заваривача.

1.6 ПРЕДНОСТИ И МАНЕ СПАЈАЊА ЗАВАРИВАЊЕМ

Заваривање има широку и веома разнородну примену у машинству и другим индустријским гранама, као и у одржавању многих производних и радних машина. Захваљујући заваривању, многе металне компоненте и целе конструкције производе се много једноставније и јефтиније, тј. техно-економски успешније. За израду заварених конструкција употребљавају се масивни железарски полупроизводи, као што су лимови, плоче, профили или се они комбинују са одливцима и отковцима.

Осим у машинској техници, заваривање има велику примену у грађевинарству, бродоградњи, процесним техникама, пољопривредној механизацији и другим областима, посебно за репаратурне радове. Од свих начина прераде у металопрерађивачкој индустрији, заваривању припада 25%. Посебно треба истаћи процесну технику (парни котлови, измењивачи топлоте, судови под притиском), хемијску апаратуру, војну индустрију, грађевинску и пољопривредну механизацију, рударску опрему итд.

Различитим методима заваривања и сродних поступака највише се спајају: челик и ливена гвожђа - 95.45%, а затим следе алуминијум - 1.75%, бакар - 1.20%, цинк - 0.80%, олово - 0.60%, никл - 0.10%, калај, магнезијум и титан - 0.10%.

1.6.1 Предности заваривања у односу на друге методе спајања метала

О предности заваривања и лемљења, у односу пре свега на закивање, данас нема ни потребе говорити. Ипак, овде су наведене неке од тих предности:

- упрошћавање конструкције, могућност примене нових материјала и концепата конструкције;
- смањује се израда многих одливака и отковака, што доноси велике економске уштеде;
- олакшава се израда конструкција сложеног облика захваљујући могућности израде плочастих, решеткастих, кутијастих, коморних, љускастих носача;
- смањује се маса конструкције захваљујући широком избору и рационалној примени материјала, најпогоднијег завареног споја (сучеони, угаони, преклопни), начина заваривања и нарочито довољно тачног прорачуна и контроле дозвољеног оптерећења завареног споја. Радна способност производа зависи од техничког нивоа заваривачке опреме, концепције заварене конструкције, избора материјала и технолошког поступка, рачунајући ту и термичку обраду завареног споја, обим и квалитет контроле. Највеће оптерећење може се дозволити само у случајевима кад се провери квалитет завареног споја са гледишта његових радних способности, а обрнуто код шавова за које се претпоставља да су испод просечне јачине, мора се предвидети и мање допуштено оптерећење. Заварене конструкције просечно су за 20% лакше од закованих, а од ливених и до 50%;
- повећање продуктивности захваљујући лакој механизацији и аутоматизацији многих метода заваривања;
- снижавање производних трошкова (краће време израде, нижи трошкови, мањи број радника и др.);
- могућност брже реализације пројектне документације и "освајања" производа.

1.6.2 Недостаци заваривања

Неки од недостатака заваривања су:

- заварени спој топљењем формира се у уско омеђеном појасу топљења завариваних предмета, те су неопходни снажни топлотни извори за локално топљење дуж линије спајања;
- заваривање се изводи поступно, у правцу линије спајања, што има за последицу неравномерну температуру, односно настаје неравномерно температурско поље;
- долази до промене структуре и механичких особина основног материјала у близини линије спајања;
- при бржем хлађењу заварених спојева средњеугљеничних и високоугљеничних челика, јавља се опасност од закаљивања (настанак кртих фаза) у зони утицаја топлоте - ЗУТ-у ;
- услед неравномерног загревања и хлађења настаје опасност од појаве великих унутрашњих напона код дебљих радних предмета и знатних деформација код тањих плоча и лимова;
- каквоћа шавова, његова моћ ношења и функционална поузданост су у великој мери зависни од унутрашњих грешака у шавовима и промена у ЗУТ-у. Унутрашње грешке умањују носећи пресек шавова, а неке имају и ефекат зареза, тј. делују као концентратори напона. Уз садејство са унутрашњим напонима, ове грешке су извор латентних опасности за замор материјала и разарање споја;
- опасности од електричне струје, електричног лука, јонизујућег и нејонизујућег зрачења, гасног пламена, видљивог и невидљивог зрачења, (инфрацрвеног, ултраљубичастог, бљештаве светлости, аеросола) и др. (димова и металних испарења);
- скупа претходна, процесна и накнадна термичка обрада при изради одговорних конструкција од закаљивих челика;
- скупа текућа или накнадна контрола;
- скуп стручни кадар - високообразовани и вешти заваривачи као и стручњаци за припрему технолошке документације и избор материјала, нарочито за контролу готових спојева.

Из овог кратког прегледа главних поступака заваривања производи се да данас стоје на располагању многобројни начини којима се може извести спајање метала. Стога произилази проблем како се одредити у конкретном случају; полази се од чињенице да су бољи топлотни извори веће концентрације јер у мањој мери изазивају неповољне промене у основном материјалу. Погодним избором поступака и технолошких параметара заваривања, укључујући по потреби и термичку обраду, могу се неизбежне промене свести на најмању меру, или се оне чак тако могу усмерити да буду корисне.

На крају треба истаћи да је технологија заваривања, поготово у нашим условима, још у развоју. Тај се развој заснива на усавршавању постојећих метода заваривања, примени механизације и аутоматизације уз увођење аутоматског управљања и робота. Тежи се разради система пројектовања и израде заварених конструкција уз помоћ рачунара по тзв. CAD/CAM - систему.

Без обзира да ли је реч о класичном или CAD/CAM пројектовању, инжењери који се тиме баве, пројектовањем, израдом и контролом заварених конструкција, треба уз остало да буду упознати са карактеристикама материјала за заваривање, основним законима простирања топлоте, металургијом заваривања, карактеристикама заваривачких уређаја, напонско-деформационим стањем (прелазним и заосталим) као и последицом неравномерног температурског поља и локалних структурних преображаја.

2. ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ И ПОДЕЛА ПОСТУПАКА ЕЛЕКТРООТПОРСКОГ ЗАВАРИВАЊА

Позната особина металних материјала да се загревају при протицању електричне струје-Џулов ефекат (RI^2)-искоришћена је за електроотпорско заваривање. Нераздвојиви спојеви се образују као резултат локалног загревања метала електричном струјом и пластичног деформисања загрејане зоне.

На бази електричног отпора развијено је више поступака заваривања који су нашли велику примену у савременој индустрији. Око 25% свих заварених спојева данас се изводи електроотпорским поступцима. Основни разлог за широку примену ових поступака је велика могућност механизације и аутоматизације процеса и висока продуктивност, односно, масовна примена у аутомобилској индустрији.

У зависности од међусобног положаја делова који се заварују електричним отпором, разликују се преклопни и сучеони спојеви; преклопни се изводе тачкастим, рељефним и шавним заваривањем, а сучеони збијањем и варницењем.

Заваривање разних конструкција све се више проширује и унапређује. Чак се и сам материјал све више прилагођава условима заваривања. Спајању заваривањем подвргава се 45-50% светске производње челика (преко милијарду и пет стотина милона тона челика у 2011. години), а од тога 70% припада електролучним методима заваривања, 25% електроотпорским методима и 5% осталим методима. Остали поступци заваривања се углавном примењују када не постоји могућност извођења завареног споја конструкције електролучним или електроотпорским заваривањем. Удео електроотпорског заваривања је велик, а предвиђа се даље проширење примене поступка на нова подручја производње.

Заваривање електричним отпором је основни начин спајања отпресака у аутомобилској индустрији, а све више замењује закивање у авионској индустрији. У прилог овоме се може навести да код савремених авиона број тачака износи неколико милиона, да се код сваког од произведених аутомобила може избројати 5000 - 10000 заварених тачака. Осим тога, налази примену при изради вагона, судова за течност, минијатурних полупроводничких система, штампаних кола у електроници, мрежних арматура у грађевинарству и др.

Углавном се две основне предности тачкастог заваривања у односу на друге начине спајања лимова:

- велика брзина и
- више параметара којима се може аутоматски управљати процес (мониторовати).

Електроотпорско заваривање је захваљујући ниским трошковима и високој продуктивности суперирорно над осталим методама заваривања посебно при заваривању танких металних лимова. Лако се аутоматизује и погодно је за велике серије, односно масовну производњу. Такође је погодно и за мање серије јер се ради о флексибилној технологији и једноставној опреми чији се радни параметри могу лако подешавати и контролисати. Велика погодност електроотпорског заваривања је могућност заваривања великог броја металних материјала. Из наведених разлога је тачкасто заваривање веома погодно за масовну производњу и аутоматизацију, а с обзиром на оваква кретања у савременој индустрији, тачкасто заваривање добија све већи значај.

2.1 ОСНОВЕ ЕЛЕКТРООТПОРСКОГ ЗАВАРИВАЊА

Сви поступци заваривања код којих се метал загрева и топи топлотом произведеном електричним отпором, а да се притом не ствара електрични лук, припадају групи поступака електроотпорског заваривања. Електричним отпором се ствара топлота која се користи за загревање одређене количине материјала на температуру заваривања, као и за загревање материјала у околној зони ради лакшег пластичног деформисања.

Количина топлоте, Q , развијена у проводнику отпора R кроз који у одређеном временском интервалу пролази електрична струја I , током времена t , израчунава се према обрасцу закону Џул Ленца (Joul-Lenc):

$$Q = I_z^2 \cdot R \cdot t_z, J \quad (2.1)$$

где је:

- I_z - струја заваривања у А;
- R - укупни омски отпор између електрода Ω и
- t_z - време заваривања у s.

Када се струја, отпорност и време редом изразе у амперима, омима и секундама, добија се јединица за топлоту која се назива Џул (Joul) (J).

Приликом заваривања, велики део енергије се губи и то: на загревање електрода, загревање расхладне воде итд., а само део ове енергије утроши се на заваривање, па се може рећи да количина топлоте утрошена при заваривању износи:

$$Q = k \int_0^t R \cdot I_z^2 \cdot dt, J \quad (2.2)$$

где је:

k – коефицијент искоришћења топлотног деловања процеса, зависан од врсте материјала и геометрије радних делова, хлађења електроде и тсл., а креће се од 0,8 до 0,9.

Код електроотпорског заваривања примењује се струја врло велике јачине. Обично од (100-300000) А. Због релативно малог електричног отпора метала, заваривање се изводи струјама ниског напона, који обично износи (0,5-10) V. Да би губици били што мањи (одвођење топлоте што мање), струју кроз завариване делове треба пуштати што краће време, управо онолико колико је неопходно за остваривање завариваног споја. Време проласка струје кроз радне комаде обично износи 0,05 до неколико секунди. Из описаних карактеристика струје заваривања, може се видети да је руковање уређајима (машинама) за електроотпорско заваривање мање опасно по заваривача од осталих врста заваривања.

Делови који доводе струју заваривања на радне комаде (електроде, контактне чељусти и тсл.) такође се загревају због електричног отпора. Ово загревање је непожељно и треба га свести на најмању могућу меру. То се постиже самом конструкцијом елемената за довођење струје. Да би електрични отпор тих делова био што мањи, електроде се израђују тако да буду што краће, да имају што већи пресек и да буду од материјала који пружа мали отпор при протицању струје заваривања (бакар и његове легуре).

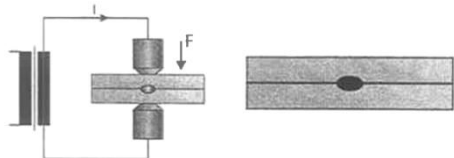
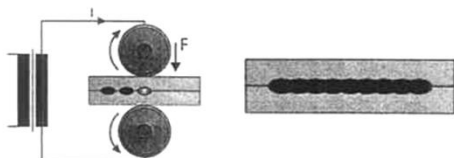
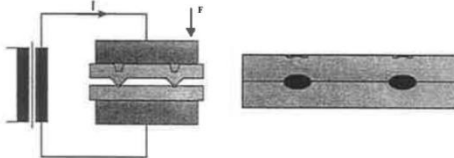
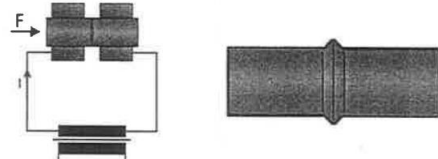
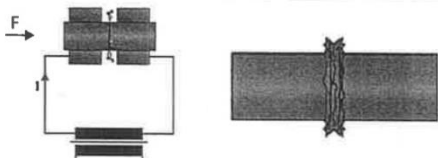
За електроотпорско заваривање примењују се врло велике јачине струје. Због велике јачине струје и малог напона немогућа је примена једносмерне струје, изузев специјалних кондензаторских уређаја. Добијање наизменичне струје малог напона и велике јачине, могуће је помоћу једноставних, погонски поузданијих, стационарних трансформатора. Осим тога, укључивање и искључивање наизменичне струје велике јачине у кратком временском интервалу, могуће је извести, иако не баш на једноставним уређајима.

2.2 ПОДЕЛА ПОСТУПАКА ЕЛЕКТРООТПОРСКОГ ЗАВАРИВАЊА

Код читавог низа поступака заваривања, електрични отпор се користи за добијање топлоте потребне за заваривање, и топљење метала, што је неопходно за остваривање завареног споја. Код већине поступака за стварање споја потребан је и притисак. Због тога се поступци електроотпорског заваривања могу поделити према начину настајања завареног споја. Друга подела заснива се на начину довођења електричне струје за заваривање делова. Довођење струје може бити кондуктивно (непосредним додиром) или индуктивно (без додира електроде и радних комада).

Постоји читав још читав низ подела овог поступка, као подела према брзини заваривања, према начину сучељавања (сучеоно и преклопно), према облику завареног споја (тачкасто, шавно, брадавичасто, збијањем и др.). Најшире примјењивани поступци електроотпорског заваривања су приказани у табlici 2.1.

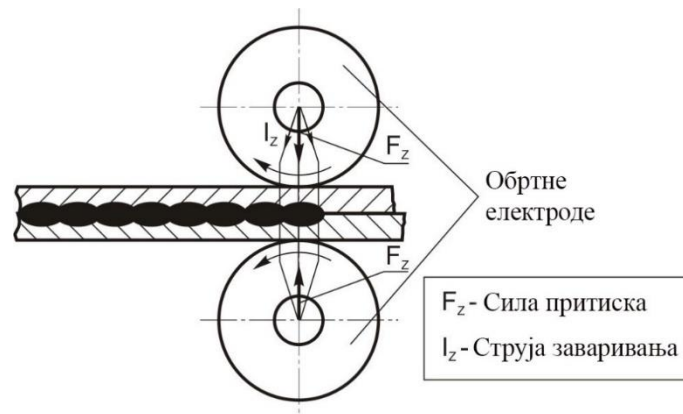
Таблица 2.1 Поступци електроотпорског заваривања

Врста споја	Поступак заваривања	Схема и изглед споја
Преклопни	Тачкасто	
	Шавно	
	Брадавичасто	
Сучеоно	Сучеоно збијањем	
	Сучеоно варничењем	

Како је **тачкасто електроотпорско заваривање** примарни предмет разматрања овога рада, оно ће бити детаљно описано у трећем поглављу овог рада.

2.2.1 Шавно заваривање

Шавно заваривање је поступак спајања метала комбинованим дејством топлоте створене електричним отпором између два лима притиснута електродама облика диска и силе притиска. При томе настаје спој (шав) који може да се сматра као низ тачака, по правилу делимично прекривених, које образују непрекидан шав. Битна разлика шавног заваривања у односу на тачкасто заваривање јесте облик електроде (диск уместо шипке) и њено обртање око сопствене осе. На слици 2.1 дата је схема двостраног шавног заваривања, а на слици 2.2 фотографски приказ машине за шавно заваривање.



Слика 2.1 Схема двостраног шавног заваривања



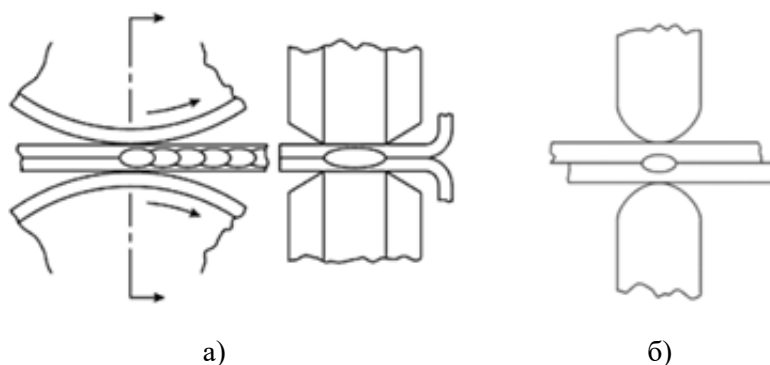
Слика 2.2 Фотографски приказ машине за шавно заваривање

Поступак шавног заваривања састоји се из следећих целина:

- напајања и контролне јединице за заваривање,
- конфигурације заваривачког диска и
- конфигурације завареног дела (дебљине лима).

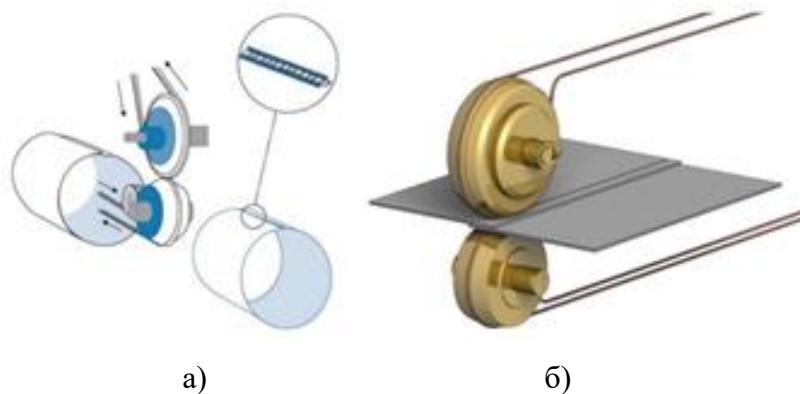
Струја и генерисање топлоте локализовани су у периферним деловима дискова. Електроде се не отварају између заварених тачака. Дискови електрода делују сталним

притиском на радне комаде и обрћу се контролисаном брзином. Струја заваривања пулсира како би се добио низ дискретних тачака, али може бити континуална за одређене примене при великим брзинама где се у супротном могу појавити празнине између појединих тачака. Опрема за шавно заваривање је обично стационарна, а компонентама које се заварују манипулише се преко дискова. Процес се може лако аутоматизовати. Постоји велики број варијанти процеса за одређене примене, нпр. заваривање широким шавом на дисковима с равним контактним делом диска или заваривање уским шавом на дисковима где се користи облик контакта с округлим диском.



Слика 2.3 Широки (а) и уски шав (б)

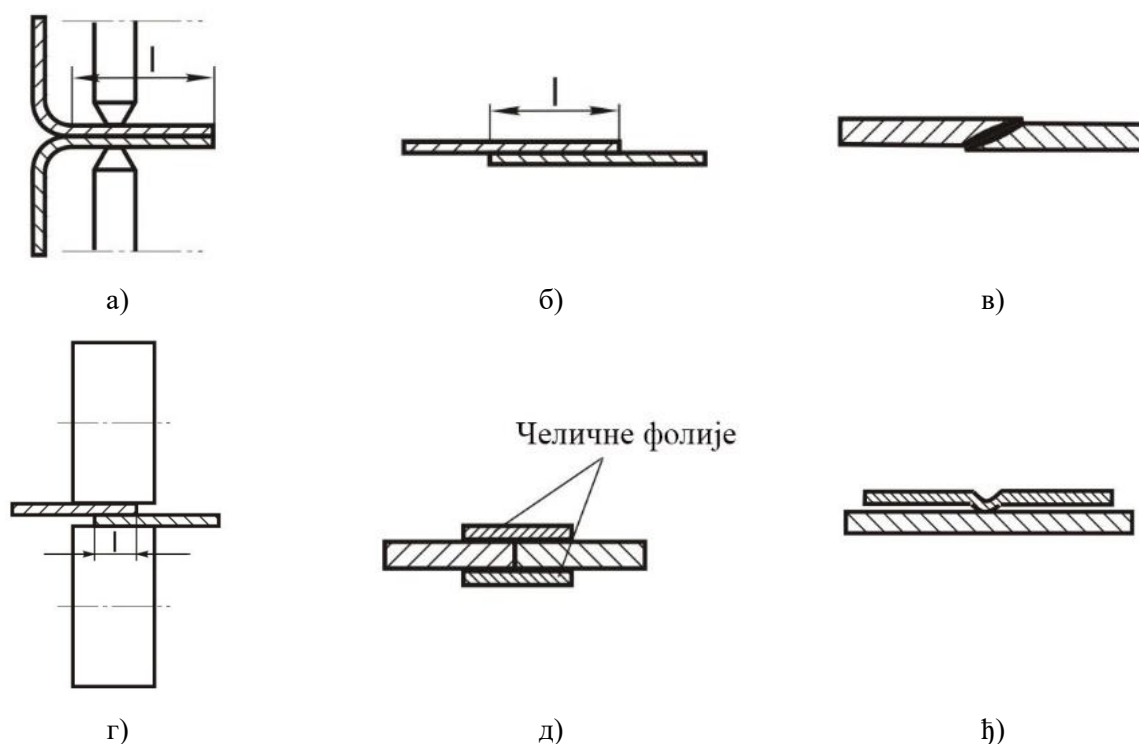
Широко се примењује и заваривање тзв. жичним шавовима, где се правилно обликована бакарна жица убацује између дискова и материјала који се спајају како би се обезбедио стални и чисти контакт. Друга варијанта је заваривање мрежним шавовима, где се уско преклапање ивица лима делимично уситњава током заваривања.



Слика 2.4 Принцип шавног заваривања цеви (а) и равних лимених површина (б)

При заваривању тзв. жичаним шавовима, ваљци за заваривање преузимају задатак електроде и притисног алата. Бакарна жица се води између ваљака и радног комада, истовремено формирајући стални висококвалитетни шав. Бакарна жица омогућава минимално трошење диска за заваривање.

Основне врсте спојева који се могу извести шавним заваривањем приказане су на слици 2.5. Спој облика (в) се користи у случајевима када је потребно да оба лима леже у истој равни или ако је расположива машина мале снаге за заваривање лимова дате дебљине. Слично се разлика у положајима лимова може свести на минимум применом спојева (г) и (д) приказаних на споменутој слици.



Слика 2.5 Врсте спојева код шавног заваривања

У споју (г) преклоп је веома мали $l = (1.5-2.5) \cdot s$, mm , тако да се заваривањем и пластичним деформисањем стране лимова готово доводе у исту равн. У споју (д), танке челичне фолије остају утиснуте у материјал тако да се добија сучеони спој са готово равним површинама. Попречно испупчење на споју (е), локализује загревање и притисак, што доприноси повећању брзине заваривања. Ако се параметри заваривања правилно изабере, јачина спојева типа (в) и (г) достиже или чак надмашује јачину основног материјала.

При заваривању делова од алуминијумских и бакарних лимова користе се само спојеви типа (а) и (б). Захтеви који се односе на чистоћу лимова су већи него за тачкасто заваривање. Да би се спречило попречно преклапање страница или њихово деформисање, потребно је припојима учврстити делове на растојању 70-150 mm . Већа растојања се узимају за дебље лимове. Ако конструкција споја омогућава, може се шавно заваривање извести и без припојних тачака али уз примену масивних тегова постављених на лимове.

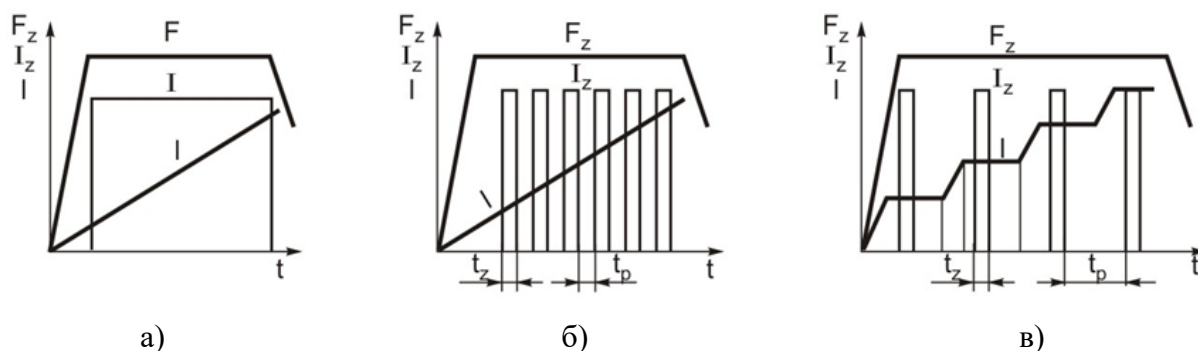
2.2.1.1 Техника и технологија шавног заваривања

Циклуси шавног заваривања

С обзиром на начин пропуштања струје и брзину обртања електрода постоје следећи циклуси шавног заваривања:

1. Континуално обртање електрода и континуално пропуштање струје (сл. 2.6а). Најпростији је програм са непрекидно укљученом струјом I_z и равномерним кретањем обртних електрода (дискова) брзином v_z , ($I = v_z \cdot t$). Овај циклус се користи за дебљине лимова до 1 mm при заваривању нискоугљеничних челика. Квалитет завареног споја је низак, долази до прегревања лимова и електрода услед чега им се скраћује век.
2. Континуално обртање електрода и испрекидано пуштање струје импулсима (сл. 2.26б). Овај циклус се највише користи за различите врсте челика за дебљине лимова до 3 mm . Загревање лимова и електрода знатно је мање па се електродама век продужава.

3. Испрекидано обртање електрода и испрекидано пропуштање струје импулсима (сл. 2.6в). Овај циклус се користи за заваривање алуминијумских и платираних лимова дебљине до 3 mm. Примењује се јача струја заваривања него код других циклуса.



Слика 2.6 Циклуси шавног заваривања

Карактеристични показатељи прекидног шавног заваривања јесу:

- време протока струје (t_z);
- време прекида (t_p);
- брзина заваривања (v_z);
- сила притиска на електроде (F_z);
- дужина шави;
- облик радне површине електроде, као и њена ширина и пречник (D).

Време прекида и брзина заваривања бирају се тако да се добије преклапање појединих тачака на 1/3-1/2 њихове дужине. Оријентационо се узимају јачина струје и сила притиска 1.5-2 пута веће него за тачкасто заваривање лимова исте дебљине.

Брзина заваривања, време заваривања и време прекида међусобно су повезани изразом:

$$v_z = \frac{a}{t_z + t_p}, m/s, \quad (2.3)$$

где је: a - растојање између средишта узастопних тачака у m .

Растојање или корак суседних тачака усваја се у зависности од дебљине (s , mm) лимова. За разне врсте нискоугљеничних и средње легираних челика узима се $a = (2.8-3.2) \cdot s$; за нерђајуће и ватропостојане челике $a = (2.4-2.8) \cdot s$ и за легуре алуминијума $a = (1.5-2.5) \cdot s$.

Оријентационо се и време заваривања усваја према врсти материјала и дебљини (s) у mm . Може се узети $t_z = (0.06-0.08) \cdot s$ за нискоугљеничне челике, $t_z = (0.08-0.1) \cdot s$ за аустенитне нерђајуће челике, $t_z = (0.1-0.14) \cdot s$ за нисколегиране конструкционе челике и за легуре алуминијума $t_z = (0.04-0.06) \cdot s$.

Време прекида усклађује се са временом заваривања: за нискоугљеничне, нерђајуће и ватросталне челике $t_p = (1.0-1.2) \cdot t_z$, за нисколегиране и закаљиве челике $t_p = (0.5-0.8) \cdot t_z$ и за легуре алуминијума $t_p = (1.5-2) \cdot t_z$.

Пречник електродног диска је обично $D = 150-200 mm$ за заваривање нискоугљеничних челика, а ширина радне површине диска износи од 4-12 mm у зависности од дебљине лимова. При заваривању легура алуминијума дебљине 2.5-3 mm , узима се већи диск ($D = 400 mm$) да би се боље хладила унутрашња површина диска и мање хабале његове радне површине.

Технологија шавног заваривања

Процесни параметри шавног заваривања могу се наћи у каталозима произвођача уређаја за заваривање (таб. 2.2), које претходно треба проверити на пробним узорцима. Нискоугљенични челични лимови и површински заштићени лимови користе се за израду херметичких резервоара или цеви поступком шавног заваривања.

Таблица 2.2 Параметри шавног заваривања нискоугљеничних челика

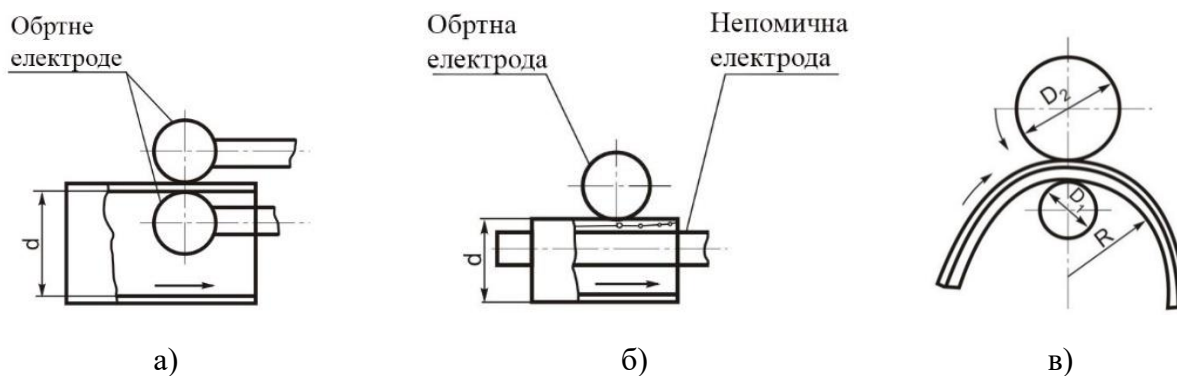
Материјал	Дебљина, s, mm	Ширина диска, b, mm	Сила притиска, F_z, kN	Време		Јачина струје, I_z, kA	Брзина заваривања, $v_z, m/s$
				t_z, s	t_p, s		
Хладноваљани челични лим	0.5	4.0	1.0-2.0	0.04	0.04	8-10	0.017-0.034
	1.0	5.0	3.0-5.0	0.08	0.12	12-15	0.017-0.025
	1.5	7.0	4.0-6.0	0.10	0.14	14-18	0.01-0.017
	2.0	9.0	5.0-7.0	0.14	0.16	16-20	0.008-0.010
	3.0	11.0	7.5-9.0	0.18	0.18	20-24	0.008-0.010

При уздужном заваривању цилиндричних судова (сл. 2.7а,б) долази до промене индукционог отпора секундарног кола у складу са померањем електрода ка средини суда. Варнице због прејакe струје може се смањити заваривањем цеви од крајева ка средини и аутоматским или ручним подешавањем јачине струје $I_z = f(L)$. Променом магнетне масе, унете у секундар машине за шавно заваривање, мења се јачина струје:

$$I_z = \frac{U''}{Z'} = \frac{U''}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2.4)$$

јер је индуктивни отпор $X = 2\pi fL$ сразмеран индуктивности L секундарног кола. У овом изразу U'' је напон секундарног кола, Z' - импеданса, R - омски отпор и f - фреквенција наизменичне струје (50 Hz).

При шавном заваривању настају деформације 3-10 пута веће него при тачкастом, што ствара тешкоће у производњи. Највише се деформишу нерђајући челици, јер имају релативно велико линеарно термичко ширење и малу термичку проводност, а најмање нискоугљенични челик. Легуре алуминијума су у том погледу негде у средини.

**Слика 2.7** Шавно заваривање цилиндричних судова

Препоручује се да се после шавног заваривања неких челика изведе накнадна термичка обрада због уједначавања структуре и отклањања унутрашњих заосталих напона. Деформације се могу свести на најмању меру оштрим режимом заваривања (јача струја/краће време), повећањем броја припојних тачака и извођењем дугих шавова од средине ка крајевима.

При шавном заваривању наизменичном струјом површински заштићених лимова (са Zn, Cr, Ni, Cd, Sn) разара се заштитни слој око шав. То се може спречити применом специјалних машина или заваривањем импулсном струјом (слика 2.6в).

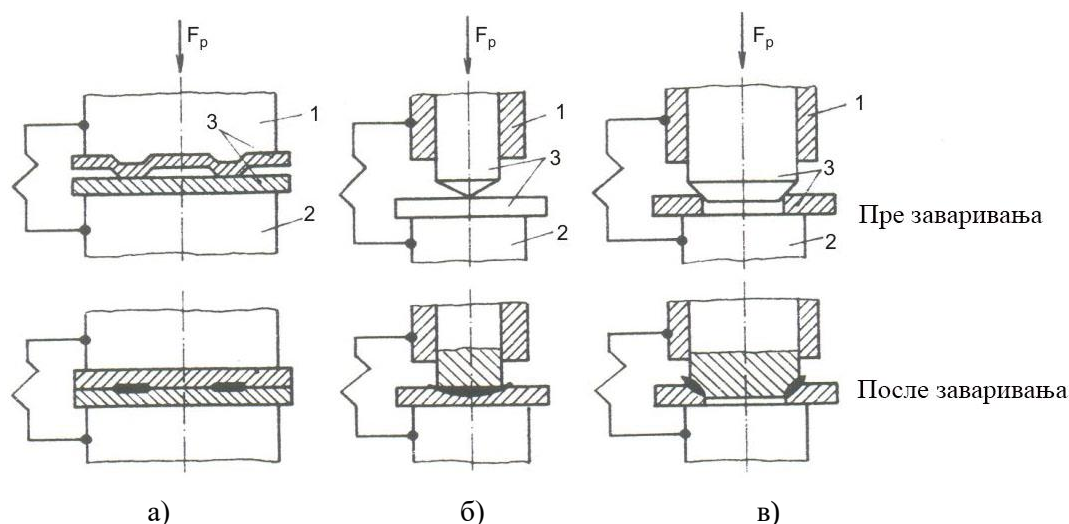
Шавно заваривање површински заштићених челичних лимова (поцинкованих, калајисаних) мора се изводити струјама велике јачине и дисковима са сферичним радним површинама уз интензивно хлађење дискова.

Кад се шавно заварују легуре алуминијума, потребно је чистити радне површине дискова после сваких 10-20 *m* изведеног шав. Такође се дискови могу и континуално чистити помоћу четки спрегнутих са радним површинама дискова.

Материјал за електродне дискове је исти као и за тачкасто заваривање, тј. дисперзионо ојачане легуре бакра (Cu-Cr-Zr). У већини случајева електроде се хладе текућом водом, мада је за лимове нискоугљеничних челика довољно и ваздушно хлађење, под условом да су дискови великог пречника.

2.2.2 Брадавичасто (пројекционо) заваривање

Релефно или пројекционо заваривање је поступак спајања делова на једном или више места, која су претходно одређена испупчењима израђеним на једном лиму. Она могу бити у облику брадавица (сл. 2.8а) или код масивних предмета у облику шиљака израђених машинском обрадом (сл. 2.8б,в). На овој слици бројеви 1 и 2 означавају електроде, а број 3 делове који се заварују.

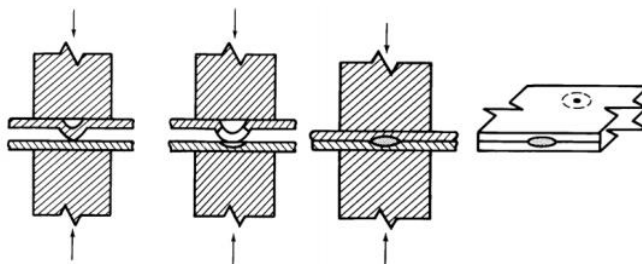


Слика 2.8 *Схема брадавичастог заваривања лимова (а) и цилиндрични делови (б, в)*

Брадавичасто заваривање се остварује на једној или неколико претходно специјално припремљених брадавица (испушта). На једном од лимова се претходно на преси, дубоким извлачењем, изведу брадавице. Лимови се притисну електродама које имају велику површину, јер са њом морају прекрити све брадавице. Када се пропусти струја она протиче на местима додира брадавица са другим лимом. Због контактеног отпора на том месту, развиће се довољна количина топлоте да створи истопљено језгро. Под притиском електрода

формира се заварени спој. Електроде се израђују од истог материјала као и код тачкастог заваривања, једино се облик и димензије прилагођавају захтевима.

Могуће је заваривати преклопне и сучеоне спојеве. Често се заварују предмети различитих дебљина. Брадавичастим заваривањем се у пракси спајају танки нискоугљенични челични лимови дебљине до 0,5-4 mm. Особине брадавичастог споја веома су сличне тачкасто завареном споју, те их не треба разматрати посебно.



Слика 2.9 Редослед брадавичастог заваривања

2.2.2.1 Параметри заваривања

Најважнији параметри код брадавичастог заваривања су:

- струја заваривања, I_z ,
- време заваривања, t_z и
- сила притиска електрода, F_e .

Струја заваривања је пропорционална површини заваривања. За челике треба да буде толика да њена густина износи 250-500 A/mm², за време заваривања 0,2 s.

Време заваривања се не бира према површини заваривања, већ према дебљини лимова и према количини доведене топлоте кроз њих. Што су лимови тањи и лошије одвођење топлоте време заваривања треба да буде краће. Уопштено, време заваривања се креће у границама од 0,05 s, за тање лимове, до 1,0 s за дебље.

Сила притиска се бира таква да се произведе притисак електрода на месту контакта од 70-100 МПа

Површине заваривања и површине на које налажу електроде, такође морају да буду чисте. Размак између појединих брадавица мора бити најмање 3-4 пречника брадавице. Све брадавице које се истовремено заварују морају бити прекривене електродама. Заваривани метал мора бити довољно јак да поднесе брадавице.

Алуминијум може бити ограничено завариван брадавичастим поступком, али захтева посебне геометрије брадавица. Најбољи резултати су добијени приликом извођења прстенастих брадавица. Међутим, чврстоћа већине алуминијумских легура је прениска да би омогућила опстанак брадавица под силама које примењује конвенционална опрема за пројекционо заваривање. Стога је неопходна пажљива контрола примењених сила заваривања. Сходно томе, ова техника се не користи много за алуминијум, углавном због превременог и брзог деформисања избочина који води до формирања непоузданих спојева.

Предности брадавичастог у односу на тачкасто заваривање се огледају у следећем:

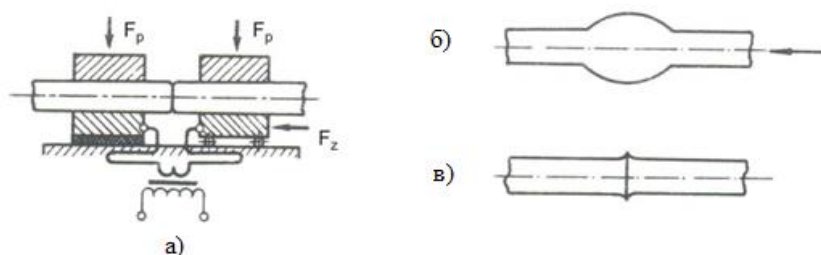
- мање трошење електрода,
- мање деформисање површине радних комада; не остаје отисак од електрода,
- димензија заварене тачке не зависи од величине електроде,
- број и облик спојева може да се мења,

- пролаз струје кроз суседне спојеве је мањи те брадавице могу да буду размештене са мањим кораком и ближе ивицама,
- продуктивност је већа,
- уколико површине завариваних лимова нису добро очишћене, одабирањем одговарајућих параметара може да се постигне још увек добар спој јер се заварује више тачака одједном.
- брадавичастим заваривањем се могу спајати и метали који су толико танки да се спој не може остварити тачкастим заваривањем;
- завари могу бити позиционирани прецизније у односу на тачкасто заваривање;
- уље, рђа, и друге облоге металних елемената мање ометају процес брадавичастиг заваривања.

Ако су брадавице природно формиране онда се поступак у стручној терминологији назива рељефним заваривањем. Овим поступком се пре свега заварују преклопни спојеви, Т спојеви, сучеони и крстасти делови, сворњаци, цеви за цевни зид и арматура за бетон. Рељефним заваривањем се могу заваривати делови различитих дебљина (однос дебљина до 1:6).

2.2.3 Сучеоно заваривање са електричним отпором

По овој методи, шипке се сучеоно спајају по целој додирној чеоној површини (сл. 2.10). У зависности од врсте метала, површине пресека завариваних делова и захтева у погледу јачине споја, разликују се сучеоно заваривање збијањем (сл. 2.10б) и заваривање варничењем (сл. 2.10в). Површина попречног пресека која се успешно може заварити износи од неколико mm^2 до $100.000 mm^2$.



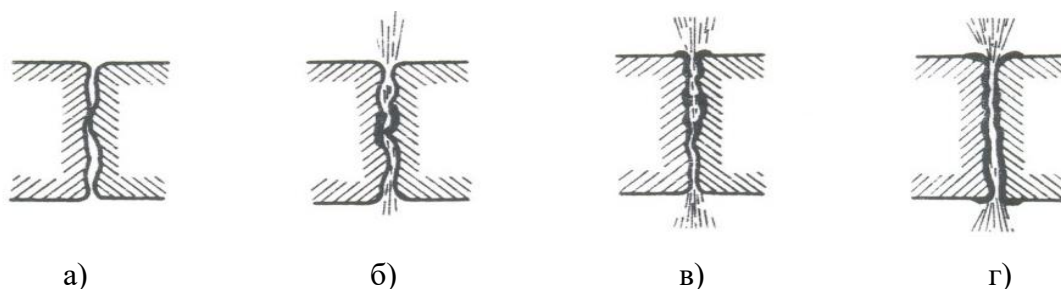
Слика 2.10 Схема сучеоног заваривања а) и облици спојева изведених збијањем б) и варничењем в)

2.2.4 Сучеоно заваривање збијањем

Радни предмети најпре се стежу у чељусти машине, па се малим аксијалним притиском доводе у непосредан додир. После тога укључује се струја тако да се у току кратког времена ослобађа топлота сразмерна омским отпорима у појединим деловима секундарног кола. Највећи је отпор на месту сучељавања радних предмета, те се материјал око контактне зоне загрева до светло белог усијања (за нискоугљенични челик). У том стању челик постаје веома пластичан, прелази у тзв. тестасто стање, тако да се искључивањем струје и увођењем додатне силе притиска добија спој облика према слици 2.10б. За овај поступак неопходна је брижљива припрема чеоних површина обе шипке. Ако је загревање неравномерно или ако су сучељне површине оксидисане смањује се јачина споја, нарочито ако су радни предмети великих пресека. Из тог разлога се сучеоно заваривање збијањем препоручује за цилиндричне шипке пречника до $30 mm$.

2.2.5 Сучеоно заваривање варничењем

Сучеоно заваривање непрекидним варничењем одвија се у две фазе: прва је варничење а друга збијање. Радни предмети се најпре учвршћују у чељустима машине, затим се укључује струја и они се полако међусобно приближавају. Чеоне површине радних предмета у почетку се додирују у једној или више тачака (слика 2.11а), зависно од храпавости додирних површина. Због велике густине струје, у малом броју додирних тачака формирају се мостићи течног метала, који се готово тренутно загревају до температуре испаравања (слика 2.11). Деловањем притиска металних пара и магнетног поља избацују се сагореле и делимично истопљене честице ван зоне споја, што се испољава варничењем (слика 2.11б,в,г). Притисак металних пара спречава продирање кисеоника из ваздуха у растопљени метал, што показује повољан утицај на механичке особине споја.



Слика 2.11 Шема додира делова (а), образовања мостића (б, в) и варничења (г)

Брзина приближавања делова мора бити равномерна и тако одабрана да не наступи претерано варничење, а ни прекид варничења због мале брзине. При изради алата за обраду резањем, нпр. бургија, доста се примењује заваривање варничењем.

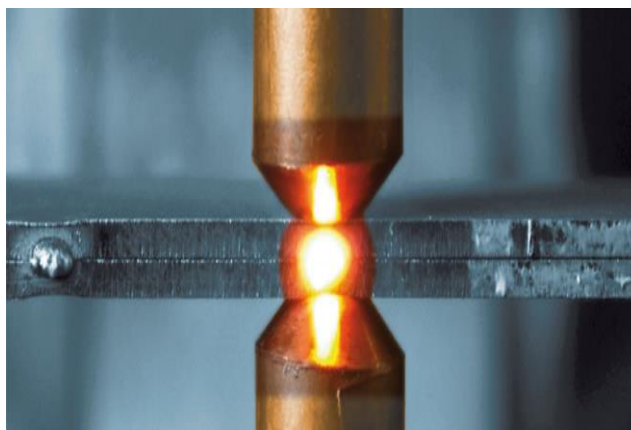
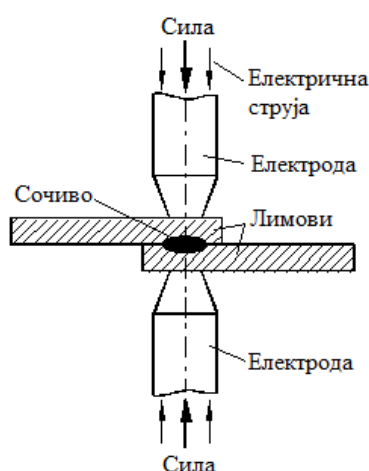
Сучеоно заваривање варничењем са предгревањем разликује се од непрекидног варничења по томе што се делови, стегнути у чељустима машине, пре почетка варничења загревају вишеструким међусобним додиривањем и раздвајањем. У тим моментима настаје прекидно варничење, а радни предмети се незнатно скраћују због избочавања контактне зоне. Време сучељавања делова, тј. време варничења износи (0.5-3) s, време прекида између узастопног варничења (2-6) s. Број кратких спојева може износити 5-30 у зависности од величине пресека завариваних делова. При заваривању варничењем после предгревања, брзина хлађења завареног споја се смањује па се добија веома жилав шав, чак и при заваривању закаљивих челика. Није потребна посебна припрема површина, већ је довољно само одстранити боју или грубе љуспе (рђу), односно нечистоћу.

Сучеоним електроотпорским заваривањем могу се спајати штапови, дебљи лимови и траке, цеви као и делови алата.

3. ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ

Електроотпорско тачкасто заваривање има највећу примену при изради шкољки аутомобила, кабина камиона и других лимених производа. Поступак се сврстава у термомеханичке методе заваривања, јер се чврст спој између преклопљених делова остварује комбинованим дејством топлоте и силе притиска (сл. 3.1).

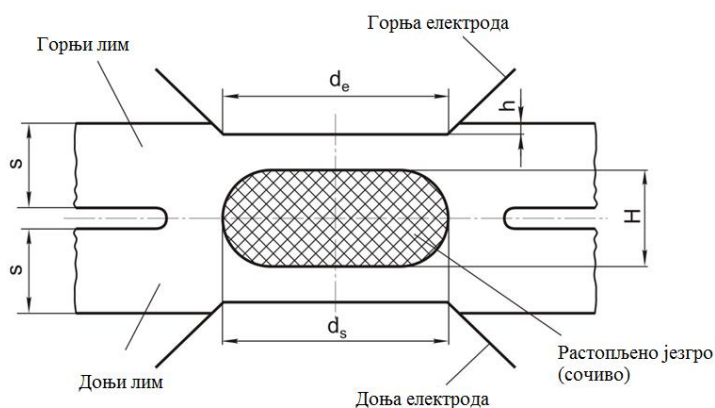
Електроотпорско тачкасто заваривање је поступак спајања метала комбинованим дејством топлоте, добијене електричним отпором у затвореном струјном колу између два лима притиснута електродама цилиндричног облика и силе притиска. Мада се највише израђују спојеви од два лима, могуће су и комбинације са више лимова. У сваком случају кроз делове се пропушта електрична струја велике јачине, напона ($U < 10 \text{ V}$), у току веома кратког времена ($t = 0.06\text{--}3 \text{ s}$). Када се струја искључи, "формирање сочива" - растопљеног језгра, се завршава под још укљученом силом притиска.



Слика 3.1 Схема тачкастог заваривања

Физичко спајање преклопљених лимова остварује се преко заједничког ливеног језгра - сочива (сл. 3.1) које настаје на месту где су се локално загрејани лимови притиснути електродама највише приближили.

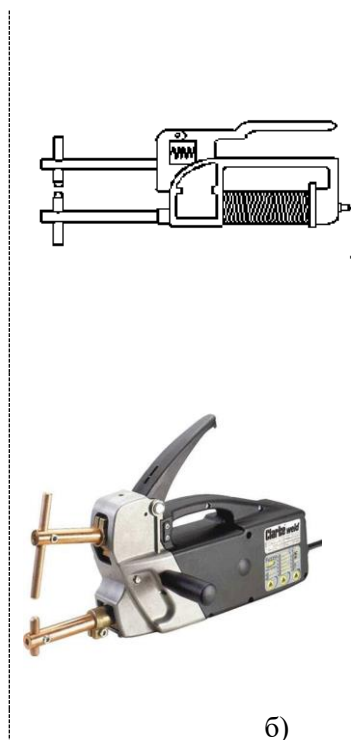
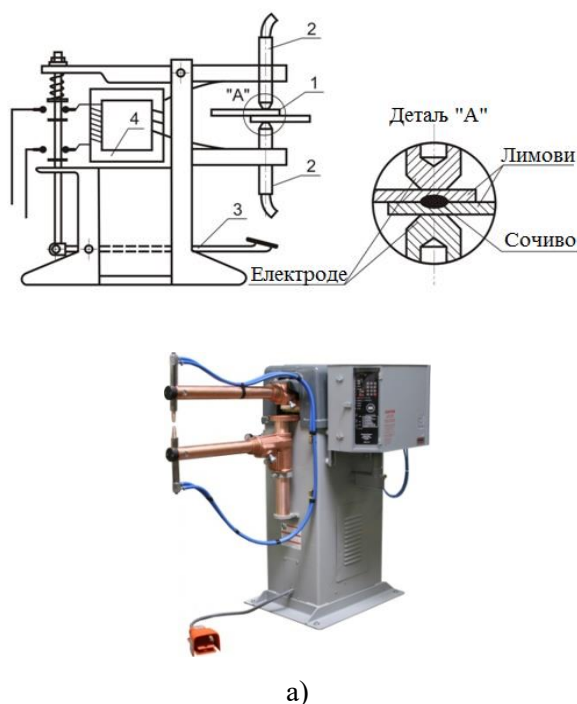
Основни елементи тачкасто завареног споја приказани су на слици 3.2, где је: d_e - пречник врха електроде, d_s - пречник сочива, s - дебелина лима, h - улегнуће после заваривања (настало деловањем силе притиска на омекшане лимове) и H - висина сочива.



Слика 3.2 Схема тачкасто завареног споја

3.1 УРЕЂАЈИ ЗА ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ

Апарати за тачкасто заваривање могу бити стационарни и покретни. Машине за тачкасто заваривање разликују се према врсти струје за заваривање и по броју спојева које могу истовремено заварити. Могу се, такође, поделити и на основу путање електроде и та подела је на: лучне (електрода при кретању описује лук) и притисне (електрода се креће вертикално). Машине за тачкасто заваривање обухватају 70% укупне примене машина за електроотпорско заваривање.



Слика 3.3 Схеме и слике стационарног а) и покретног апарата б) за тачкасто заваривање

Уређаји за тачкасто заваривање, стабилне машине или заваривачка клешта, састоје се из енергетског блока и система за отварање-затварање електрода и довођење силе притиска по одређеном програму.

Електроде на бази бакра (са додацима легирајућих елемената – Cr и Zr), имају сасвим другачију улогу него електроде за заваривање топлеем; основни задатак ових електрода је да затворе струјно коло и да преносе силу притиска на место предодређено за спајање лимова (слика 3.3, детаљ "А"). На овој слици приказана је најједноставнија машина за тачкасто заваривање, где (1) означава место спајања лимова, (2) електроде, (3) папучу за механичко увођење силе притиска на електроде и (4) трансформатор. Савремене машине за тачкасто заваривање се састоје из *механичког система, електричног кола и опреме за управљање*.

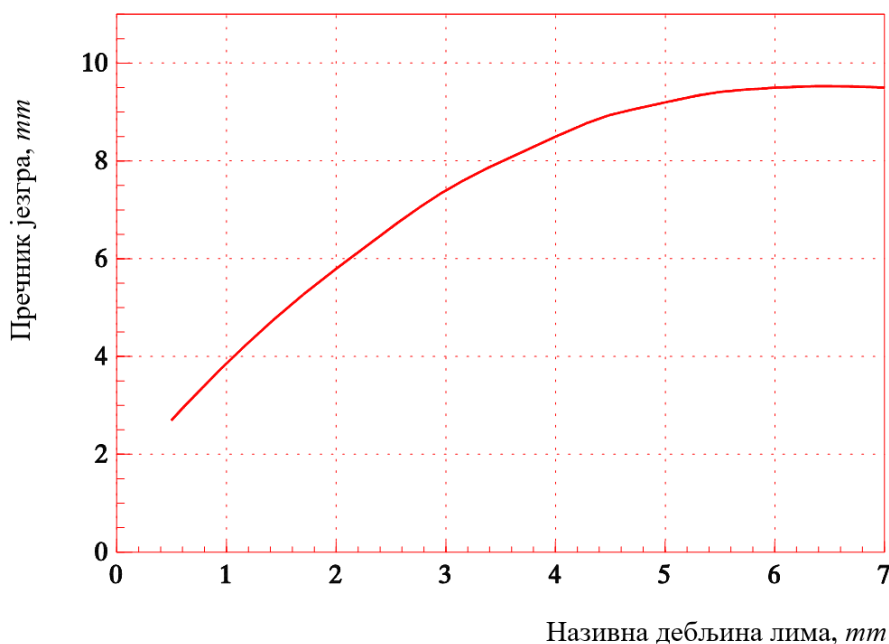
Механички систем чине кућиште машине, уређаји за придржавање радних делова и механизма којим се остварује и преноси притисак на електроде. Најважнију улогу у електричном колу има трансформатор који се напаја струјом из мреже напона 220 или 380 V, а на секундару даје напон 0.5 - 10 V и струју јачине неколико хиљада ампера. У секундарно коло укључене су електроде које доводе струју и силу притиска на место споја. Опрема за управљање (раније игнитронска а данас тиристорска) има задатак да по одређеном програму укључује и регулише протицање струје у секундарном намотају трансформатора, односно кроз електроде.

3.2 ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЈА ТАЧКАСТОГ ЗАВАРИВАЊА

3.2.1 Параметри тачкастог заваривања

На квалитет тачкасто заварених спојева највише утичу јачина струје заваривања I_z , сила притиска F_z , време заваривања t_z , пречник врха електрода d_e , време држања електрода и време одржавања силе притиска на електродама. Осим наведених параметара, при тачкастом заваривању треба водити рачуна о карактеристикама основног материјала, захтевима за спољни изглед заварених спојева, потребној класи квалитета споја, квалитету опреме и уређаја за заваривање и њиховој контроли.

Основни параметри тачкастог заваривања (јачина струје- I_z , сила притиска- F_z , време заваривања- t_z и пречник врха електроде- d_e) бирају се тако да пречник растопљеног језгра (сочива) одговара приближно пречнику врха електроде односно подацима из таблице 3.1. Зависност пречника језгра од еквивалентне дебљине завариваних делова приказана је на слици 3.4.



Слика 3.4 Зависност минималног пречника језгра од дебљине лима

Ови параметри се углавном унапред подешавају помоћу команди на машини за заваривање електричним отпором. При избору ових параметара полази се од пречника врха електроде и силе притиска. Пречник електроде одређује се емпиријским изразима који су проистекли из услова да се постигне највећа смицајна јачина тачкасто завареног споја.

Радни пречник електроде зависи од врсте и дебљине (s) лимова:

- за нискоугљеничне челике узима се $d_e = 5\sqrt{s}$,
- за високолегиране челике узима се $d_e = 4\sqrt{s}$ и
- за алуминијум $d_e = 10\sqrt{s}$.

Пречник врха електроде (d_e) је у mm, а дебљина лимова (s) у mm. Као критеријум постојаности електрода усваја се број тачака до проширења пречника врха електроде за 20%. Прекорачењем те вредности, неопходно је поновно преоштравање врха електроде на почетну

меру, јер се увећаним пречником добијају спојеви лошијег квалитета. Код електрода за заваривање Al и његових легура критеријум постојаности јесте запрљаност врха електроде.

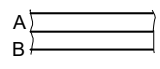
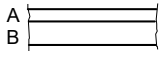
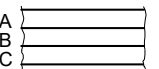
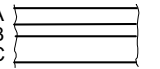
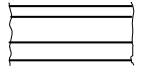
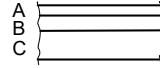
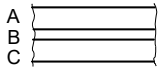
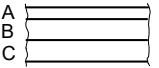
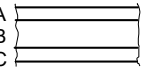
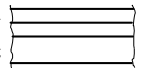
Таблица 3.1 Избор пречника језгра тачке за различите материјале и дебљине

Челици са садржајем C ≤ 0.2%*		Лаке легуре	
Еквивалентна дебљина лимова s, mm	Пречник језгра, mm	Еквивалентна дебљина лимова s, mm	Пречник језгра, mm
$s \leq 1$	$4 \cdot \sqrt{s}$	$s \leq 3$	$4 \cdot \sqrt{s}$
$1 < s \leq 3.5$	$5 \cdot \sqrt{s}$	$s > 3$	$5 \cdot \sqrt{s}$
$3.5 < s \leq 5$	$5.5 \cdot \sqrt{s}$	-	-
$s > 5$	$6 \cdot \sqrt{s}$	-	-

*За челике са садржајем C > 0.2% морају се применити посебна, пројектна и технолошка упутства.

Пречник врха електроде за случај тачкастог заваривања два или три лима једнаких или различитих дебљина, одређује се на основу тзв. еквивалентне дебљине лима, према табlici 3.2. Када се заједно заварују три лима, захтеви за отпорност на смицање и величину језгра (сочива) прописују се посебно за сваки пар лимова.

Таблица 3.2 Одређивање еквивалентне дебљине за заваривање 2 или 3 лима

 $A = B$ Еквивалентна дебљина лима = A	 $A < B$ Еквивалентна дебљина лима = A $\max \frac{A}{B} = \frac{1}{4}$	 $A = B = C$ Еквивалентна дебљина лима = A	 $C > A > B$ Еквивалентна дебљина лима = A $\max \frac{A}{C} = \frac{1}{2.5}$	 $B > C > A$ Еквивалентна дебљина лима = C $\max \frac{A}{C} = \frac{1}{2.5}$
 $C > B > A$ Еквивалентна дебљина лима = B $\max \frac{A}{C} = \frac{1}{2.5}$	 $A = C > B$ Еквивалентна дебљина лима = A	 $B = C > A$ Еквивалентна дебљина лима = B $\max \frac{A}{C} = \frac{1}{2.5}$	 $A = C < B$ Еквивалентна дебљина лима = A	 $A = B < C$ Еквивалентна дебљина лима = A $\max \frac{A}{C} = \frac{1}{2.6}$

Сила притиска се може одредити на више начина. Оријентационо она износи:

- $F_z = 5 \cdot s$ за нискоугљеничне челичне лимове,
- $F_z = 6.5 \cdot s$ за високолегиране челичне лимове и
- $F_z = 1.2 \cdot s$ за алуминијумски лим.

Дебљина лима (s) је у mm, а сила (F_z) у kN.

Параметри заваривања (I_z , t_z , F_z) одређују се на основу тзв. еквивалентне дебљине лима, нпр. $I_z = 6500 \cdot s$, A; $t_z = (0.16 \div 0.36) \cdot s$ (s) и $F_z = p \cdot d_e^2 \times \pi / 4$ - за нискоугљеничне челике дебљине

$s = 1 \div 3 \text{ mm}$ и $p = 49 \div 118 \text{ MPa}$, или усвајају из одговарајућих препорука што је у пракси чешћи случај. После контроле оствареног споја бира се одговарајући режим заваривања.

У таблицама 3.3, 3.4 и 3.5 дате су препоручене вредности за избор параметара тачкастог заваривања за нискоугљеничне челике ($C < 0.25\%$), нерђајуће челике и за тачкасто заваривање лаких легура (алуминијума).

Таблица 3.3 Параметри тачкастог заваривања нискоугљеничних челика

s	d _e	Заваривање - класа А ("оштар" режим)				Заваривање - класа Б ("средњи" режим)				Заваривање - класа В ("благ" режим)			
		t _z	F _z	I _z	F _r **	t _z	F _z	I _z	F _r	t _z	F _z	I _z	F _r
mm	mm	per*	kN	kA	kN	per	kN	kA	kN	per	kN	kA	kN
0.5	4.5	6	1.35	6.1	2.5	9	0.90	5.2	2.25	20	0.43	3.9	1.8
0.6	4.5	6	1.55	6.8	3.15	10	1.05	5.7	2.5	22	0.50	4.3	2.5
0.7	4.5	7	1.7	7.5	3.7	12	1.10	6.2	3.4	24	0.58	4.6	3.2
0.8	5.5	8	1.9	8.1	4.5	14	1.25	6.6	4.3	27	0.63	4.9	3.6
0.9	5.5	9	2.1	8.7	5.2	15	1.40	7.0	5.0	30	0.72	5.2	4.5
1.0	5.5	10	2.3	9.3	6.0	17	1.55	7.1	5.65	32	0.81	5.5	5.4
1.2	6.2	11	2.8	10.3	7.5	20	1.80	8.0	7.2	35	0.90	6.0	6.3
1.5	6.2	14	3.5	11.5	10.0	25	2.20	9.0	9.5	40	1.11	6.7	9.3
1.8	6.2	16	4.2	12.8	13.0	29	2.65	9.8	12.2	45	1.35	7.4	11.8
2.0	7.0	18	4.8	13.5	15.5	34	3.00	10.3	14.0	48	1.55	7.8	13.5
2.5	7.0	21	6.1	15	21.0	40	3.70	11.5	19.0	56	1.80	9.0	18.0
3.0	7.0	21	7.7	16.6	28.0	48	4.70	12.7	25.5	63	2.30	9.7	23.5

* - време заваривања изражава се у $\text{per} = 1/50 \text{ Hz} = 0.02 \text{ s}$

** - минимална сила разарања коју заварени спој мора да издржи при смицању

Таблица 3.4 Параметри тачкастог заваривања нерђајућег челика

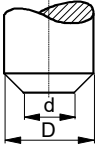
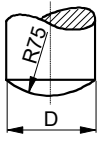
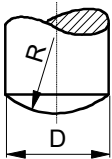
Дебљина лима s	Пречник и облик електроде		Сила на електроди F _z	Време заваривања t _z	Јачина струје I _z
					
mm	D, mm	d, mm	kN	per	kA
0.5	12.5	4	1.8	4	4
0.8	12.5	4.5	3.0	5	6
1.0	16	5	4.0	7	7.6
1.5	16	6	6.5	10	11
2.0	16	7	9.0	12	14
2.5	16	7.5	12.0	15	16
3.0	25	8.5	15.0	18	18

Таблица 3.5 Параметри тачкастог заваривања лаких легура (алуминијума)

Дебљина лима s	Пречник и облик електроде		Сила на електродама F _z	Време заваривања t _z	Јачина струје I _z
					
mm	D, mm	R, mm	kN	per	kA
0.5	16	50	1.8	5	18
0.8	16	50	2.3	6	25
1.0	16	75	2.7	7	30
1.5	16	75	3.4	9	35
2.0	25	100	3.9	10	41
2.5	25	100	5.0	12	50
3.0	25	100	6.0	12	60

Остали параметри, јачина струје (I_z) и време заваривања (t_z), директно утичу на количину ослобођене топлоте на месту споја, а тиме и на димензије сочива. Струја заваривања протиче кроз секундарно струјно коло које сачињавају секундар трансформатора, еластичне траке које повезују секундар са конзолним носачима електрода, електроде и радни предмети.

Количина топлоте која се ослобађа у појединим деловима секундарног кола сразмерна је отпорима у тим деловима (сл. 3.5) јер су јачина струје и време, по природи ствари, константне величине у целом струјном колу.

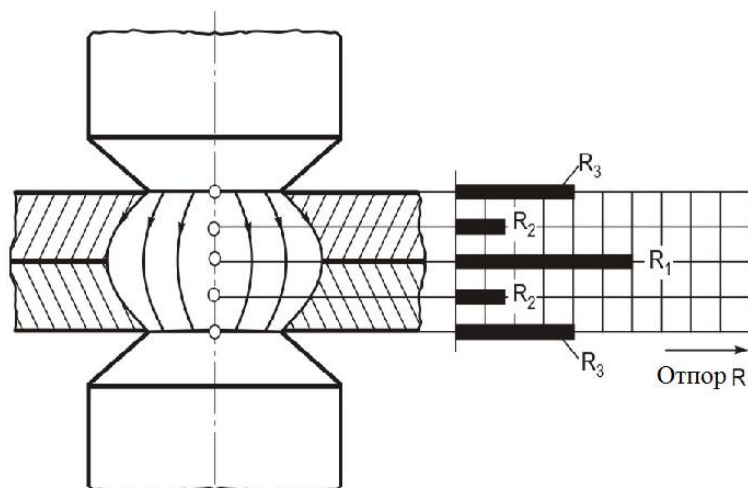
Количина топлоте која се ослобађа у појединим деловима струјног кола, може се израчунати према Џуловом закону:

$$Q = \int_0^t R \cdot I_z^2 \cdot dt, J \quad (3.1)$$

где је: Q - количина топлоте у J или Ws ; R - електрични отпор у Ω ; I_z - јачина струје у A и t - време заваривања у s или периодама (per).

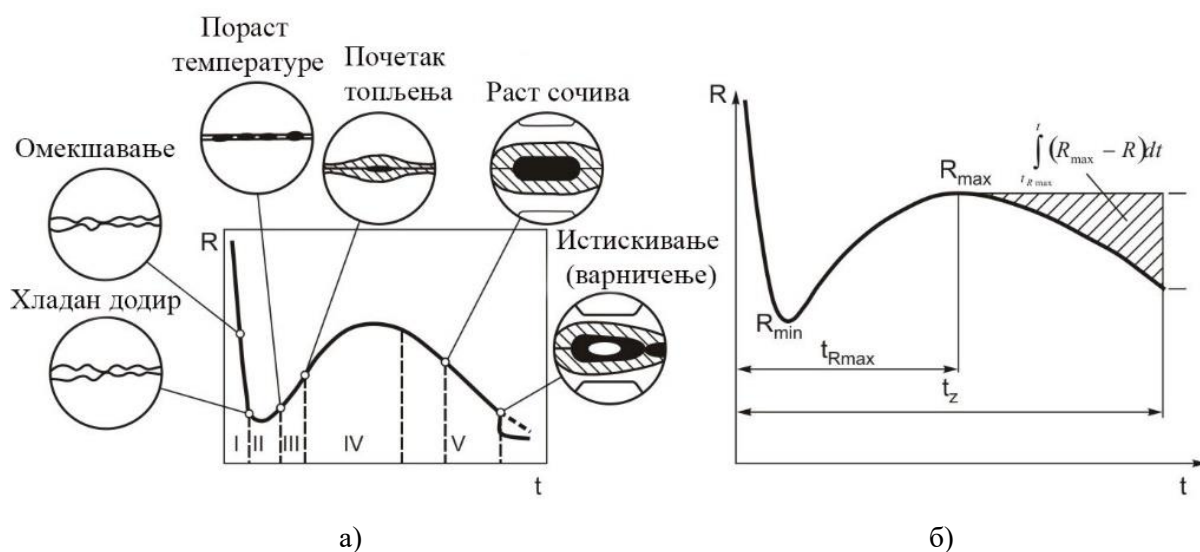
Део ослобођене топлоте губи се провођењем, конвекцијом и зрачењем, а корисна количина топлоте за делимично топљење материјала у зони спајања и омекшавање основног материјала око те зоне.

Да би се разумео процес образовања сочива потребно је рашчланити укупни електрични отпор између електрода (R) на његове компоненте (сл. 3.5). То су сопствени отпори лимова (R_2), контактни отпор на месту додира лимова (R_1) и контактни отпори на местима налегања електрода на горњи и доњи лим (R_3). На овој слици приказана је и густина електричне струје између електрода (бело поље) и хистограмски приказ почетних компонената укупног отпора између електрода $R = R_1 + 2R_2 + 2R_3$.



Слика 3.5 Омски отпори при успостављању струјног кола

Укупан електрични отпор између електрода (R) мења се са порастом температуре односно у току времена заваривања према дијаграму на слици 3.6. У почетку делују сви наведени отпори (R_1 , R_2 , R_3), а после извесног времена преостаје само отпор лимова R_2 , будући да контактни отпори R_1 и R_3 постају једнаки нули кад дође до потпуног међусобног налегања лимова, односно лимова и електрода. Пре потпуног налегања контакт се остваривао само у појединим тачкама због површинске храпавости лимова и радних површина електрода. Промена електричног отпора у току времена заваривања назива се динамички отпор и за случај нискоугљеничних челичних лимова приказан је на слици 3.6.



Слика 3.6 Динамички отпор између електрода

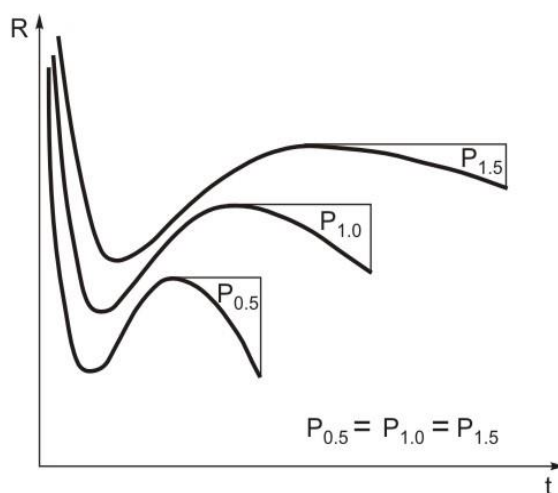
Динамички отпор се данас углавном користи као параметар за аутоматско управљање процесима тачкастог заваривања како на стабилним машинама тако и на заваривачким клештима. Стање додирних површина лимова од почетка контакта па до краја процеса приказано је круговима на слици 3.6а, а у физичком смислу, то стање одговара кривој линији динамичког отпора $R = R(t)$.

Експериментално је доказано да од тренутка постизања $R_{\max}$ (сл. 3.6б) почиње образовање завареног сочива, а да шрафирана површина иза $R_{\max}$ има приближно исту вредност за све успешно изведене заварене тачке, независно од дебљине лимова. Као доказ

томе, на слици 3.7 приказане су експериментално добијене криве линије динамичког отпора за лимове дебљине 0.5; 1.0 и 1.5 mm и површине $P_{0.5}$, $P_{1.0}$ и $P_{1.5}$ које одговарају тим лимовима.

Непрекидним интеграљењем површина $\int_0^t (R_{\max} - R)dt$, добија се површина P за успешно

заварену тачку. Стога се површина P може искористити као параметар за мониторовање процесима тачкастог заваривања нискоугљеничних челичних лимова на заваривачким клештима и индустријским роботима. Ако би се продужило време заваривања и после достизања оптималне површине P настало би велико варничење што погоршава квалитет споја и нарушава његов спољашњи изглед.



Слика 3.7 Промена $R(t)$ за различите дебљине лимова

Други параметар за аутоматско управљање тачкастог заваривања на стабилним апаратима може бити термичка експанзија сочива у фази његовог формирања. Контактни електрични отпори R_1 и R_2 који дејствују само у првој фази загревања (сл. 3.5), а често се називају и прелазни отпори. Сопствени отпор лимова R_2 у хладном стању зависи од врсте и дебљине лима, а контактни отпори R_1 и R_3 зависе и од стања додирних површина. Са гледишта заваривања најзначајнији је контактни отпор R_1 , јер на додиру лимова почиње процес загревања тј. раст сочива. Зависност отпора R_1 од стања површине лимова може се показати на примеру нискоугљеничног челичног лима; брушене површине имају почетни отпор

$R_1 \approx 100 \mu\Omega$, док се код оксидисаних површина креће $R_1 \approx 500 \Omega$. На запрљаним површинама претерано је велики контактни отпор, што сходно Омовом закону ($I = U/R$) даје струју мале јачине и недовољну количину ослобођене топлоте за правилно одвијање процеса тачкастог заваривања.

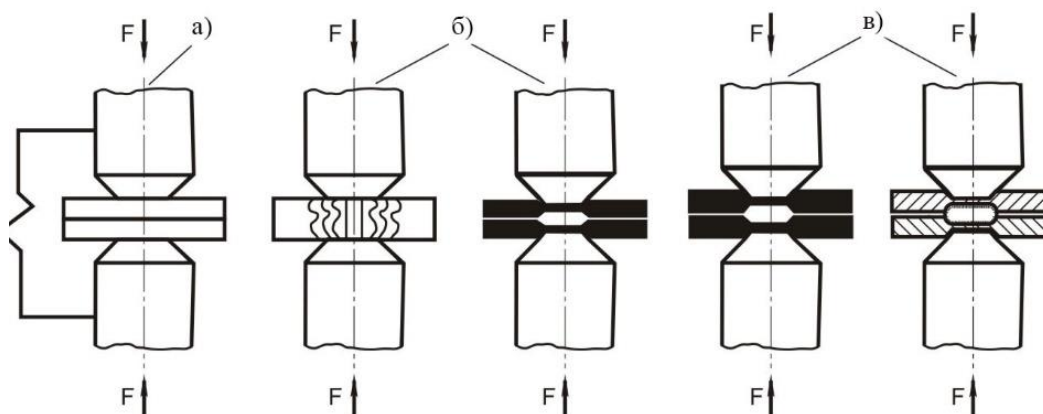
Контактни отпор између лимова R_1 зависи и од силе притиска на електродама; ако тај притисак расте, контактни отпор се смањује због међусобног налегања лимова.

Из анализе отпора R_1 , R_2 и R_3 установљено је да је у почетној фази заваривања највећи отпор R_1 (сл. 3.5) те се највећа количина топлоте ослобађа на додирним тачкама лимова. С друге стране, термичка проводност челика је за око 8 пута мања него бакра, па се топлота много спорије одводи из зоне додира лимова него из зона налегања електрода на лимове. Ова два фактора – највећа количина ослобођене топлоте на контакту лимова и најспорије

хлађење – стварају услове да се ту најпре достигне температура топљења и да се између лимова образује сочиво.

Циклус тачкастог заваривања може се рашчланити на три фазе (сл. 3.8а,б,в):

- 1) Притискивање лимова између електрода,
- 2) Укључивање струје и загревање контактне зоне до температуре при којој почиње делимично топљење на додирним тачкама лимова и почетак формирања ливеног језгра и
- 3) Искључивања струје и хлађења језгра уз деловање силе притиска.

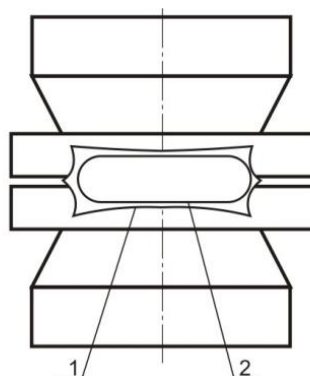


Слика 3.8 Фазе тачкастог заваривања (F - сила притиска)

Као што је већ споменуто, цео циклус се може одвијати аутоматски према претходно уведеним параметрима који се бирају зависно од врсте и дебљине лимова. Оптималне параметре и оптималан циклус заваривања врло је тешко одредити. Због тога треба након избора параметара заваривања и након избора циклуса заваривања експериментално потврдити претпостављене услове заваривања.

3.2.2 Режи́ми тачкастог заваривања

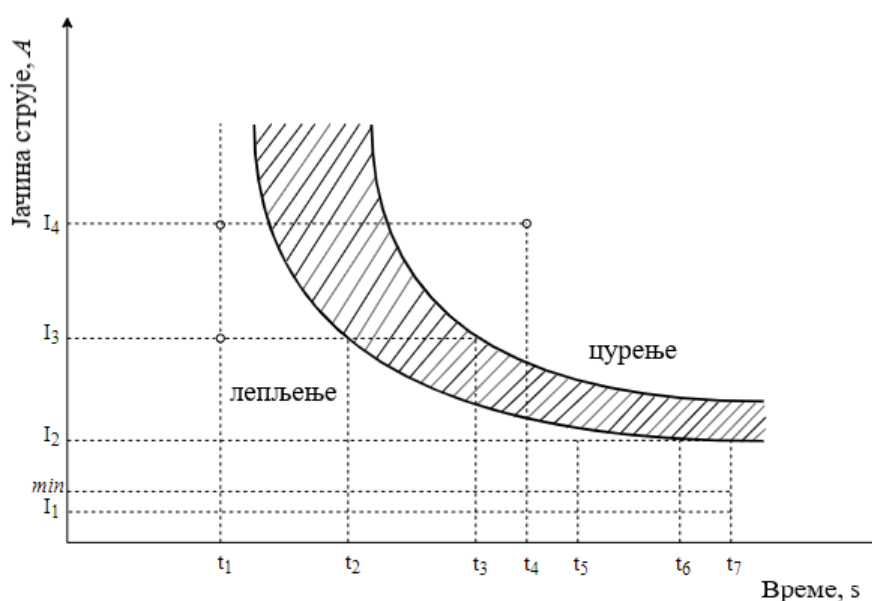
После избора циклуса заваривања, потребно је одабрати и режим заваривања. Под режимом заваривања се подразумевају одређене вредности основних параметара (I_z , t_z , F_z), укључујући облик и димензије електрода, којима је могуће извести заварене спојеве потребних димензија и квалитета. Режи́ми тачкастог заваривања могу се условно поделити на "оштре" и "меке". Оштри се одликују великом јачином струје и кратким временом, док је за меке режиме јачина струје мања, време дуже а попречни пресек сочива готово елиптичан (сл. 3.9). Општа је тенденција на заваривању "оштријим" режимима јер се добија боља продуктивност, мање деформације и мањи утрошак енергије.



Слика 3.9 Облик сочива при заваривању оштрим (1) и меким (2) режимом

У практичним условима, режими заваривања могу се одредити рачунски, рачунски-опитно и на пробним узорцима. Без обзира на који је начин одређен, режим заваривања се мора експериментално проверити на спојевима који се испитују разарањем и металографским методама. При томе, оптималан режим представља такав скуп основних параметара који дају пречник сочива близак пречнику врха електроде, уз најмање површинско оштећење лимова због утискивања електрода у лимове.

За унос топлоте потребно је деловати на два параметра, јачину струје и време. Превелика јачина струје може довести до варничења те „изгарања“ радног комада. С друге стране, недовољно висока јачина струје доводи до слабог топлјења и недостатка завара. Код тачкастог заваривања, за одређене комбинације карактеристика материјала, његове дебљине, геометрије електрода те силе притиска постоје дијаграми где је означено подручје заваривања. Свако одступање изван осенчаног подручја резултира неквалитетним заваром, односном лепљењем или цурењем. На слици 3.10 приказан је један такав дијаграм.



Слика 3.10 Дијаграм зависности јачине струје од времена заваривања код тачкастог заваривања

Из дијаграма се види, на пример, да за јачину струје мању од минималне, заваривање није могуће нити за бесконачно велико време. Заваривани делови ће се загрејати, и остварена топлота на месту заваривања се постепено расипа и постигнута температура је мања од температуре потребне за сједињавање. За струју већу од минималне сједињавање се постиже тек повећањем времена од t_5 до t_7 , док за јачину струје $I_3 > I_2$ сједињавање почиње после времена t_2 које је мање од t_5 . За јачину струје I_4 и време заваривања t_4 , заваривање је предуго и долази до прекомерног ослобађања топлоте на месту заваривања, што доводи до појаве изливања растопљеног метала. Изливање изазива и прекомерна јачина струје, када долази и до изгарања тачкастог споја и прекомерног трошења (хабања) врхова електрода.

За јачину струје нешто већу од минималне, време заваривања мора бити врло дуго - споро заваривање, док је за јачину струје много већу од минималне потребно кратко време заваривања - брзо заваривање.

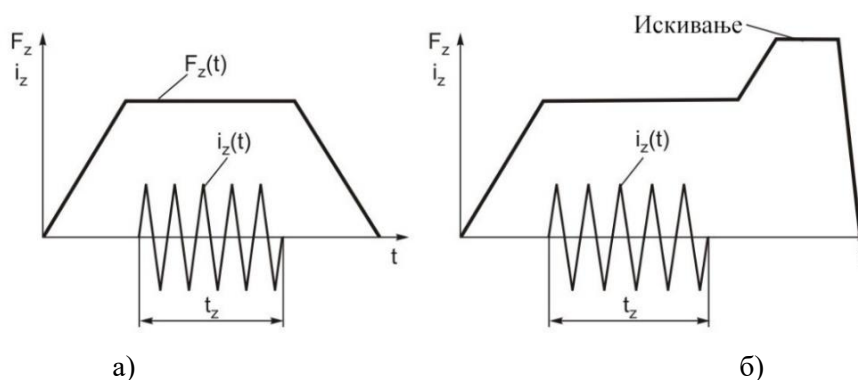
Кратак режим заваривања повољно утиче на век трајања електрода. Захваљујући брзини заваривања, само подручје заваривања (пресудан утицај контактнотог отпора између завариваних делова) за кратко време достиже високу температуру и спој се формира пре него површина делова у контакту достигну високу температуру.

При спором заваривању долази до непотребног загревања материјалне запремине далеко веће од потребне за правилно формирање завареног споја. При овом заваривању губици топлоте су велики, електроде остављају дубоке отиске.

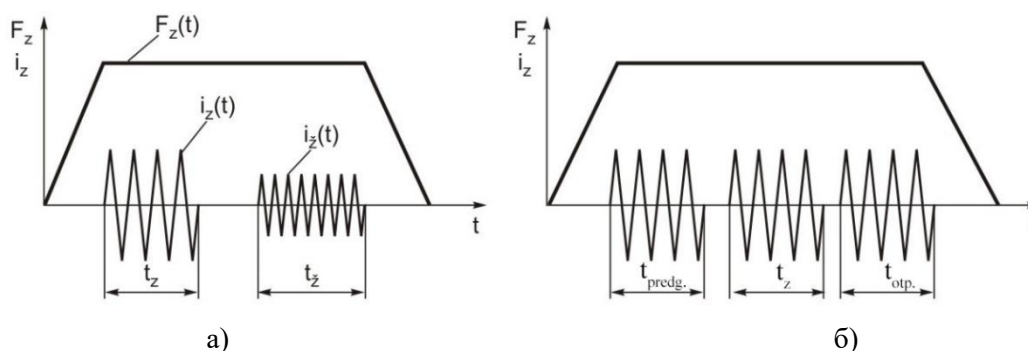
Према томе треба, тежити што краћем времену заваривања. Брзо заваривање намеће се као неизбежно и једино могуће у случају заваривања делова велике топлотне и електричне проводљивости (бакар, алуминијум и слични метали и легуре), као и заваривање делова специјалног облика, где се захтева локализација топлоте у уској зони.

Из Џуловог закона произлази да јачина струје и време заваривања директно утичу на количину ослобођене топлоте. Дејство силе притиска у енергетском погледу испољава се једино у првој фази загревања, јер само дотле ова сила утиче на прелазне отпоре R_1 и R_3 . Тиме не престаје и корисно деловање силе притиска, будући да она ствара и одржава заштитни прстен створен пластичним деформисањем горњег и доњег лима око ливеног језгра; тај прстен спречава прштање ужарених металних честица из језгра. Исто тако, сила притиска има позитивно дејство и у фази хлађења сочива, у тзв. фази искивања. Ако се заварују плоче дебље од 6 mm, потребно је посебним програмом повећати силу у фази искивања, тиме се решавају неки специфични технолошки проблеми који могу довести до појаве шупљина у сочиву. Накнадно дејство повећане силе притиска зове се искивање (сл. 3.11). Примери основних циклуса тачкастог заваривања без додатне силе искивања (а) и са додатном силом искивања (б) дати су на слици 3.11.

Код неких челика неопходно је, после искључивања струје и одређене паузе, укључити струју жарења (i_z) која делује за време t_z (сл. 3.12а). Тачкасто (и рељефно) заваривање лимова дебљих од 3 mm често се изводи периодичним искључивањем и укључивањем струје, тј. импулсним заваривањем (сл. 3.12б), које укључује предгревање, заваривање и отпуштање.



Слика 3.11 Основни циклуси тачкастог заваривања: а) без искивања и б) са искивањем



Слика 3.12 Сложени циклуси тачкастог заваривања

Машине за тачкасто заваривање омогућавају да се у широком опсегу подешавају јачина струје, време и сила притиска. Вредности ових параметара бирају се према врсти и дебљини основног материјала. Ако се одређени материјал може успешно тачкасто заварити у широком дијапазону процесних параметара, онда се сматра добро заварљивим.

На заварљивост металних лимова и плоча електричним отпором утичу:

- топлотна и електрична проводљивост,
- својства отпорности на повишеним температурама,
- температура топљења и
- коефицијент линеарног термичког ширења.

Најчешће се електричним отпором заварују угљенични и нисколегирани челици, као и челици отпорни на корозију и ватропостојани челици. Основни параметри тачкастог заваривања нискоугљеничних челичних лимова могу се одабрати према табlici 3.3.

Неки *нисколегирани* и *угљенични челици* су при тачкастом заваривању склони ка закаљивању метала шави и зоне под утицајем топлоте. Због тога се примењују меки режими (мање брзине загревања и хлађења) и накнадно жарење. Јачина струје се узима за 25-30% мања него за нискоугљеничне челике, а сила притиска већа за 1.5 до 2 пута.

Таблица 3.6 Режими тачкастог заваривања нискоугљеничних челика

Дебљина једног лима, s, mm	Пречник врха електроде, d_e, mm	Време заваривања, t_z, s	Јачина струје, I_z, kA	Сила притиска, F_z, kN
0.5	4	0.10-0.20	4-5	0.5-1.0
1.0	5	0.20-0.40	6-8	1.0-2.0
1.5	6	0.24-0.50	8-12	1.5-3.5
2.0	8	0.36-0.60	9-14	2.5-5.0
3.0	10	0.60-1.00	14-18	5.0-8.0
4.0	11	0.80-1.20	15-20	6.0-9.0
5.0	13	0.90-1.50	17-24	8.0-10.0
6.0	15	1.20-2.00	20-26	10.0-14.0

Од обојених метала тачкасто се заварују легуре титана, легуре бакра, легуре алуминијума и магнезијума. Нискоугљенични челици имају релативно велики електрични отпор (8 пута већи него бакар) и низак напон течења па се могу тачкасто заваривати у широком опсегу радних параметара. За нискоугљеничне челичне лимове дебљине $s = (1-3) mm$ јачина струје заваривања приближно се одређује према емпиријском изразу $I_z = 6500 \cdot s$ у A . Осим тога, често се јачина струје одређује на основу препоручене густине струје:

$$i_0 = \frac{I_z}{A_e} = \frac{4 \cdot I_z}{d_e^2 \cdot \pi}, \frac{A}{mm^2} \quad (3.2)$$

где је $A_e = \frac{d_e^2 \pi}{4}$ додирна површина електроде са лимовима у mm^2 . Густина се узима у границама $i_0 = 80-160 A/mm^2$ за меке режими заваривања или $i_0 = 160-400 A/mm^2$ за оштре режими. За лимове веће дебљине препоручује се мања густина струје од горе наведене.

3.2.2.1 Време заваривања

Време као параметар заваривања има битан утицај, јер сагласно Џуловом закону ослобођена количина топлоте је пропорционална времену. Унос топлоте директно зависи од времена заваривања и јачине струје и та два параметра су непосредно везана међусобно. Код електроотпорског заваривања најчешће се је реч о јако малим временима заваривања, нпр. неколико периода. То поготово важи за оштре режиме заваривања.

Пораст времена заваривања доноси неке негативне појаве попут појачаног трошења електрода те веће деформације радних комада. Такође, топлота се простире на шире подручје око завара, односно долази до пораста ширине ЗУТ-а и завар се спорије хлади, што и није увек негативна појава, поготово код метала склоних претераном отврдњавању.

Такође је потребно узети у обзир и отпор материјала радних комада који се заварују те силу притиска. Сви ти параметри у корелацији с временом придоносе уносу топлоте. Код заваривања угљеничних челика, важан фактор је и садржај угљеника. Повећан садржај угљеника захтева дужа времена заваривања. Време заваривања није само време док струја протиче, већ се ради о укупном времену заваривања. У то су укључена времена притискивања електрода, протицања струје, држања те отпуштање притискивања.

Време притискивања електрода мери се од тренутка кад се електроде почну приближавати радним комадима. Време протицања струје је време које се мери у периодима и састоји се од времена док струја не постигне тражену вредност те времена при траженом износу јачине струје. Време држања је кад струја престане да тече, међутим електроде још истом силом притискају радне комаде и завар се хлади.

Време држања требало би бити дуже што су радни комади дебљи и што су услови зближавања лошији. Време отпуштања је време које тече док електроде престају притискати радни комад и удаљавају се према идућем месту завара.

Време заваривања утиче на брзину хлађења завара после прекида струје заваривања. При дугим временима заваривања периферна подручја завара су на релативно високој температури, температурни градијент опада, термичке промене између завара и околних подручја су успорене, брзина хлађења се смањује. За угљеничне челике, са садржајем угљеника 0,3 % С или нешто више и за одређене сродне челике дуго време заваривања је неизбежно, јер се повећањем времена умањује ефекат каљења

За заваривање делова код којих је отежано зближавање потребна су дуга времена заваривања. Дуга времена заваривања примењују се и када су површине делова пресвучене оксидом.

Време протицања електричне струје кроз лимове, такође се бира према дебљини основног материјала. За нискоугљеничне челичне лимове усваја се време заваривања у секундама $t_z = (0.16 - 0.36) \cdot s$ или, како се то често даје у периодима наизменичне струје (n):

$$n = \frac{t_z}{T} = \frac{(0.16 - 0.36)}{T} = \frac{(0.16 - 0.36)}{0.02} = (8 - 18) \text{ per}, \quad (3.3)$$

где је T - период осциловања наизменичне струје; за $f = 50 \text{ Hz}$, $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ s}$.

3.2.2.2 Сила притиска на електродама

Основна улога електрода је затварање струјног кола, преношење силе заваривања и одвођење топлоте. Због тога су електроде изложене високим механичким и термичким напрезањима. Пречник врха електроде директно утиче на димензије заварене тачке и има велики значај у избору режима заваривања. Што је мањи пречник врха електроде то су мање и димензије заварене тачке. При сувише малом пречнику добија се недовољна моћ ношења

споја, без обзира на повољне особине споја. При сувише великом пречнику добија се спој са малом моћи ношења због недовољног загревања, а осим тога и неекономичан спој.

Сила притиска на електроде се уводи пре почетка пропуштања струје, са циљем да се оствари чврсто налегање лимова на месту где ће се касније образовати заварени спој. Сила заваривања је најчешће статичка и константна, мада може некада варирати, било због различитих спољашњих утицаја, било намерно у облику програмираног циклуса. Дејством силе се помаже очвршћавање растопљеног метала и спречава се улазак штетних гасова у растопљену зону метала.

У зависности од величине силе притиска електрода зависи и отпор контакта, а према томе и количина топлоте која се издваја на месту заваривања. Као и код времена заваривања и притисак заваривања може имати своју горњу и доњу вредност. Сувише велики притисак смањује отпор контакта и изискује јачу струју за добијање одређене количине топлоте и обрнуто, при мањем притиску потребна је и мања јачина струје. У другом случају загрејан метал не може бити довољно добро притиснут да би се добио задовољавајући квалитет споја, а и електроде ће се брже хабати због јачег загревања, може доћи до истискивања метала.

Сила притиска електрода зависи од дебљине и напона течења основног материјала. Израчунава се по обрасцу:

$$F_z = p \cdot \frac{d_e^2 \cdot \pi}{4}, N, \quad (3.4)$$

где су: p - специфични притисак електрода у MPa који се за нискоугљеничне челике препоручује у границама 49-118 MPa и d_e , mm , пречник електроде. Веће вредности притиска усвајају се за дебље предмете и јаче струје. Нешто већа сила (око 20%) потребна је при заваривању лимова недовољно очишћених додирних површина и код површински заштићених лимова.

Нерђајући челици имају 5-6 пута већи електрични отпор него угљенични, па је стога довољна струја мање јачине. Високи напон течења ових челика условљава примену великих притисака ($p = 250-400 MPa$) и силе истискивања 2.5-4 пута веће него за нискоугљеничне челике. Сличним режимима заварују се и термостојани челици.

Легуре алуминијума се одликују високом електричном и топлотном проводљивошћу, што изискује струју веће јачине и кратко време. Јачина струје је 3-3.5 пута већа него за нискоугљенични челик, а време је само 2-4 периоде наизменичне струје тј.

$$t_z = (2-4) \cdot T = (2-4) \cdot \frac{1}{f} = 0.04-0.08 \text{ s.}$$

Сила притиска у N се израчунава према изразу:

$$F_z = k \cdot s^2 \cdot R_{p0.2}, \quad (3.5)$$

где је: k - коефицијент у границама 5-9; ниже вредности одговарају мекшим и дуктилнијим лимовима, а више деформационо или термички ојачаним легурама; s - дебљина лима у mm и $R_{p0.2}$ - технички напон течења (конвенционални напон течења) (за алуминијум, 200-300 MPa).

Термофизичке карактеристике лимова које битно утичу на заварљивост електричним отпором, дате су табели 3.7.

Таблица 3.7 Термофизичке карактеристике челика, алуминијума и месинга

Материјал	λ , W/mK	c , J/kgK	$\rho_T \cdot 10^{-6}$, Ωm	T_b , °C	ρ , kg/m ³
Нискоугљенични челици	62	462	0.14	1500	7850
Нисколегирани и средњеугљенични челици	39	471	0.21	1415	7750
Нерђајући Cr-Ni челици	20	502	0.75	1410	7880
Алуминијум	222	1046	0.029	660.4	2699
Месинг	84	381	0.071	900	8600

Утицај материјала на квалитет тачкасто завареног споја

Ако се у производњи појаве заварене тачке лошег квалитета, веома је тешко, због мноштва фактора, проценити удео лошег квалитета материјала. Варијације у квалитету материјала, указују да је сировина главни кривац за настале дефекте. Због тога се у техничким условима прописују квалитетни лимови, па се статичком методом узимају узорци за техничка испитивања. Узорци се праве за испитивање затезањем и за испитивање тврдоће, а дебљина се контролише на истим узорцима.

Варијације у особинама одређеног лима, које имају највећи утицај на квалитет, могу релативно просто да се установе уобичајеним механичким испитивањем. Овде се у првом реду мисли на одређивање затезне јачине и мерење тврдоће. Механичке карактеристике основног материјала и површински заштићеног лима дате су детаљније у поглављу VI.

На узорцима материјала се прави завар, па се од овако добијених пробних завара врши контрола уобичајеним методама (испитивање разарањем и испитивање без разарања).

Утицај стања површина лимова

Најбољи резултати тачкастог заваривања постижу се онда када су површине лимова равне, глатке и чисте. Стање површине утиче на величину отпора између врхова електрода и лимова и ако је овај отпор превелик, температура на местима контакта електрода-лим може да достигне температуру топлјења, што је неповољно.

Практични захтеви за тачкасто заваривање су да лимови буду очишћени од оксида, боја, масти, уља и других нечистоћа. Присуство ових материјала може често да учини лимове неповољним за струју заваривања напона од неколико волти. Због велике густине струје на отвореним микроконтактима, нарушава се нормална расподела топлоте, долази до локалног прегревања па чак и до унутрашњег и спољашњег истискивања метала (варничења).

Обавезно је чишћење површина лимова од оксидних скрама. Нарочито треба да се чисте површине лимова које су у додиру са врховима електрода. Слојеви оксида показују нарочито велики утицај на лимове тање од 0,5 mm.

Набројане материје и нечистоће се лепе на електроде и смањују њихов век. Оксидне скраме уклањају се механичким методама, дејство мора да буде довољно јако да скраму уклони, али ни сувише грубо да оштети површине лимова. Оксидне скраме не треба увек чистити. Ако су оне увек равномерно распоређене, лимови се могу заварити подешеним

режимима. У овом случају повољније резултате даје ручна регулација времена паљења него аутоматска. Страни укључци могу да створе шупљине, гасне мехурове и друге унутрашње грешке које се тешко могу открити.

3.2.3 Технологија тачкастог заваривања

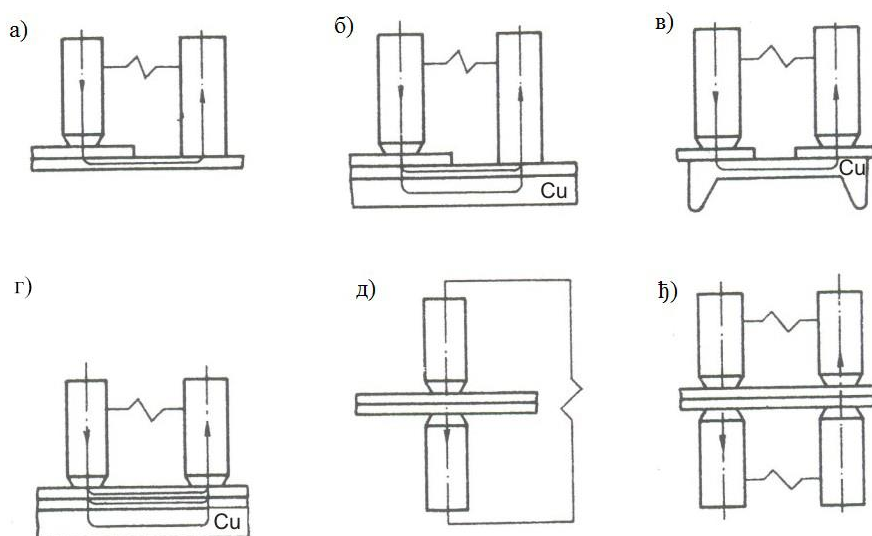
Тачкасто заваривање најзаступљенији је облик електроотпорског заваривања који се примењује у данашњој индустрији. Заварени спој није континуалан, већ заварени спој чине једна или више тачака. Радни комади најчешће се преклапају и притискају електродама како би се фиксирани и како би се остварила довољна сила притиска за заваривање.

Тачкастим заваривањем обично се спајају челични предмети дебљине до 6 *mm*, мада је могуће спајати и дебље плоче. Полупроизводи од којих се израђују тачкасто заварене конструкције најчешће су нискоугљенични челични лимови и траке, плоче, отпресци, цеви, профили, као и полупроизводи добијени ливењем, ковањем и резањем. У већини случајева изводи се двострано тачкасто заваривање (сл. 3.13д), мада се по потреби користе и схеме дате на слици 3.13а,б,в,г,ђ.

Заварни спој настаје комбинацијом три фактора, а то су: топлота, притисак и време. Износ сваког од ових фактора зависиће од врсте материјала, дебљине материјала који се заварује, те од стања његове површине. Код тачкастог електроотпорског заваривања топлота се развија услед отпора протицања струје на додирним површинама комада притиснутим електродама. Такво заваривање може бити једнотачкасто и вишетакасто.

Иако се правилно усвоје основни параметри: d_e , I_z , t_z , F_z , то још није довољно да заварен спој буде квалитетан. Потребно је исправити лимове ради бољег налегања на местима преклопа, нарочито ако су лимови дебљи од 2 *mm*. Заштитне боје, масти, уља, оксидисане површине и друге нечистоће штетно делују при тачкастом заваривању, па се морају претходно одстранити.

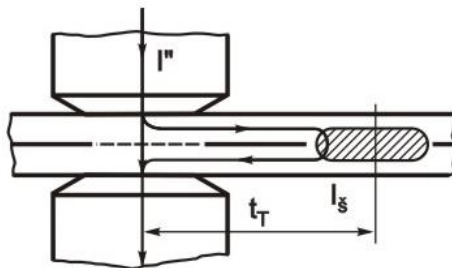
Нарочито морају да се очисте површине лимова на које налажу електроде, јер у противном могу настати неправилни шавови са површинским грешкама или изостати формирање сочива. Површине лимова се могу очистити челичним четкама или крпама натопљеним бензином, ацетоном или трихлоретиленом.



Слика 3.13 Положаји електрода при тачкастом заваривању

Челични лимови обично се спајају помоћу више тачака чији распоред и растојање зависе од облика и димензија лимова. Ако је растојање између претходно изведене тачке и

нове мало, струја се грана ка претходно изведеној тачки (сл. 3.14); тим тзв. шентирањем умањује се јачина струје заваривања за величину I_s , ($I_z = I'' - I_s$), па уместо нове заварене тачке може настати слепљивање (прилепљивање) лимова. Овакве заварене тачке уопште не повећавају јачину споја, већ само нарушавају изглед лимова са стране електрода.



Слика 3.14 Схема гранања (шентирања) струје

Препоручена најмања растојања између суседних тачака (t_T) и преклопи (a) у зависности од врсте и дебљине лимова дати су у табlici 3.8.

Таблица 3.8 Минимални кораци (t_T) и преклопи (a) при тачкастом заваривању

s, mm	Конструкциони челици		Ватростални челици		Лаке легуре		Легуре бабра	
	t_T , mm	a, mm	t_T , mm	a, mm	t_T , mm	a, mm	t_T , mm	a, mm
0.5	10	8	8	6	15	12	10	10
1.0	12	10	10	8	15	14	14	12
2.0	18	14	14	12	25	20	20	16
3.0	25	18	18	16	30	26	26	22
4.0	35	22	22	20	35	30	30	26

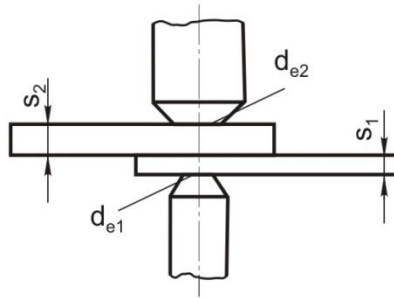
Тачкастим заваривањем могу се спајати лимови различитих дебљина и материјала, али уз примену посебних мера. Основни проблем да се сочиво по дебљини равномерно распореди у оба лима, може се решити избором електрода различитих пречника. Ако се нпр. заварују лимови дебљина s_1 и s_2 , пречник једне електроде израчунава се према тањем лиму, а друге из услова топлотне равнотеже у односу на додирну раван лимова.

Ако је дебљина тањег лим s_1 , пречник врха електроде која належе на тај лим биће $d_{e1} = 5\sqrt{s_1}$; већи пречник електроде, d_{e2} може се одредити на основу израза за омске отпоре лимова:

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{s_1}{A_1} = \rho_1 \cdot \frac{4 \cdot s_1}{d_e^2 \pi}; \quad R_2 = \rho_2 \cdot \frac{s_2}{A_2} = \rho_2 \cdot \frac{4 \cdot s_2}{d_e^2 \pi}. \quad (3.6)$$

За правилан положај сочива, мора се успоставити топлотна равнотежа, $R_1=R_2$, или $\frac{\rho_1 \cdot s_1}{d_{e1}^2} = \frac{\rho_2 \cdot s_2}{d_{e2}^2}$. Одавде произлази: $d_{e2} = d_{e1} \sqrt{\frac{s_2}{s_1}}$, јер је за исти основни материјал $\rho_1 = \rho_2$,

односно за $s_1 = 1 \text{ mm}$ и $s_2 = 4 \text{ mm}$ следи $d_{e1} = 5 \text{ mm}$ и $d_{e2} = 5 \sqrt{\frac{4}{1}} = 10 \text{ mm}$.



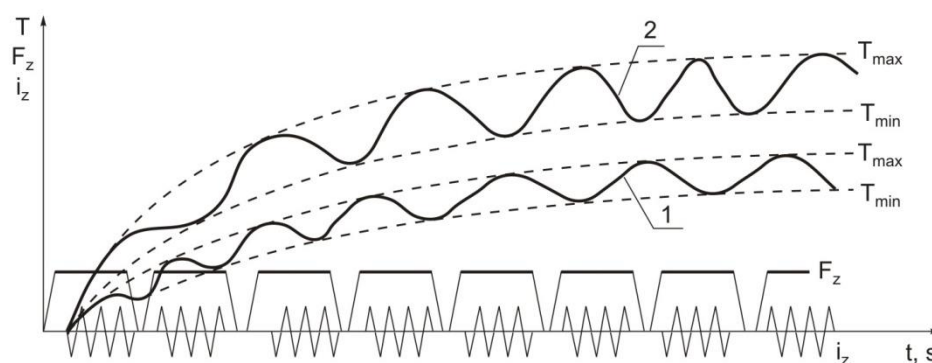
У општем случају, кад се разликују и материјали и дебљине лимова, пречник електроде која належе на дебљи лим рачуна се по обрасцу: $d_{e2} = d_{e1} \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot s_2}{\rho_1 \cdot s_1}}$.

Другим речима, на дебљи лим треба ставити электроду већег пречника, или ако су лимови исте дебљине, а различитих материјала, онда се електрода већег пречника поставља на лим веће специфичне електричне отпорности, јер већа електрода одводи више топлоте него мања.

4. ЕЛЕКТРОДЕ ЗА ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ

У процесу тачкастог заваривања електроде остварују непосредан контакт са лимовима који се заварују, преносе силу притиска, спровode струју и одводе већи део топлоте ослобођене у зони контакта лимова. Облик и димензије радне површине, која је у контакту са деловима и читава конструкција електрода имају велики утицај на квалитет заварених спојева и продуктивност процеса.

У условима серијске и масовне производње тачкасто заварених склопова, деловање топлоте и притиска на електроде циклично се понавља (сл. 4.1), што при дуготрајном раду доводи до промене облика и димензија електрода. При заваривању без воденог хлађења електрода, добија се знатно виша температура на њиховим радним површинама (крива 2) и тиме убрзава њихово хабање. Због тога се електроде намењене за дуготрајан рад морају хладити текућом водом (крива 1), мада се при наизменичном загревању и хлађењу стварају допунски термички напони.



Слика 4.1 Промена температуре (T) радних површина електрода при воденом хлађењу (1) и без воденог хлађења (2); i_z - циклуси струје, F_z - сила притиска

Из основне улоге електрода произлазе технички услови који се односе на:

- високу топлотну и електричну проводност при собним и повишеним температурама,
- ватропостојаност, добру механичку обрадивост и термopостојаност на повишеним температурама и
- отпорност на оксидацију и легирање са неким елементима из основног материјала.

У процесу тачкастог заваривања електроде се загревају до високих температура под утицајем топлоте, која се ослобађа у њима при протицању струје, као и на рачун преношења топлоте са заварених делова. Резултати испитивања и прорачуна показују да се при тачкастом заваривању легура алуминијума, у свакој електроди се ослобађа 10-15% укупне топлоте која се троши при заваривању.

При тачкастом заваривању са релативно благим режимима, и малом брзином (25-30 тачака у минути), електроде се за време паузе охладе до почетне температуре. При бржем заваривању (100-150 тачака у минути), као и када се примењује оштрији температурски режим, радна површина електрода се у паузи само делимично охлади. Максималне радне температуре у електродама знатно превазилазе температуру рекристализације легура од којих су направљене електроде, а у неким случајевима при заваривању молибдена, титана и других тешко топљивих метала достижу температуру топљења.

Циклична загревања и хлађења електрода при протицању струје се појачавају њиховим унутрашњим или спољашњим хлађењем водом, што условљава појаву заосталих термичких

напона. Напрезања, која се јављају под утицајем силе сабијања могу знатно да превазиђу границу течења метала електрода. Електроде истовремено трпе оптерећење због савијања до којих долази при употреби профилисаних електрода, при неправилном постављању, скидању електрода и тсл.

Под утицајем високих температура и сила у металу радног дела електроде, долази до неравномерне пластичне деформације која условљава његово неуједначено омекшавање. Метал радног дела електроде изложен је снажном утицају термичког замора и динамичких оптерећења ниске фреквенције (малоцикличног замора). У металу електроде јављају се еластичне и пластичне деформације при променљивом оптерећењу, затим отпуштање и рекристализација, старење, оксидација површине и најзад разарање. Ове појаве одвијају се истовремено, делују једна на другу и отежавају понашање метала.

Цикличне промене оптерећења и температура, убрзава рекристализацију метала и старење и изазива замор материјала у првом реду термички. Циклично оптерећење се јавља у краткотрајним интервалима, а радна напрезања на сабијање у електродама при високим температурама, надмашују границу течења материјала.

Оксидисане површине електрода повећавају отпор протицању електричне струје, односно повећава се количина ослобођене топлоте што доводи до већег загревања материјала електрода. Због ових наведених разлога: повећање температуре, цикличног и динамичког променљивог оптерећења у материјалу електроде слаби везу између кристалних зрна микроструктуре што доводи до појаве микропрлина. Појава микропрлина изазива концентрацију напрезања, убрзава стварање прлина од замора, што доводи до повећања почетног пречника и каснијег разарања.

При примени оштрих режима заваривања, кад максимална температура није већа од $0,47 T_t$ (T_t -температура топљења метала електрода) на појединим деловима радне површине електрода, најпре се појаљују трагови сабијања, а затим се даљим заваривањем стварају прсLINE, како у зрнима тако и између њих.

Код примене благих режима и при брзом заваривању максимална температура достиже $0,7 T_t$. После релативно малог броја тачака (2000-3000), појављују се прсLINE између зрна које се проширују и продубљују са повећањем броја заварених тачака. Треба напоменути да се прсLINE на електродама појављују при повећању пречника електроде за 20% тј. после заваривања 1500-2000 тачака. Значи да се правилном употребом електрода, тј. њиховим благовременим оштрењем може спречити утицај прсLINE и продужити век електрода.

При заваривању лаких легура долази до приањања метала, који се заварује за радну површину електроде и потањање површине делова због интензивног преласка метала електроде на основни материјал. Један од основних захтева које требају да испуњавају легуре за електроде је висока затезна јачина на повишеним температурама. Због тога материјал електроде треба да поседује високу способност провођења струје, нарочито при заваривању лаких легура.

4.1 ЕЛЕКТРОДНИ МАТЕРИЈАЛИ

Нежелезни метали је скупни назив за све метале осим гвожђа. Велику примену имају због посебних особина као што су: добра електрична и топлотна проводљивост (Cu, Al), мала тежина (Mg, Al, Ti), висока температура топљења (W, Mo, Ta), специјалне физичке особине (Ti), корозивна отпорност (Ti, Cu, Al) и др.

Нежелезни метали углавном се деле на лаке ($\rho < 5000 \text{ kg/m}^3$) и тешке ($\rho > 5000 \text{ kg/m}^3$). У лаке спадају Li, Mg, Be, Al, Ti. Легуре лаких метала се највише примењују у авијацији и транспортној техници и за друге примене где је битна што мања тежина. Најважнији конструкциони материјали лаких метала су легуре алуминијума, магнезијума и титана. Као легирајући елементи лаких метала користе се берилијум, а у последње време и литијум (најлакши од свих метала $\rho^{\text{Li}} = 0.533 \text{ g/cm}^3$). Остали нежелезни метали се сврставају у тешке метале. Уопште се, према температури топљења (T_f), сви метали разврставају на:

- *нискотопљиве* (T_f до 600°C): Zn, Ca, Sn, Pb, Sb, Bi, Li, In,
- *средњетопљиве* (T_f од 600 до 1538°C): Fe, Mn, Cr, Ni, Cu и
- *високотопљиве* (T_f преко 1538°C): Ti, Zr, V, Nb, Cr, Mo, W, Ta.

Остали метали се деле на племените (Au, Ag, Pt) и сродне метале као и метале у траговима, тј. оне који се у природи појављују само у малим количинама – индијум (In), телур (Te), итријум (Y) и елементи ретких земаља: лантаниди: [церијум (Ce), лантан (La), литијум (Li), неодијум (Nd) и др.] и актаниди: [торијум (Th), уранијум (U), плутонијум (Pu) и др.].

Од лаких метала у техничкој пракси се највише примењују Al, Mg, Ti и њихове легуре; по обиму производње прво место припада алуминијуму и његовим легурама.

У најранијим данима примене електроотпорског заваривања, на избор електродног материјала најважнији критеријуми су били електрична проводљивост и могућност да се она одржи и на повишеним температурама. С обзиром на овакве захтеве, на првим машинама за електроотпорско заваривање коришћене су електроде од чистог бакра. Применом бакра постигнути су задовољавајући услови заваривања, пошто још није била уведена масовна производња, те није било потешкоћа са веком трајања електрода.

Бакар

Бакар се добија из сулфидних руда: куприт (Cu_2S), халкопирит (CuFeS_2), борнит (Cu_3FeS_3), лазурит ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) и малахит ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$). Бакар је неполиморфан метал (нема алотропске промене), а при загревању задржава површински центрирану кубну решетку (A1) од собне температуре до тачке топљења. Параметар решетке Cu је 0.36151 nm , а полупречник атома 0.128 nm . При дужем дејству атмосферилија, на површини бакарних предмета формираће се танка заштитна скрама тзв. патина ($\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$) која даље штити бакар од штетног деловања спољашње атмосфере. Производе се топљен бакар и електролитички тј. накнадно рафинисан бакар.

Бакар припада групи тешких метала густине $\rho = 8.96 \text{ g/cm}^3$ средње температуре топљења (1083°C), лако се обрађује пластичним деформисањем, а веома тешко лије. Кад се загреје до изнад 400°C , на површини бакра образује се танка и веома крта оксидна скрама

Механичка својства бакра доста зависе од стања испоруке, односно претходне механичке и термичке обраде. На пример, затезна јачина бакра у ливеном, односно жареном стању је око 200-250 МПа, а тврдоћа 45-60 НВ; међутим у хладно деформисаном стању јачина се повећава на 400-500 МПа, тврдоћа на 90-110 НВ, а истегљивост опада са 50% на 2-6%.

У машинству се бакар употребљава у облику лимова, трака, цеви, профила. Према степену деформисања на хладно разликују се:

- мек бакар ($R_m = 200-250 \text{ MPa}$),
- полутврд бакар ($R_m = 250-300 \text{ MPa}$),
- тврд бакар ($R_m = 300-370 \text{ MPa}$) и
- опружно тврд бакар ($R_m > 370 \text{ MPa}$).

Бакар је релативно мек метал, те се пластично може прерађивати било на хладно или на топло; на корозију је отпоран у сланој морској води, али није отпоран на органске киселине и амонијак, као и гасове који садрже сумпор. Употребљава се за хладњаке аутомобила, електрокаблове, закивке, заптивке, олуке и црквене покривке. Оптимална температурска област за обраду бакра деформисањем на топло ограничена је на 680 до 780°C.

Ливачке особине бакра нису добре из два разлога: први је велико скупљање при кристализацији и даљем хлађењу одливака, а други склоност ка апсорпцији гасова из околне атмосфере. Што се тиче електропроводности испред бакра је само сребро, па је Cu главни метал у електротехници, електроници и електро-вакуумској техници ($\lambda^{\text{Cu}} \approx 395-400 \text{ W/mK}$).

Такође, после волфрама и сребра, бакар има највећу термичку проводност те се употребљава за делове парних котлова, змијасте цеви измењивача топлоте, вентиле, делове расхладних уређаја и друге термичке уређаје.

У легурама бакра, легирајући елементи су: Zn, Sn, Al, Ni, Mn, Si, Be, Pb. Легуре бакра се примењују знатно више него чист бакар; оне се деле на: месинге (Cu-Zn), бронзе (Cu-Sn) и остале легуре (Cu-Ni, Cu-Ni-Mn, Cu-Ni-Fe-Mn).

Неопходне су биле промене у материјалу електрода када је почела израда каросерија аутомобила од отпресака који су спајани тачкастим заваривањем. Електроде од чистог бакра могле су да издрже само око 100 тачака пре поновног обликовања оштрењем врха, а основни разлог је недовољна јачина бакра већ на температурама већ од 150-200°C. Знајући да на савременим аутомобилима има 5000-10000 тачака, јасно је да се чист бакар не може прихватити као материјал за израду електрода због економичности и продуктивности.

Даљим развојем у овом правцу, ишло се на то да се задржи што боља електрична проводљивост, а да се век електрода повећа. Прво унапређење које је било извршено, била је замена чистог бакра легуром (са 1% кадмијума). Ова легура, у односу на чист бакар, има знатно већу јачину, вишу температуру рекристализације уз још увек високу електричну проводљивост. Упоредни преглед неких особина легура бакра и чистог бакра дат је у табели 4.1.

Таблица 4.1 Упоредни преглед неких својстава електродних материјала

Материјал	Тврдоћа, HRB	Ел. проводљивост, % IACS	Температура, °C	Затезна јачина, MPa	Издужење, %
Cu	52	90	150	300	40
Cu-Cd	60	85	250	390	20
Cu-Cr	80	80	500	520	15
Cu-Cr-Zr	80	75	525	520	15

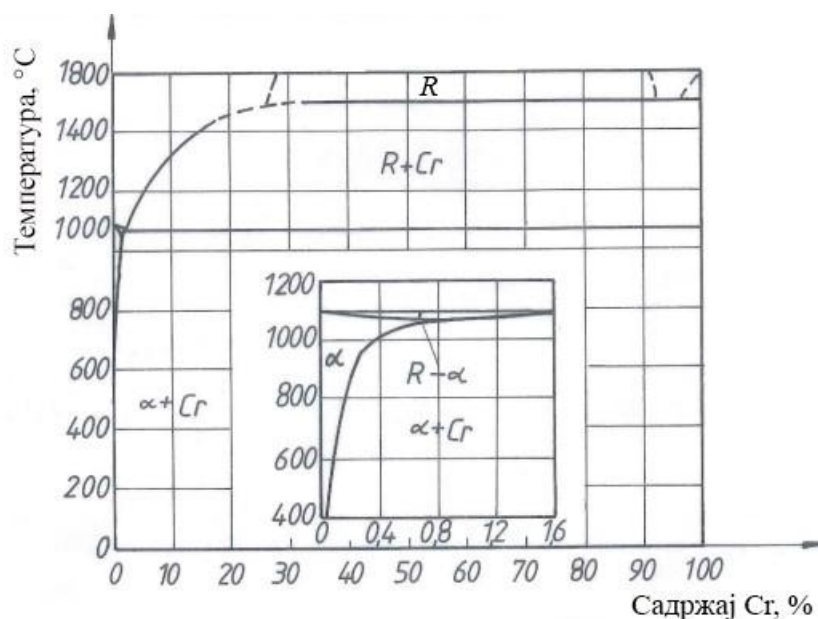
*International Annealed Copper Standard (IACS) - стандардна емпиријски изведена вредност електричне проводљивости комерцијално доступног чистог бакра, S/m.

Повећање тврдоће легуре Cu-Cd се постиже делимично као резултат легирајућег дејства кадмијума, али у већој мери накнадним деформационим ојачањем.

Највеће достигнуће у развоју материјала који се примењује за израду електрода настало је када је откривено да многе легуре бакра отврдњавају термичким таложењем (старењем). Ова појава настаје код легура код којих растворљивост у чврстом стању легирајућег елемента знатно опада са снижењем температуре. Легирајући елемент загревањем улази у чврст раствор и на одређеној температури постиже максималну растворљивост. У условима равнотежног хлађења, тај елемент излази из решетке, док се при нагом хлађењу (закаљењу) задржава у њој, тј. презасићени чврсти раствор се може задржати и на собној температури. Накнадним загревањем до одређене температуре и задржавањем на тој температури, долази до излучивања вишка раствореног елемента таложењем (секундарна фаза). Честице ове фазе су субмикроскопске и почетак њиховог издвајања се не може уочити. Захваљујући издвајању секундарне фазе при температури термичког таложења долази до ојачања што се манифестује знатним повећањем тврдоће и затезне јачине. За одређену легуру могу се пронаћи оптимални односи температуре и времена која дају најбољи ефекат старења. Ако се продужи време држања, настаће огрубљавање издвојене фазе, што доводи до омекшавања материјала и делимичног умањења ефекта старења. Допунско повећање тврдоће се може постићи прерадом на хладно (на пример истискивањем). Истраживања су показала да је за примену најповољнија легура Cu-Cr.

Двокомпонентна легура Cu-Cr, годинама је примењивана и још увек се примењује за заваривање угљеничних челика. Она се може успешно применити за мање брзине заваривања, тамо где се електрода на врху не загрева знатно изнад температуре рекристализације (450°C). У индустрији где се изводи 25-30 тачака у минути ова легура још увек задовољава, али при серијској производњи у аутомобилској индустрији где брзина заваривања достиже и до 200 тачака у минути, ова легура не задовољава. Тако велика брзина заваривања проузрокује знатно загревање врхова електрода (и до 800°C) па се услови рада електрода знатно погоршавају. Услед тога материјал електрода брзо губи јачину, врхове електроде треба чешће чистити и оштрили, што изазива застоје, односно повећава трошкове производње.

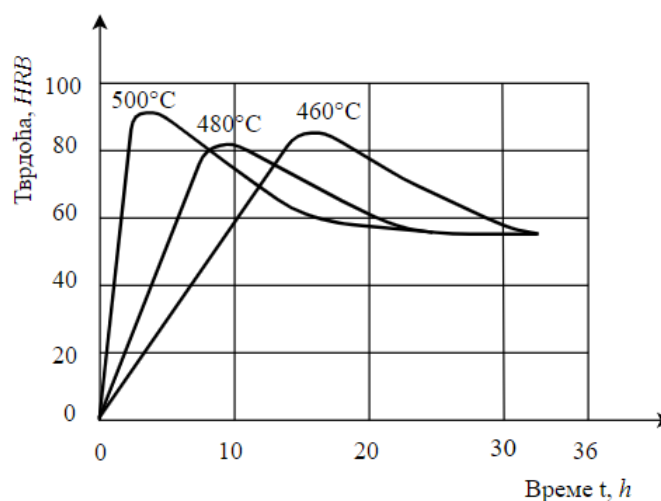
Снижење постојаности електрода са повећањем брзине заваривања објашњава се погоршаним условима рада електрода услед циклично променљивог напрезања и деловања топлоте. То доводи до нарушавања оптималне структуре легуре добијене термомеханичком обрадом. Отуда следи да је основни захтев повећање постојаности материјала на повишеним температурама. Испитивањима је показано да су слаба места у легури Cu-Cr управо границе металних зрна. Установљено је да се додавањем цирконијума овом бинарном систему повећава јачина на границама металних зрна. Та нова легура бакра (са око 1% Cr и 0,1% Zr), има скоро идентична својства при собној температури као и легура добијена прерадом на хладно. Истраживањем је утврђено да је најповољнија легура Cu-Cr, чији је дијаграм дат на слици 4.2.



Слика 4.2 Равнотежни бинарни дијаграм Cu-Cr

Хром се ограничено раствара у бакру у чврстом стању. При еутектичкој температури (1076°C) растворљивост хрома достиже $0,6\%$. Снижењем температуре при равнотежном хлађењу растворљивост нагло опада и при температури од 400°C износи само $0,02\%$. Каљењем у води са температуре максималне растворљивости, легура се задржава у стању засићеног чврстог раствора. Накнадним загревањем на температуру $460\text{--}500^{\circ}\text{C}$, долази до излучивања (таложења) хромом богате фазе.

Време задржавања као што је већ истакнуто, зависи од температуре отпуштања. Ова зависност је приказана на слици 4.3, за три температуре наведеног температурског интервала. Из ових кривих се могу прочитати оптимална времена за одређену температуру. Препоруке за избор температуре су углавном везане за масу материјала који се термички обрађује. Овде нема неких прецизних упутстава, али се оријентационо узима режим "висока температура – кратко време" за ситније, а "нижа температура – дуже време" за масивније делове.

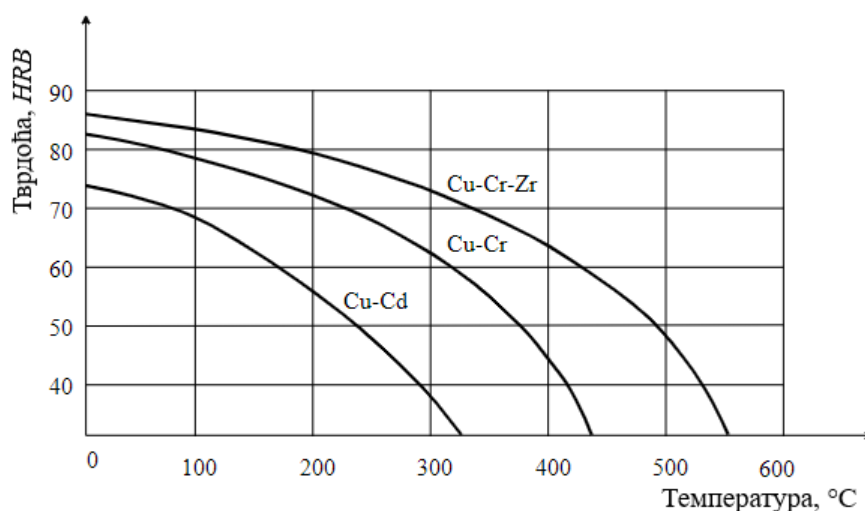


Слика 4.3 Промена тврдоће HRB у зависности од времена старења за три различите температуре легуре Cu-Cr

За израду електрода се примењује и хромова бронза која садржи 0,4-1% Cr. Механичке и физичке особине бронзе са 0,5% Cr су следеће:

Температура топљења, °C	
Ликвидус	1080
Солидус	1073
Специфични електрични отпор $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ при 20°C	
У закаљеном стању	0,0383
После отврдњавања таложењем	0,021
Затезна јачина, МПа	
У закаљеном стању	240
После отврдњавања таложењем	410
После отврдњавања таложењем и прераде на хладно од 25%	520
Граница течења, МПа	
У закаљеном стању	48
После отврдњавања таложењем	270
После отврдњавања таложењем и прераде на хладно од 25%	440

Међутим својства ове трокомпонентне легуре на повишеним температурама, су знатно побољшана, што је приказано на дијаграму на слици 4.4<.



Слика 4.4 Тврдоћа у зависности од температуре за легуре Cu-Cd, Cu-Cr и Cu-Cr-Zr

Увођењем цирконијума у хромову бронзу, знатно се повећава температура почетка рекристализације, што доприноси побољшању механичких особина на повишеним температурама. Легирањем се повећава стабилност издвојених честица, јер се омета њихово прекрајање и успоравају дифузиони процеси. Запажено је да легирањем цирконијума расте и пластичност хромове бронзе.

У легури Cu-Cr-Zr снижавањем температуре издваја се тешко топљиво једињење Cu₃-Zr, које повећава механичке особине и чија је температура топљења око 1115°C.

Поред хрома, кадмијума и цирконијума као легирајући елементи користе се сребро, берилијум, магнезијум, никл, цинк, фосфор, сумпор и сл. Неки од ових елемената смањују проводљивост бакра, а повећавају затезну јачину и тврдоћу на повишеним температурама што има за циљ повећање постојаности електрода.

Берилијум са баком ствара ограничено чврсте растворе променљиве растворљивости. Легуре бакра и берилијума, чија се јачина повећава при термичкој обради, поседују високу затезну јачину али врло малу проводљивост. Због тога се у бинарне легуре бакра и берилијума додају кобалт и никл, тако да се смањењем количине берилијума постиже већа проводљивост. Кобалт и никл са берилијумовом бронзом стварају једињења типа CoBe и NiBe.

Алуминијум у малој количини не утиче битније на механичка својства и обраду бакра, али знатно смањује способност бакра да проводи струју и топлоту. Алуминијум много умањује склоност бакра ка оксидацији како на собној температури тако и на повишеним температурама. У бакарне легуре, способне за провођење струје, алуминијум се додаје у малим количинама, као самостални легирајући елемент нема никаквог утицаја.

Титан се такође додаје легурама за електроде, али у врло малим количинама пошто знатно смањује њихову проводљивост. Ипак, према расположивим подацима из литературе додавање титана више успорава сабијање, повећава пластичност легура, а поред тога титан се у извесној мери понаша као модификатор који поспешује уситњавање зрна. Сви ови елементи који се додају бакру могу да формирају хемијска једињења која се при термичкој обради издвајају у виду фино диспергованих фаза. Тешко топљиве фазе сложеног састава, много повећавају постојаност легуре на повишеним температурама. Овакве фазе у односу на бакар су: CoBe, NiBe, NiSi и др.

Поред специјалних легирајућих елемената у бакру се у виду примеса могу налазити бизмут, антимон, арсен, гвожђе, олово, сумпор и други елементи, доспели у њега при топљењу, чији се утицај на особине легура мора имати у виду. Њихова количина зависи од врсте бакра.

Присуство **бизмута** у бакру је врло штетно. У мањим количинама он изазива разарање бакра при обради на топло под притиском, а при већој количини, бакар постаје крт, чак и у хладном стању.

Антимон негативно утиче на пластичност метала и смањује његову способност провођења струје и топлоте.

Арсен много не утиче на механичка и технолошка својства бакра, али знатно смањује његову проводљивост, повећава температуру рекристализације и постојаност на топлоти, али и елиминише штетан утицај бизмута, антимона и кисеоника и због тога се понекад додаје као легирајући елемент.

Гвожђе уситњава структуру метала, обуставља рекристализацију, повећава јачину, смањује пластичност, проводљивост струје и топлоте и отпорност на корозију. Олово се не раствара у бакру у чврстој фази и не утиче на способност провођења бакра. Оно побољшава погодност бакра за резање.

Из наведеног се може закључити да је већина тих примеса штетна и њихов садржај се ограничава одговарајућим техничким условима.

4.1.1 Основне врсте легура за израду електрода и начини повећања механичких карактеристика

Као што је већ споменуто у индустрији се користи велики број различитих материјала за израду електрода за електроотпорско заваривање. У зависности од намене, легуре за електроде се деле на три класе:

- за заваривање лаквих легура са високом способношћу провођења струје и топлоте неопходне су електроде од материјала са високом способношћу провођења струје;
- за заваривање нискоугљеничних и конструкционих челика који се најшире примењују су потребне легуре просечне тврдоће и проводљивости;
- за заваривање нерђајућих челика и ватросталних легура основни услови које треба да задовоље електроде су велика тврдоћа на собној и повишеним температурама и висока постојаност на повишеним температурама.

За израду електрода за тачкасто заваривање обично се користи кадмијумова бронза са око 0,9-2% кадмијума. При изради електрода треба обавезно користити кадмијумову бронзу ојачану прерадом на хладно. Њена тврдоћа не сме бити мања од 95 НВ. Због тога се шипкасти материјал обрађује на хладно и то са степеном сабијања не мањим од 40-50%.

Већу електропроводљивост поседују легуре бакра са малим додацима сребра (0,1%). Ова легура је углавном предвиђена за израду плоча колектора и садржи 0,07-0,12% сребра, а тврдоћа шипки не треба да буде мања од 95 НВ.

Легура која садржи 0,25-0,45% хрома, 0,02-0,35% кадмијума, док остали део чини бакар, поседује најмање 85% електропроводљивости, коју поседује стандардни жарени бакар и тврдоћу која није мања од 110 НВ после термичке обраде. Да би се постигле оптималне особине, легуре, треба применити каљење на температури од 940-960°C, у води, деформацију на хладно од 50-60% и отпуштање на температури 470-490°C у току од 4 h. Ова легура обезбеђује високу отпорност електрода и добар квалитет заваривања.

Високу електропроводљивост поседују и легуре бакра са додацима 0,1-0,3% цирконијума, које се такође излажу деформацији на хладно да би се повећала њена јачина. Легуре бакра и цирконијума познате су одавно и поседују високу електропроводљивост од 90-95% у односу на чист бакар, максималну затезну јачину од 420-500 МПа, тврдоћу на собној температури од 125-130 НВ и једночасовну тврдоћу на 600°C од 20-25 НВ. Њена сточасовна затезна јачина на температури од 300°C при садржају од 0,37% Zr је 310 МПа, а на температури од 500°C је 120 МПа. Температура почетка рекристализације легуре бакра и цирконијума у наведеном односу је око 480°C.

Цирконијум знатно побољшава особине бакра, посебно на повишеним температурама. Да би се добиле неопходне особине, легура мора да се закали у води са температуре 960-980°C, да се изложи обради на хладно од 40-50% и да се после тога отпушта на 460-470°C, у току од 4-5 часова. Легуре бакра са цирконијумом имају прилично сложену технологију израде при којој је неопходно топљење у вакуумским пећима.

Ниско легирана трострука легура хрома и цирконијума која садржи 0,2-0,4% Cr, 0,1-0,25% Zr и остало бакар, може да се добије методом топљења (у отвореним пећима). После обраде по режиму каљење-ојачавање на хладно и отпуштање, електропроводљивост ове легуре са 0,2 Cr и 0,21 Zr износи 92% проводљивости бакра. Граница затезне јачине ове легуре је 460 МПа. Испитивања електрода од ове легуре су показала њену високу отпорност при заваривању лаквих легура.

Поред досад описаних легура високе проводљивости користе се и кадмијумове бронзе следећег састава: око 1% Cd, 0,6-1% телура, 0,15-0,25% Zr, бакар са додацима 1% сребра, хафнијум, хафнијум са цирконијумом и арсен. У низу случајева у кадмијумову бронзу, као у

легура бакра са сребром и телуrom накнадно се додају мале количине других елемената, на пример фосфора који донекле повећава температуру рекристализације легуре.

4.1.2 Класе бакра и његових легура према RMWA стандарду

Утврђени стандарди од стране америчког удружења Resistance Welders Manufacturers' Association (RWMA) за заваривање легура обухватају широк распон бакарних и ватроотпорних легура. Преглед најчешће примењиваних класа легура које се производе и примењују у иностранству, њихов хемијски састав и особине наведени су у табели 4.2.

Таблица 4.2 Типичне физичке и механичке особине легура на бази бакра

Бакарне легуре	Материјал	RWMA Број легуре	Тврдоћа, HRB	Ел. проводљивост, % IACS	Затезна јачина, МПа	Издружење, %	Трајно омекшање	
							Почиње на	
							°C	°F
Класа 1 (1.15000)	Cu-Zr	1.15000	70 В	90	66,000	10	500	930
Класа 2 (2.18200)	Cu-Cr	2.18200	70 В 83 В	80 85	50,000 75,000	20 15	500 500	930 930
Класа 2 (2.18150)	Cu, Cr, Zr	2.18150	83 В	85	75.000	15	500	930
Класа 3 (3.18000)	Cu, Ni, Si, Cr	3.18000	94 В 90 В	48 48	100,000 85.000	13 10	455 455	850 850
Класа 3 (3.17510)	Cu, Ni, Be	3.17510	100 В	48	110,000	10	455	850
Класа 4 (4.17200)	Cu-Be	4.17200	38 С 38 С	20 23	110,000 170,000	2 4	375 375	710 710
Бакар	Cu	—	30 В 40 В	95 100	25,000 40,000	50 35	200 200	390 390

RWMA Класа 1

Бакар-цирковијум се препоручују за заваривање легура алуминијума, магнезијума, површински заштићених челика, месинга и бронзе. Могу се користити како за тачкасто тако и шавно заваривање заштићених челика и материјала високе проводљивости, искључујући бакар и сребро.

Мали додатак цирковијума бакру побољшава отпорност на омекшавање и повећава деформациону отпорност при високим температурама на којима би чист бакар брзо омекшао. Бакар цирковијум се користи као електродни материјал класе 1 како би се смањило лепљење електрода при електроотпорском тачкастом заваривању поцинкованих лимова. Такође, ова легура налази примену авиоиндустрији, енергетици итд.

RWMA Класа 2

Ови материјали су јачи од материјала класе 1 и имају нешто нижу проводљивост. Бакар-хром легура постиже добру тврдоћу и електричну проводљивост иако је комбинација термичке обраде и обраде на хладно.

Класа 2.18200 се користи као материјал за електроде, држаче, адаптере, као и бројне електричне уређаје где је потребна отпорност на деформације при високим температурама или када су потребна већа механичка својства од класе 1. Класа 2 је примарна при високо продуктивном тачкастом и шавном заваривању меког челика, нисколегираних челика, нерђајућих челика, месинга и бронзе, никла, легура никла и сребра, монела, хладно и топло

ваљаног челика, као материјал електроде за заваривање поцинкованог челика и других материјала са превлаком.

Додатак Zr легури Cu-Cr побољшава отпорност на пузање при високим радним температурама и смањује лепљење електрода при раду током тачкастог заваривања поцинкованих материјала. Класа 2.18150 је предвиђена углавном као материјал за израду електрода.

RMWA Класа 3

Велика тврдоћа ових легура чини их идеалним за израду електрода за тачкасто и шавно заваривање високо отпорних материјала као што су нерђајући челици, нихром, инконел и монел. Друга примена је код заваривачих пиштоља, лежајева код шавног заваривања и других структурних делова носача струје. Легуре Cu, Ni, Si, Cr могу се подвргнути термичком третману, са комбинацијом високе затезне чврстоће и добрих електричних и топлотних својстава. Треба га користити у термички обрађеном стању.

Класа 3.18000 се користи када је потребна комбинација веома добре механичке чврстоће и умерене електричне и топлотне проводљивости.

RMWA Класа 4

Легура бакра која се може термички третирати и која има необичну комбинацију врло велике тврдоће, велике чврстоће и ниже електричне проводљивости од материјала класе 3. Треба га користити у термички обрађеном стању. Ово је најтврђа и најјача легура бакра, берилијум-бакар је одређен када је механичка чврстоћа лимитирајућа конструкцијска карактеристика за легуру бакра.

Бакар-берилијум материјал препоручује се за млазнице за брзо заваривање, опруге, електричне компоненте где су притисци изузетно високи и хабање је велико, али где топлота није претерана. Често се користе у облику уметака и облога. Такође се могу користити за заваривање чаура.

Главни легирајући елемент у већини легура за електроде друге класе са бољим механичким особинама је хром. Хромна бронза се широко примењује као материјал за израду електрода за тачкасто заваривање угљеничних и нискоугљеничних челика. Њене особине, као уосталом и других легура одређује њен хемијски састав, технологија израде и термичка обрада. Тврдоћа термички обрађене хромове бронзе износи 100-110 НВ, а електропроводљивост је 70% у односу на стандардни жарени бакар. Да би се побољшале њене особине легура се излаже термомеханичкој обради, каљењу са температуре 980-100°C и хлађењу у води на 460°C. После овакве обраде тврдоћа хромове бронзе може да се повећа на 140-150 НВ, а електропроводљивост до 80-85% од проводљивости бакра.

Хромна бронза се углавном производи у виду шипки, табли и трака. Табле и траке се испоручују у термички обрађеном стању, после каљења, деформације на хладно (ваљање) и отпуштања, а шипка – после прераде на топло (извлачење или пресовање). У техничким условима за траке и табле количина хрома се ограничава на 0,4-1%, а за шипке до 0,4-0,7%. Садржај хрома у шипкама је смањен због тога што су испитивања показала да већу отпорност поседују електроде од хромне бронзе са 0,4-0,7% хрома.

За израду електрода раније је коришћена и бронза хрома и цинка, која садржи 0,4-1% хрома и 0,3-0,6% цинка. Ипак, испитивања су показала, она нема предности у односу на хромну бронзу, јер цинк чак смањује електропроводљивост па се због тога данас, углавном производи хромна бронза, која не садржи цинк, а примесе не прелазе 0,5%.

Најбољу електропроводљивост, тврдоћу, трајну сточасовну затезну јачину и температуру рекристализације поседује хромна бронза и цирконијум, која поред бакра садржи 0,3-0,5% хрома и 0,2-0,35% цирконијума. У термички обрађеним стањима тврдоћа јој

је 130-145 НВ при проводљивости од 80-85%. Једночасовна затезна јачина на температури од 600°C код хромне бронзе која садржи 0,5-0,8% хрома износи 70-150 МПа, а код бронзе хрома и цирконијума 320 МПа. Трајна сточасовна затезна јачина при 500°C износи 40-160 МПа. Лошије особине хромне бронзе могу да се објасне тиме што се у њој на високим температурама интензивно одвијају дифузиони процеси омекшавања. Ова легура се показала погодном за заваривање нерђајућих челика.

Легура бакра са 0,25-0,45% хрома и малим додацима цирконијума и титана (0,4-0,8%) у термички обрађеном стању поседује тврдоћу 140-150 НВ и способност проводљивости струје од 70-80% од проводљивости бакра. Она је показала велику пластичност на високим температурама. После термомеханичке обраде она има крупнозрнастију структуру него хромна бронза која се серијски производи, што се може објаснити мањим садржајем хрома и примењеним режимом обраде. Висока затезна јачина и пластичност ове легуре, посебно у температурским интервалима у којима раде електроде, затим може количине легирајућих елемената Ti и Zr које повећавају отпорност на сабијање, чине ову легуру једном од најбољих за заваривање нискоугљеничних челика.

Мала способност провођења топлоте и доста висок електрични отпор нерђајућих и ватросталних челика доводи до високог загревања места контакта радне површине електроде са делом. Истовремено висока затезна јачина тих челика на повишеној температури намећу потребу високог притиска електрода да би се постигао што бољи спој. Због тога материјали електрода за заваривање поменутих челика треба да поседују високу тврдоћу (преко 180 НВ) при електропроводљивости која није испод 45% од проводљивости бакра.

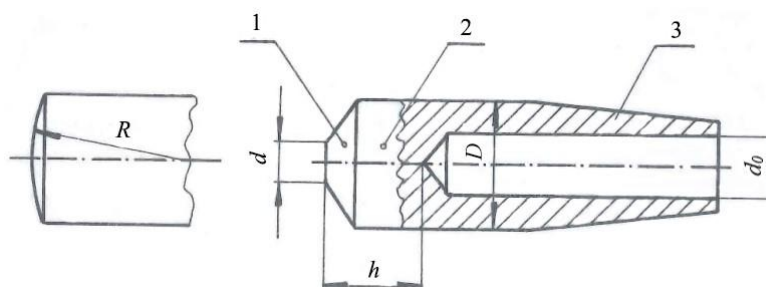
Представници групе бакарних легура које се користе при заваривању нерђајућих и ватросталних челика су легуре: бакар-никл-берилијум и бакар-кобалт-берилијум.

На бази Cu-NiBe-Ti произведена је термална легура бронза НВТ, која садржи незнатну количину титана и производи се од отпадака бронзи са високим садржајем берилијума. Ова се легура доста широко примењује за израду електрода за тачкасто заваривање нерђајућих челика и ватросталних легура.

4.2 КОНСТРУКЦИОНИ ОБЛИЦИ ЕЛЕКТРОДА

Конструкција електроде треба да обезбеди форму и димензије који омогућавају приступ радног дела електроде месту заваривања, да се једноставно али сигурно причвршћује за машину и да јој радне површине буду дуготрајне.

Стандардне електроде се састоје од следећих делова: радног дела (1), дела који се причвршћује на машину (3) и средњег или основног дела (2). Сваки од поменутих делова електроде у процесу заваривања обавља посебну функцију.



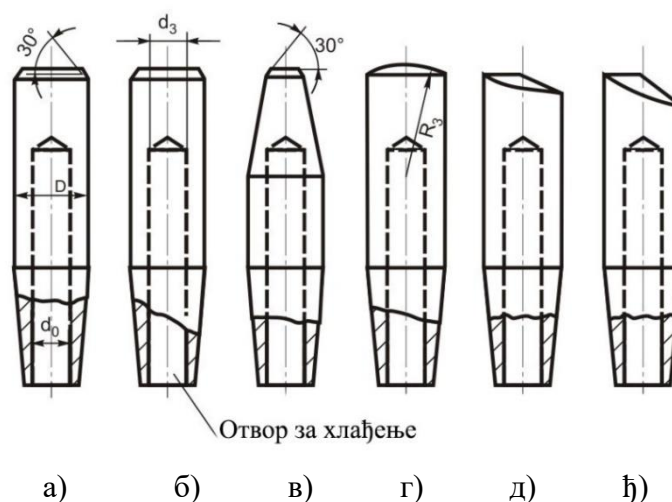
Слика 4.5 Конструкциони елементи електрода

Радни део остварује непосредни контакт са деловима који се заварују и има радну површину чија форма и димензије представљају њихову важну технолошку карактеристику.

Данас се највише примењују две форме радне површине: равна и сферна. Равна радна површина електроде се одређује пречником d_e , а сферна радијусом R .

Средњи део електроде повезује радни део са делом за причвршћивање и одређује се пречником D . У зависности од максималне силе електрода F_z (daN) пречник средњег дела може да се одреди помоћу једначине $D = (0,4 \cdot 0,6) \cdot \sqrt{F_z}$. Средњи део се обично користи за причвршћивање одговарајућих алата који се користе при скидању електрода.

Према конфигурацији средњег дела, електроде за тачкасто заваривање се деле на праве и електроде других облика. Праве електроде се израђују са симетричним распоредом радне површине типови од а) до ђ) на слици 4.6. Највише су заступљене праве електроде, док су много мање заступљене са укошеном радном површином.



Слика 4.6 Облици радних врхова електрода за тачкасто заваривање

Електродама типа а), заварују се црни и обојени метали при директном ходу машине; електродама типа б) нискоугљенични и легирани челици, струјом мањом од 16 kA; типа в) делови ограничени доступним местима; типа г) челични делови дебљине 3 mm; типа д) нискоугљенични и легирани челици, струјама до 25 kA ближим приљубљивањем и типом ђ) делови висећих машина са радијалним ходом. Осим ових електрода, користе се и електроде са радним умецима од синтерованог волфрама или молибдена и примењују се не само за заваривање, већ и за лемљење.

Облик врха електроде утиче на изглед и обликовање заварене тачке. Врх електроде може бити раван и заобљен; такође постоје и електроде специјалног облика које се користе за специјалне случајеве код неприступачних места заваривања (сл. 4.7). Код електрода са равним врхом потребно је водити рачуна при раду да је врх електроде паралелан са површином радних предмета који се заварују.

Код равних електрода пречник заварене тачке може достићи величину отиска врха електроде. При заваривању дебљих лимова због концентрације струје на месту заваривања потребан је мањи радијус врха електроде, а за тањи лим потребан је већи радијус врха електроде.

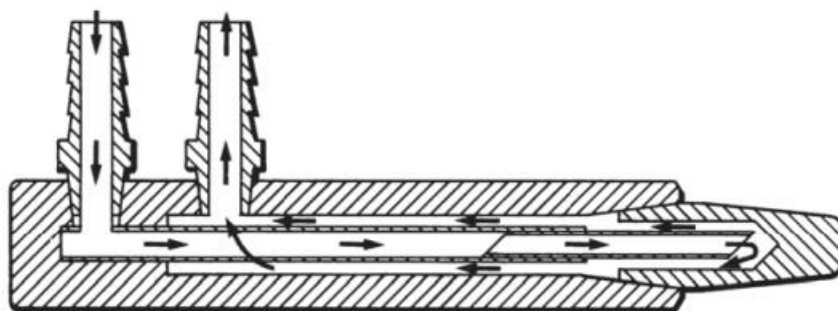
Коничне електроде користе се за заваривање нискоугљеничних, угљеничних и нерђајућих челика, као и ливеног и ковног гвожђа. Електроде од легираног бакра могу издржати више од хиљаду заварених тачака пре накнадног оштрења радног врха.



Слика 4.7 Различити облици електрода за тачкасто електроотпорско заваривање

Унутрашњи део већине електрода за тачкасто заваривање има канал за довод хладне воде. У њему се налази цев за довод воде. Пречник канала се одређује према неопходној количини воде за хлађење и довољној отпорности електрода. Пречник унутрашњег отвора електроде се рачуна према емпиријском обрасцу: $d_0 = (0,5 - 0,6) \cdot d_e$.

Изглед система за водено хлађење електрода приказан је на слици 4.8.



Слика 4.8 Систем за водено хлађење електроде

Растојање од радне површине до дна канала за хлађење битно утиче на карактеристике електрода у експлоатацији. Према литератури треба да буде: $h = (0,75 - 0,8) \cdot d_e$. Дужина конусног дела мора бити такође мања од $1,25 d_e$ (сл. 4.5).

У електроде других облика спадају оне код којих је оса кроз центар радне површине знатно померена у односу на осу монтаже. Код заваривања сложених конструкција са електродама других облика може да се завари до 60% тачака. Понекад се при заваривању различитих метала или делова доста различите дебљине морају користити електроде са малом способношћу провођења струје (30-40)% од проводљивости бакра. Ако се од таквог материјала израђује читава електрода онда ће се она интензивно загревати под утицајем струје заваривања због великог електричног отпора. У таквим случајевима основа електроде се израђује од легуре бакра а радни део од метала који поседује својства неопходна за нормално формирање споја.

Радни део може да буде заменљив или да се причвршћује помоћу навртке на подлогу. Примена електрода овакве конструкције погодна је јер омогућује замену радног дела при промени дебљине и врсте метала од кога су предмети заваривања.

Недостатак електрода са замењивим радним делом је у томе што се могу примењивати само за заваривање делова са лакм прилазом и где је могуће њихово интензивно хлађење. Због тога ове електроде не треба примењивати при тешким режимима и великим брзинама заваривања. Радни део електроде се израђује у виду лемљеног или пресованог наглавка. Наглавци се израђују од волфрама, молибдена или њихових једињења с бакром.

При постављању врха од волфрама неопходно је да се избруси његова цилиндрична површина да би се обезбедила читава веза са електродом. При заваривању делова од нерђајућег челика одебљине 0,9-1,5 mm, пречник уметка од волфрама износи 4-7 mm. При већој дубини избоченог дела долази до прегревања и смањења отпорности електрода.

Електрода са волфрамовим уметком користи се и за тачкасто заваривање поцинкованих лимова. Овде струја расхладне воде треба да буде доведена непосредно на волфрам. Код волфрамових електрода се обично ради са 30% већим површинским притиском него код обичних легура бакра. Остаје ипак проблем који радијус изабрати. Његова величина је одређена спољном величином и дозвољеном величином продирања електроде у лим.

Почетна заобљеност електроде губи се полако током заваривања. Ради тога се мора полако успоставити пораст јачине струје на одговарајућим радним површинама. Циљ овог постепеног повећавања јачине струје је да густина струје приближно остане иста.

Остаје за напомену да се волфрам као материјал за електроде избацује када се не могу дефинисати услови са стране радног предмета и са стране машине за заваривање и њеног управљања. При конструкцији електрода посебна пажња треба да се обрати на форму и димензије основе. Најчешће се примењује конусна основа чија дужина треба да буде најмање 1,25 d_e . Електроде са скраћеним конусом треба примењивати само кад се заварује са малим силама и slabим струјама. Поред конусне основе примењује се и причвршћивање електрода навојем. Овакво причвршћивање електрода може да се примени на машинама за тачкасто заваривање када је важно једнако почетно растојање између електрода.

При тачкастом заваривању делова сложених контура, код којих се тешко прилази местима заваривања примењују се електроде најразличитијих облика, чија је конструкција сложенија него код правих, па су због тога мање погодне за експлоатацију и по правилу су краћег века. Због тога електроде других облика треба примењивати само у случајевима када је примена правих немогућа. Димензије и форма електрода различитих облика зависе од димензија и конфигурације делова, као и конструкције носача електрода и конзола машина за заваривање.

На електроде различитог облика у процесу рада обично делује доста велики момент савијања, који се мора имати у виду при избору и конструкцији електрода. Момент савијања и обично мали пресек конзолног дела изазивају знатне еластичне деформације. Због тога је неизбежно узајамно померање радних површина електрода, посебно ако је једна права а друга није. Зато је код електрода других облика најпогоднија сферна радна површина. Код електрода других облика, које су изложене моменту савијања, могућа је деформација конусне подлоге за монтирање и лежишта носача електроде. Да би се избегла деформација њихове конусне основе, такве електроде се додатно причвршћују за спољашњу површину носача електрода помоћу подметача и ваљка. Чврстоћа таквих електрода са великим ходом се знатно повећава уколико се ураде из више спојева (армирање). Због тога основни део електроде се израђује од челика, а средњи део од легуре бакра. Овакви делови могу да се споје лемљењем и да се за челичну потпору причврсте ваљцима. Могућа је и конструкција код које се електрода од бакарне легуре појачава челичним елементима, али да они око електроде не формирају затворени прстен пошто ће се у њему индуковати струја и превише загревати електроде. Електроде различитих облика, које су изложене великом моменту

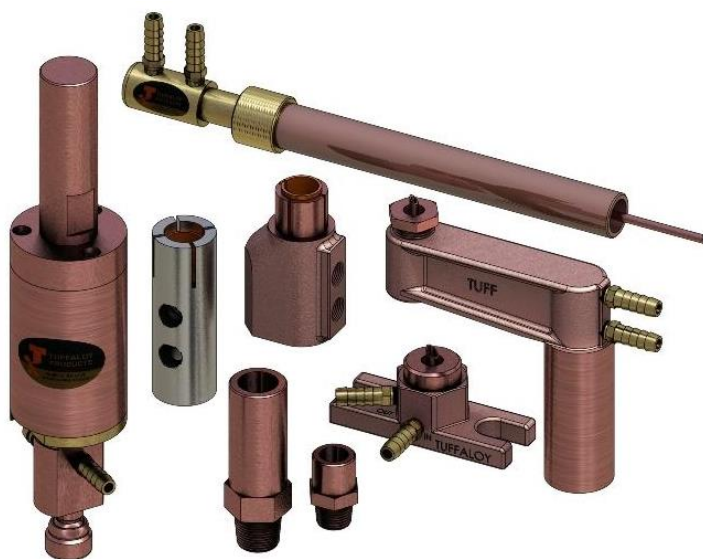
савијања, треба израђивати у виду издувних цилиндара како би се на машини постављале без специјалних носача.

У већини случајева при тачкастом заваривању примењује се унутрашње хлађење електрода. Ако се заварује електродама малог пресека или на високим температурама, а материјал који се заварује није подложен корозији, треба применити спољашње хлађење. Вода за хлађење се доводи или специјалним цевима или кроз отворе у радном делу. Велике тешкоће се јављају при хлађењу електрода које нису праве јер се вода у неким случајевима не може довести непосредно на радни део због малог пресека конзолног дела електрода.

Пошто се електроде различитог облика теже хладе од правих често се мора прибегавати знатном смањењу темпа заваривања и не сме се дозволити прегрејавање радног дела електроде и опадање њене отпорности.

Најзад при тачкастом заваривању постоји још један вид електрода, то су специјалне електроде у које спадају самоподешљиве (које шетају) електроде које врше улогу уметнутих проводника и др. Треба нагласити да висок квалитети и поузданост спојева као и потребна продуктивност процеса тачкастог заваривања може да се постигне само под условима оптималне усаглашености својстава метала електроде, конструкције форме и димензија њихове радне површине, као и правилне експлоатације.

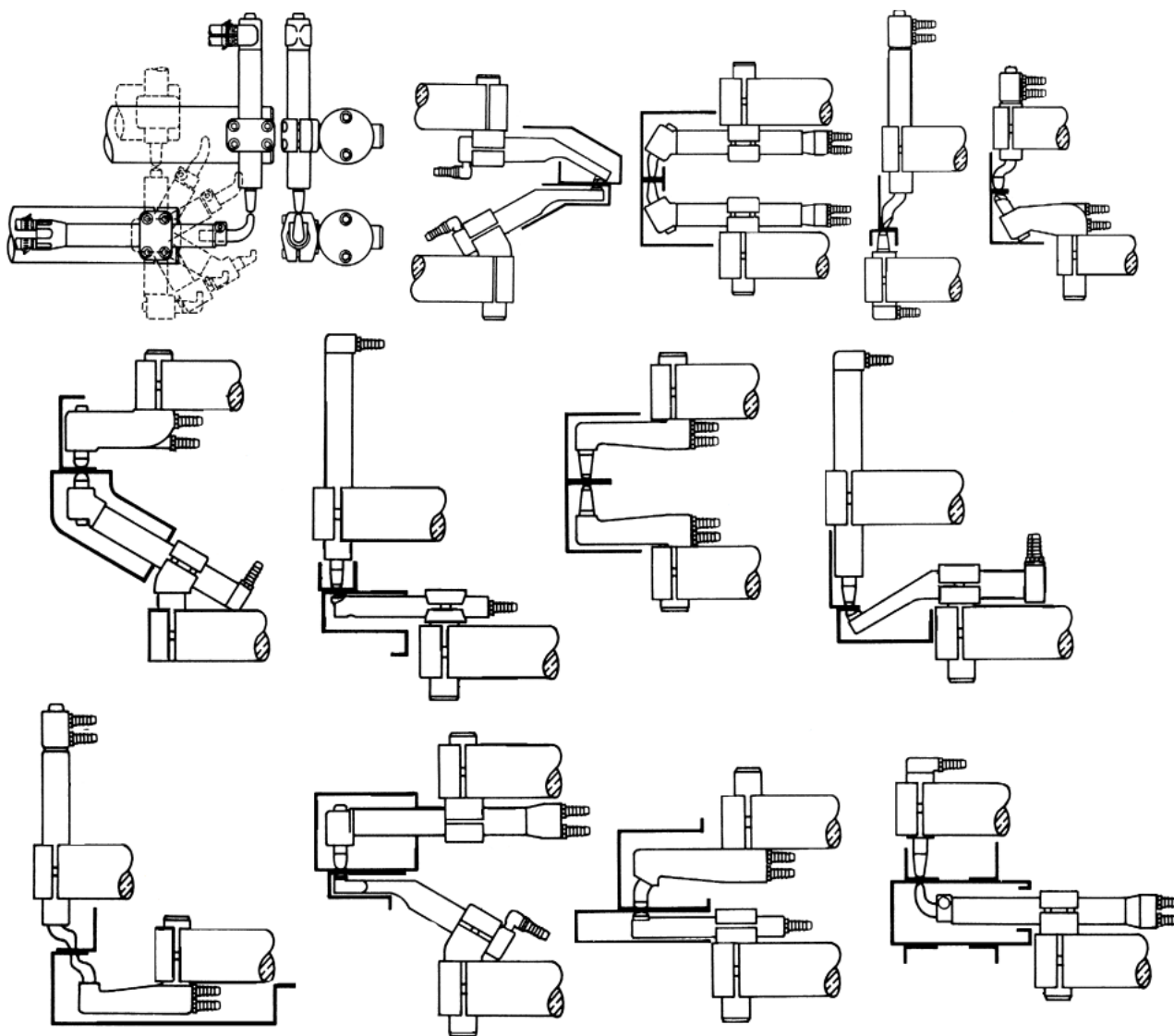
Делови електроде, помоћу којих се причвршћују за елементе секундарног кола машине, треба да задовоље услове преношења струје и силе сабијања. Код електрода за тачкасто заваривање ову функцију у већини случајева обавља конусни део за монтирање.



Слика 4.9 Различити облици држача електрода

Већина држача има механизам за избацивање електрода и прикључке за црево за хлађење водом. Држачи се израђују у изведбама равних и измештених елемената за конусне и навојне носаче електрода или адаптера, као и за електроде типа тастера и капе. Држачи електрода са конусним осовинама могу бити равни али имати одступања од 90° или 30° . Већина држача електрода са навојним носачима је равна. Универзални држачи имају релативно дугачак танак продужетак у који се убацују електроде типа тастера.

Неке комбинације стандардних држача, адаптера који омогућавају руковање различитим конфигурацијама за обраду и извођење тачкастих спојева приказане су на слици 4.10.



Слика 4.10 Комбинације стандардних држача, адаптера и електрода за тачкасто заваривање са различитим конфигурацијама радних делова

Вишеструки држачи електрода користе се за истовремено заваривање две или више тачака применом конвенционалних машина за тачкасто заваривање. Ови држачи, који се углавном користе за горње електроде, имају опруге, механичке уређаје или хидрауличне изједначиваче тако да свака електрода преноси подједнаку силу на радне комаде.

Једнака сила електроде за сваки остварени тачкасти завар помаже у одржавању јединственог квалитета зава. Електроде се могу повезати на трансформатор у различитим распоредима за директно или серијско тачкасто заваривање.

Да би се постигао добар електрични контакт монтажне површине треба да буду обрађене и на њима не сме бити механичких оштећења, трагова оксидације и других оштећења, као и прљавштине.

Конусни монтажни део електрода представља наставак њиховог средњег дела. За пречнике електрода 12, 16, 20, 25 mm усвојена је конусност 1:10, а за пречнике 32 и 40 mm, ради лакшег скидања електрода 1:5. Пошто отвори за подешавање на носачима електрода имају исте димензије, то наведене димензије електрода треба примењивати и при изради електрода других облика.

4.3 САВРЕМЕНИ ЕЛЕКТРОДНИ МАТЕРИЈАЛИ

Дисперзионо ојачани бакар $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ је озбиљније испитиван за употребу за израду електрода за електро заваривање, а за тачкасто заваривање од 1972. године. Разлог за ово је био тај што је он задовољавао спецификацију RMWA класе 2 материјала. Уз то овај материјал је имао јако изражену отпорност према омекшавању (топљењу) при излагању високим температурама. Такође је имао одличне особине у вези са ломљењем при кратком усијању, што га је све заједно истицало за употребу у условима тачкастог заваривања и чинило га најпогоднијим за израду електрода за електроотпорско заваривање.

Уопште ови материјали су знатно бољи од конвенционалних материјала класе 2 при примени у лаким условима, али не много бољи од њих при примени у тешким условима (великим оптерећењима). Истраживачи су покушали да пронађу због чега се јавља ова појава и већ почетна истраживања су довела до открића да ојачани бакар није испунио очекивања у погледу структуре. Високо влакнаста структура доводила је до појаве пукотина међу влакнима у условима високог оптерећења, што проузрокује претерану појаву замора (прскања) материјала. Са овим подацима истраживачи су даље настојали да влакнасту грађу преведу у зрнасту. Зрнаста структура елиминише појаву међувлакнастих пукотина што знатно побољшава попречну јачину. Из овога је проистекло значајно побољшање електрода у најважнијим производним циклусима што је доказано и при лабораторијским испитивањима.

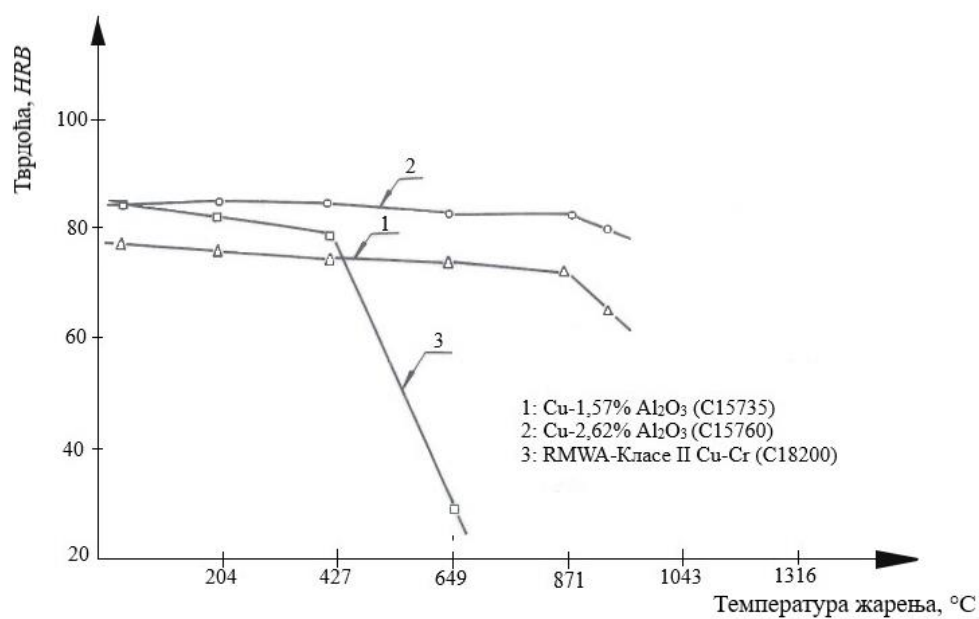
Ојачани бакар (Dispersion Strengthened Copper) је направљен од стране [Glidden Metals Group of SCM Corporation] процесом у коме алуминијум растворен у бакарној матрици оксидише како би формирао алуминијум оксид - глиницу. Свако зрнце праха садржи субмикроскопске ситне честице алуминијумовог оксида унутар бакарне матрице. Квантитет и квалитет ове дисперзије одређује механичке и физичке особине ових материјала. Разбијени и ојачани прах се загрева и истискује да би се прах формирао у облик шипки или жица. Ове форме се потом хладе и доводе у жељени облик и величину на исти начин као и конвенционалне легуре бакра за производњу електрода. Овај материјал сада представља сировину за израду електрода за тачкасто заваривање или друге електричне компоненте.

Индустријска испитивања су показала да је постојаност електрода од ојачаног бакра 4 до 5 пута дужи од електрода за заваривање класе 2. Једно од најинтересантнијих открића је да се материјал дисперзионо ојачан бакром помоћу Al_2O_3 не лепи при заваривању поцинкованих лимова. Дужи век трајања се показивао увек кад се заваривање обавља одговарајућим режимима. Произвођачи аутомобила почели су примењивати лимове веће отпорности према корозији, тј. површински заштићене лимове. Применом (DSC) ојачаног бакра успели су да смање проблеме у производњи и да истовремено смање издатке за електроде.

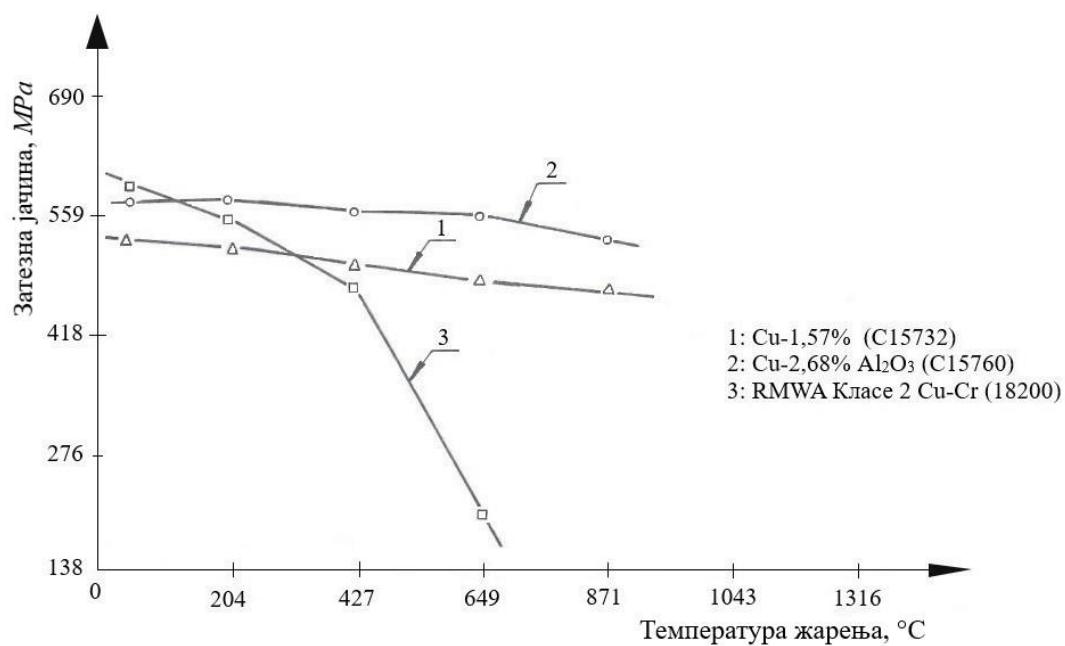
Извесне основне особине ојачаног бакра које су биле претходно описане, сажете су у табели 4.3 и приказане на слици 4.11а,б, на којима су дате особине бакарне шипке са садржајем Al_2O_3 - Cu -1,57% Al_2O_3 (C15735) и Cu -2,68% Al_2O_3 (C15760) за које важе стандарди чврстоће за класу 2 електрода. Слика 4.11 приказује утицај температуре жарења на тврдоћу и јачину две шипке.

Таблица 4.3 Утицај температуре жарења на особине ојачаног бакра

Упоређивани материјали	Тврдоћа, HRB	Ел. проводљивост, %	Затезна јачина, МПа	Издужење, %
C 15735	77	87	77000	18
C 15760	84	82	83000	13
RMWA Класе 2	75	75	65000	13



а)



б)

Слика 4.11 Утицај температуре жарења на: а) тврдоћу и б) затезну јачину

Са друге стране понашање конвенционалног материјала класе 2 (C18200) показује да проводљивост опада као функција температуре жарења. Легура (C18200) је отврднута таложењем легура и појава смањене проводљивости је резултат таложења хрома који чини да проводљивост опада. Применом ојачаног бакра доказана је уштеда од 15%. Са ценама енергије високим као што су сад, и са перспективом даљег повећања ово се јавља као врло важан критеријум при избору материјала за електроде.

Код савремених уређаја за заваривање примењује се аутоматско управљање са тачно дозираним количинама утрошене енергије, тако се нпр. повећава јачина струје кад се врх електроде прошири и добије печуркасти облик.

Иако је примена електрода од ојачаног бакра привлачна, многа истраживања су показала да се ове електроде не понашају много боље од конвенционалних електрода класе 2. Трошкови примене ојачаног бакра су приближно четири пута већи од електрода класе 2, што их не чини ефикасним решењем у свим апликацијама.

4.3.1 Електродне превлаке

Реакција цинка из челичних превлака са електродом на бази бакра идентификована је као кључни фактор у смањењу постојаности електрода. За формирање легираних слојева потребно је присуство цинка да дифундира у бакар. Ако се цинку не дозволи да дође у контакт са основним материјалом електроде, реакција би могла да се спречи. То се може постићи употребом електродних превлака које служе као дифузиона баријера.

Дизајн поступка превлачења, као и материјал може омогућити да наношење превлака електрода буде економично решење за продужење века врха и побољшање заваривања. Циљ је пронаћи материјал за облагање који се неће легирати цинком и остати нетакнут како би заштитио электроду без утицаја на заварљивост електроде на негативан начин.

Индустријски процеси попут превлачења површине из парне фазе (PVD - Physical vapor deposition), хемијске депозиције слојева филма или превлака из парне фазе (CVD - Chemical Vapour Deposition), термичког распршивања и метализације великим брзинама у струји продуката сагоревања (HVOF - High-Velocity Oxygen Fuel) могу се користити за наношење слојева на површине за површинску и заштиту од корозије. Ови процеси обично захтевају да се основни материјал загрева. Природа радног циклуса заваривања електрода захтева површински слој који ће издржати поновљене ударне температурске циклусе.

Титан карбид (TiC) је јак и тврд керамички материјал који се већ дуже време користи у индустрији алатних и машинских обрада и одликује се отпорношћу на хабање. Добра електрична и топлотна проводљивост у комбинацији са великом тврдоћом и чврстином учинили су TiC идеалним за проблем са хабањем електрода за заваривање. Употреба површинског инжењерског решења за ограничавање цинка из бакра и на тај начин спречавање проблема са трошењем електрода повезаних са поцинкованим челиком постао је разуман приступ. Nuys Industries је прихватила овај приступ и производи TiC обложене електроде које се у индустрији користе већ неколико година. Побољшање у односу на непревучене електроде при заваривању челика обложених цинком примењивано је у пракси и показало се решеним.

Развојем нових електродних материјала животни век електрода се може повећати. Развој нових челичних превлака које су у стању да се одупру корозији, а које мање негативно утичу на процес заваривања од постојећих лимова се показало оправданим. Повећањем дужине врха електроде показало се да температура површине електроде током заваривања пада за више од 100°C. Евентуалну деградацију ефектом цинка тренутно није могуће зауставити. Међутим, електрода пресвучена TiC представља посебно занимљив приступ решавању проблема.

5. МЕТОДИ КОНТРОЛЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

У свим фазама извођења технологије заваривања где се води рачуна о начину заваривања, као његов саставни део мора постојати поступак контроле завареног споја у процесу његовог настајања, јер заварени спојеви морају осигурати довољно висок ниво поузданости.

Контрола заварених спојева се може поделити на:

- 1) Контролу без разарања и
- 2) Контролу са разарањем.

5.1 МЕТОДЕ КОНТРОЛЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА БЕЗ РАЗАРАЊА

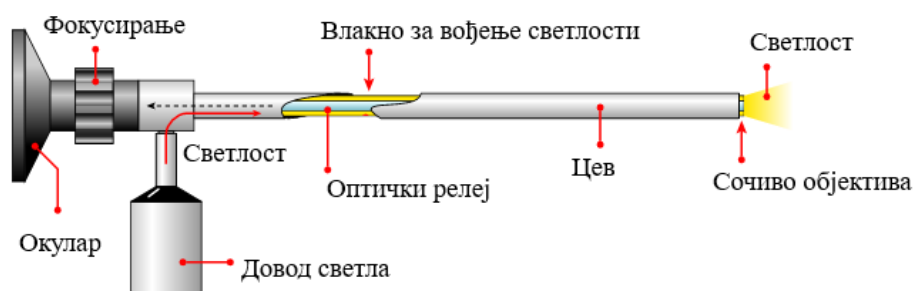
То је контрола која својим деловањем не утиче на својства завареног споја. Пошто служи за откривање и одређивање површинских грешака у завареном споју има назив и дефектоскопија. Недостатак ове методе је у томе што открива грешке које су настале после заваривања. Не може послужити у спречавању настанка процесних грешака.

У испитивања без оштећења завареног споја спадају:

- спољашњи преглед (визуелна контрола),
- пенетрантне пробе,
- радиографске пробе (рендгенским x и γ - зрацима),
- магнетна и
- ултразвучна испитивања.

5.1.1 Визуелна контрола

Визуелном контролом се могу открити разне површинске грешке: веће пукотине, непроварен корен, површинске неправилности облика лица и корена зава. Визуелна контрола је оријентациона метода у оцени квалитета завареног споја. За визуелну контролу површина треба да буде чиста, а светлост довољно јака. Ова метода контроле релативно је јефтина, не одузима пуно времена, а може дати врло корисне информације како о квалитету заварених спојева, тако и о потреби контроле неком другом методом. Као помоћ код визуелне контроле у скученим и неприступачним деловима конструкције користе се лупе различитог степена увећавања и локална осветљења.



Слика 5.1 Бороскоп, уређај који се понекад користи за визуелну контролу

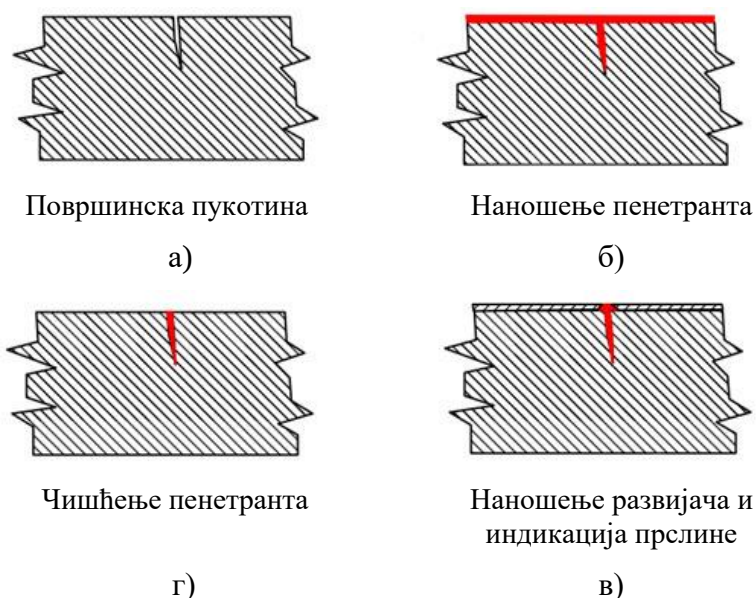
5.2 Пенетрантне пробе

Пенетрантна или капиларна дефектоскопија јесте најстарији начин контроле заварених спојева. Откривају се грешке које излазе на површину као нпр. поре, напрслине, нехерметичност и слично.

Пенетранти су у ствари течности црвене боје мале вискозности или течности са додацима флуоресцентних материја. Испитивање се заснива на капиларном продирању течних пенетраната у површинске грешке и затим уочавању тих грешака. Стога је за овај вид контроле потребно припремити: средство за чишћење површине испитиваног споја (технички-денатурисани алкохол, бензин, трихлоретилен), пенетрант, развијач.

Испитивана површина се најпре пажљиво очисти, а затим нанесе пенетрант (данас углавном у облику спреја) који треба да делује 5 до 15 min. После тога се растварачем уклања вишак пенетранта и спој пере водом. Најзад се наноси развијач (може суспензија праха креде у води) који извлачи пенетрант стварајући црвену линију или црвене тачкице.

Слична је и контрола флуоресцентним пенетрантима, стим што се на крају испитивана површина осветљава ултраљубичастим зрацима помоћу специјалних UV лампи и тиме грешка лакше запажа.

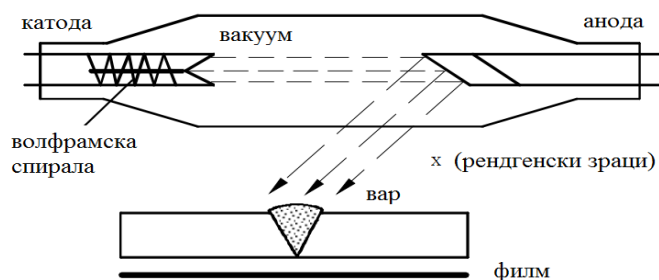


Слика 5.2 Схематски приказ процедуре спровођења испитивања пенетрантима

5.2.1 Радиографска проба

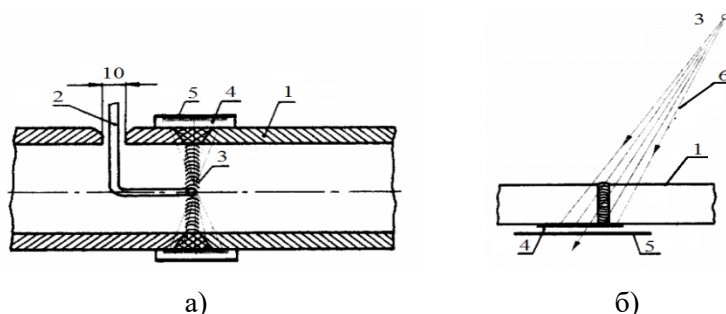
Рендгенско испитивање заснива се на продирању x -зракова створених у рендгенској лампи (слика 5.3) изложеној високом напону. Електрони емитовани из катодe (спиралне волфрамске жице) ударају о аноду и ту се емитују x -зраци који се усмеравају на шав (вар). Места грешки у завареним спојевима, нпр. непровар, неметални укључци и поре, лакше пропуштају x -зраке и фотографска плоча - филм (на супротној страни споја) постаје више осветљена. Неке грешке, нпр. надвишење шава, доводе до слабијег осветљавања плоче. После развијања плоче добија се радиограм (снимак) на коме се могу уочити грешке на основу тамнијих и светлијих места.

Испитивање γ -зрацима изводи се помоћу специјалних радиоактивних изотопа: кобалта, цезијума, иридијума и др.



Слика 5.3 Схема испитивања завареног споја рентгенским зрацима

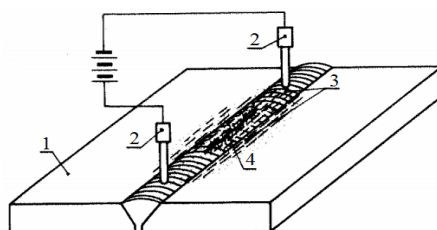
Ампуле са радиоактивним изотопом постављају се на испитивано место са једне стране споја, а са друге стране ставља се најпре плоча, а преко ње заштитна оловна фолија. Гама зраци пролазе кроз метал шав и осветљавају плочу на којој се могу уочити места грешки. За цеви или резервоаре већег пречника испитивање се изводи по кругу (сл. 5.4а), а за мање пречнике по елипси (сл. 5.4б).



Слика 5.4 Схема испитивања заварених цеви γ -зрацима: а) програчивање по кругу; б) програчивање по елипси: 1- цев, 2- доводиоће изотопа, 3- изотоп, 4- фотографска плоча, 5- оловна заштита, 6- γ -зраци

5.2.2 Магнетна метода

Магнетно испитивање изводи се помоћу мешавине гвозденог праха и машинског уља којом се посипају добро очишћене површине испитиваног метала. Затим се специјалним електромагнетним уређајем образује магнетно поље на испитиваном одсечку завареног споја. Ако спој садржи површинске грешке или се оне налазе на дубини до 6 mm, онда ће линије магнетног поља мењати свој правац због прекида метала, а гвоздени прах ће се скупљати око грешке и на тај начин открити место грешке (сл. 5.5).

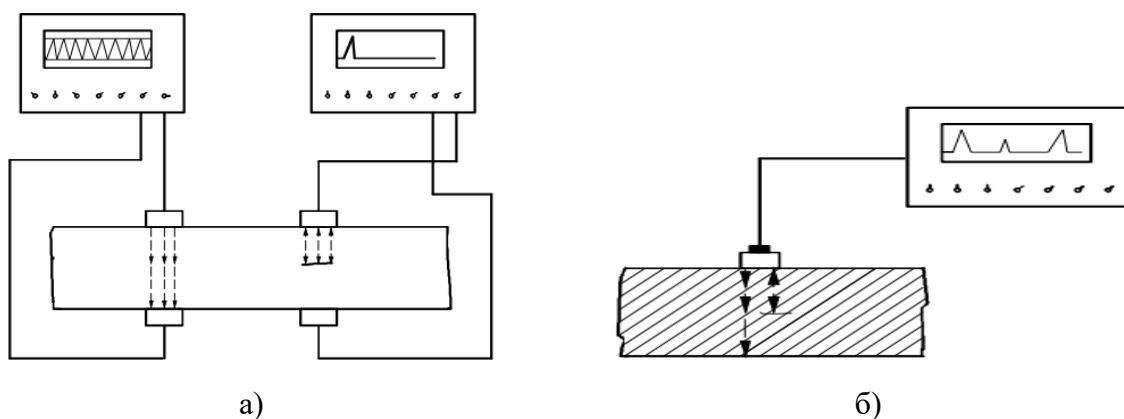


Слика 5.5 Схема магнетног испитивања: 1- заварена плоча, 2- електроде за доводиоће електричне струје, 3- гвоздени прах, 4- уочена прслина у шаву

Помоћу ове методе се најчешће откривају грешке типа пукотина, зареза и већих укључака нарочито оних уз или близу површине шав. Недостатак ове методе јесте тај што не одређује димензије грешке и не може се примењивати грешке веће дубине ($> 6 \text{ mm}$).

5.2.3 Ултразвучна испитивања

Ултразвучно испитивање изводи се помоћу ултразвучних таласа високе фреквенције (0.5-6 милиона осцилација (импулса) у секунди, (MHz)). Ултразвучни таласи уводе се у испитивани метал помоћу сонде (глава и давач), а у неким случајевима испитивана површина се квази минералним уљем или водом, да би се добио акустични спој између испитиваног предмета и сонде. Ако на путу кретања таласа кроз метал постоји грешка у облику мехура, троске, прслина, налепина или других некомпактности метала, настаје преламање и одбијање тих таласа и њихово враћање до извора емитовања-ехо ефекат (сл. 5.6б). Извор таласа је на бази пиезоелектричног ефекта који претвара електричне у механичке осцилације и обрнуто. Ултразвучни таласи одаслати из давача одбијају се делом од површине грешке, а делом од супротне површине предмета, те се враћају у претварач у коме се трансформишу у електрични напон. Тај напон се појачава у претварачу и изазива светлосни импулс на екрану осцилографа, који указује на постојање и локацију грешки у унутрашњости испитиваног материјала (сл. 5.6).



Слика 5.6 Ултразвучна контрола: а) метод пригушења, б) ехо- метод

Предности примене ултразвучних метода контроле заварених спојева се огледају у следећем:

- није битна дебљина предмета,
- потребан је приступ само с једне стране,
- околина нема утицај на методу,
- уређај и прибор су мали и лако преносиви,
- не захтева допунска заштитна средства и др.

Недостаци су:

- сложени геометријски облици могу бити непогодни за спровођење,
- увежбавање оператора је дуготрајно и
- поуздано одређивање грешке захтева приступ с више страна, а тиме значајан утрошак времена.

Без обзира на недостатке ова метода је у широкој примени при контроли заварених спојева. Посебно је прикладна за откривање прслина, али се користи и за откривање других грешака у завареном споју.

5.3 МЕТОДЕ КОНТРОЛЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА СА РАЗАРАЊЕМ

Контрола са разарањем изводи се на узорцима који се исецају из појединих делова завареног споја, или на споју у целини. Углавном се узорци припремају за механичка и металографска испитивања.

Од механичких проба најчешће се изводе:

- 1) Испитивање затезањем,
- 2) Испитивање савијањем и
- 3) Испитивање ударне жилавости.

Од металографских проба у примени су *макроскопска* и *микроскопска* испитивање.

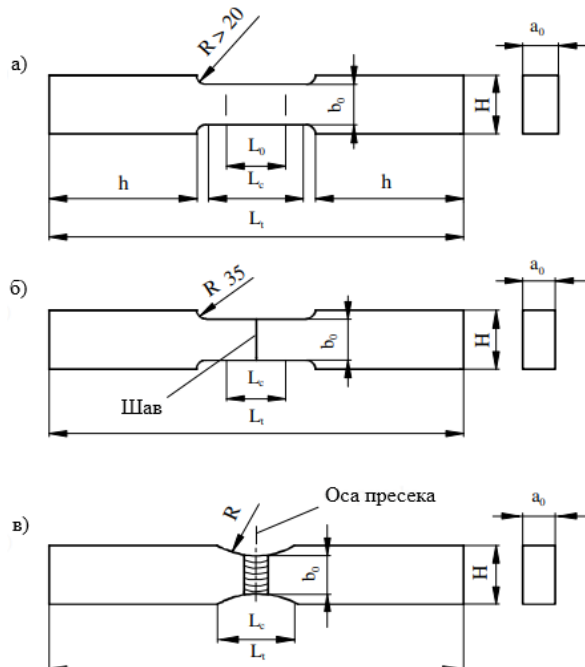
5.3.1 Испитивање затезањем

Овим се испитивањем одређује отпорност завареног споја на дејство спољних затезућих сила. Уопште се пробом на затезање одређује јачина на кидање (R_m , МПа), издужење (A_5 , A_{11} , %) и сужење (Z , %). Приликом овог испитивања, најпре се одређују механичке особине основног материјала (сл. 5.7а), а затим завареног споја: на пробама са паралелним (слика 5.7б) и удубљеним боковима (сл. 5.7в).

Радна или мерна дужина незаварене пробе треба да буде $L_0 = 5 \cdot d_0$, где је: $d_0 = 11.3 \cdot \sqrt{S_0}$. Остале димензије пробе, у *mm*, дате су у табелици 5.1.

Таблица 5.1 Епрувете за испитивање затезањем ОМ и заварених спојева

a_0	b_0	H	W	L_0	L_c	L_t
15	30	40	70	120	135	305



Слика 5.7 Пробе испитивања затезањем: а) за одређивање механичких особина основног материјала, б) заварен узорак са паралелним боковима, в) заварен узорак са удубљеним боковима

Циљ испитивања затезањем је да се одреде следеће карактеристике основног материјала:

- Затезна јачина (чврстоћа):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ MPa.} \quad (5.1)$$

- Релативно процентуално издужење:

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100, \% . \quad (5.2)$$

- Напон течења или технички напон течења:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0} \text{ или, } \left(R_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0} \right), \text{ MPa} \quad (5.3)$$

где је:

F_m - максимална сила, N ,

S_0 - површина почетног попречног пресека пробе, mm^2 ,

ΔL - трајно издужење прекинуте пробе, mm ,

F_p ($F_{0,2}$) - сила на граници течења, N ,

L_0 - почетна дужина пробе, mm .

- Модул еластичности:

$$E = \frac{F \cdot L_e}{\Delta L \cdot A_0}, \text{ MPa,} \quad (5.4)$$

где је:

F - сила затезања, N ,

L_e - усвојена мерна дужина екстензометра, mm ,

S_0 - попречни пресек пробе, mm ,

ΔL - издужење (еластично), mm .

Пробе са паралелним боковима (сл. 5.7б), намењене су за одређивање механичких особина споја у целини; димензије проба (у mm) дате су у табlici 5.2.

Таблица 5.2 Заварене пробе са паралелним боковима за испитивање затезањем

a_0	d_0 20	20÷50	> 50
b_0	25	30	30
H	35	40	40
L_t	250	300	350
L_c - +10 mm			

Пробе са удубљеним боковима (сл. 5.7в) намењене су за одређивање механичких особина самог шав; потребне димензије (у mm) дате су у табlici 5.3 ($L_t = 250 mm$).

Таблица 5.3 Заварене пробе са удубљеним боковима за испитивање затезањем

a_0	d_0 5	5÷10	10÷15	15÷20	20÷25	25÷30
b_0	15	25	35	25	20	30
H	30	40	50	40	35	45

Затезна јачина споја као целине рачуна се по изразу (5.1), а јачина метала шава према изразу:

$$R_m = 0.926 \cdot \frac{F_m}{A_0}, \text{ MPa} \quad (5.5)$$

где се коефицијентом 0.926 коригује привидно повећање јачине настало као последица ометеног истезања због облика пробе, тј. троосног напонског стања.

Приликом анализе добијених резултата, треба имати у виду чињеницу да се заварен спој састоји од основног материјала, зоне утицаја топлоте и претопљеног и измешаног основног и додатног материјала (шав, вар). Механичке особине споја у целини не могу се одредити по принципу најслабије карике у ланцу, будући да и најслабија компонента у завареном споју ојачава због ометаног деформисања.

Емпиријска је чињеница да се проба углавном разара у ЗУТ-у, што значи да је основни материјал ослабљен деловањем термичких циклуса. Супротно, заварени спојеви са великим дефектима (укључујући треске, поре, непровар) кидају се на местима грешки.

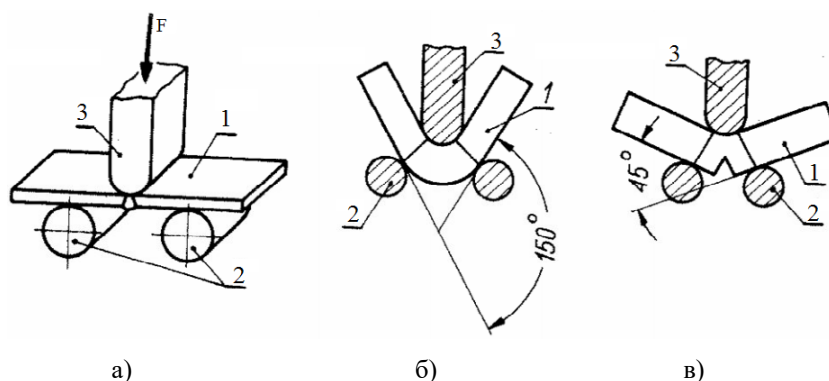
Издужење се при испитивању не мери, јер се проба састоји из три различита материјала (ОМ, ЗУТ, шав), који се и друкчије издужују. Будући да је реч о материјалима различитих јачина и дуктилности, каже се да је заварен спој механички анизотропан. Степен нехомогености изражава се коефицијентом механичке неравномерности (k_m):

$$k_m = \frac{R_{0.2}^s}{R_{0.2}} \quad \begin{array}{l} < 1 - \text{слабији шав од основног материјала} \\ = 1 - \text{хомоген спој} \\ > 1 - \text{јачи шав од основног материјала} \end{array} \quad (5.6)$$

где су: $R_{0.2}^s$ и $R_{0.2}$ - технички напон течења шава и ОМ.

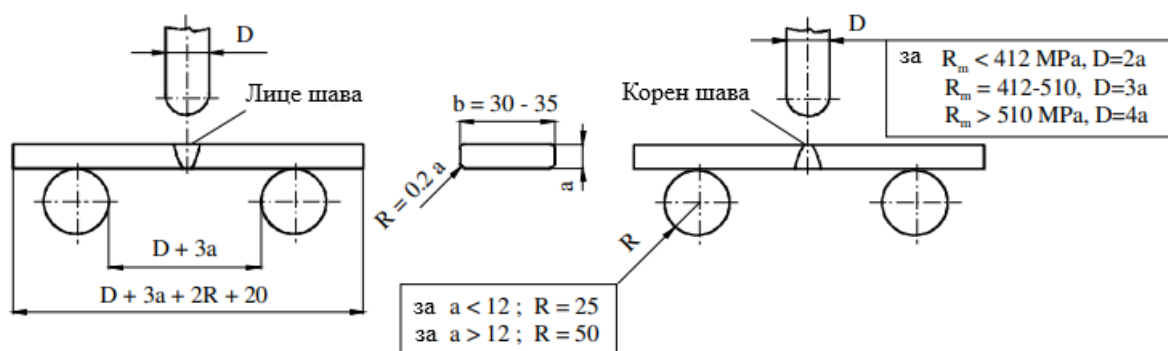
5.3.2 Испитивање савијањем

Испитивање савијањем које има за циљ да се одреди деформациона способност шава и зоне утицаја топлоте, изводи се према стандардизованим условима датим на слици 5.8.



Слика 5.8 Испитивање савијањем: а) почетни положај, б) проба без грешки у шаву, в) прскање шава при малом углу савијања; 1- заварена проба, 2- ваљци за ослањање, 3- притискивач

Две пробе, једна са лицем шава у зони затезања, а друга са кореном шава у тој зони, испитују се непрекидним савијањем брзином око 2 mm/s, све до појаве прслине величине преко 2 mm. Мера пластичности је угао савијања при појави прслине.



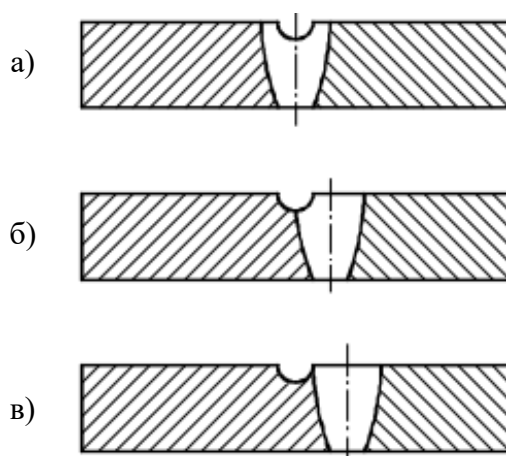
Слика 5.9 Испитивање савијањем

За разлику од стандардизованих проба које се изводе на лабораторијским машинама, радионичко испитивање може се извести ручно помоћу чекића, стеге и алата за савијање.

5.3.3 Испитивање ударне жилавости

Циљ овог испитивања је да се одреди отпорност материјала на дејство ударних динамичких сила. Стандардизована ударна жилавост одређује се на сучеоним спојевима дебљине преко 10 mm, јер то одговара стандардном попречном пресеку епрувете (пробе) за методу Шарпи.

Одређује се жилавост: метала шав, зоне стапања и зоне утицаја топлоте (сл. 5.10а,б,в).



Слика 5.10 Пробе (Mesnager) за испитивање жилавости: а) проба за жилавост шав, б) проба за жилавост зоне стапања, в) проба за жилавост ЗУТ-а

Ударна жилавост одређује се помоћу Шарпијевог клатна на коме се читава расположиви рад (A_1) и неутрошени рад (A_2) и затим рачуна утрошени рад за лом епрувете (A_0):

$$A_0 = A_1 - A_2, J \quad (5.7)$$

Као мерило жилавости по Шарпију узима се утрошени рад за лом епрувете (A_0) у Џулима ($J = Nm$). Жилавост се углавном испитује пре избора основног материјала, додатног материјала, поступка и технологије (мисли се на коначан избор) при изради значајних заварених конструкција као нпр. судова под притиском, мостова и сличних спојева код којих постоји опасност од кртог лома.

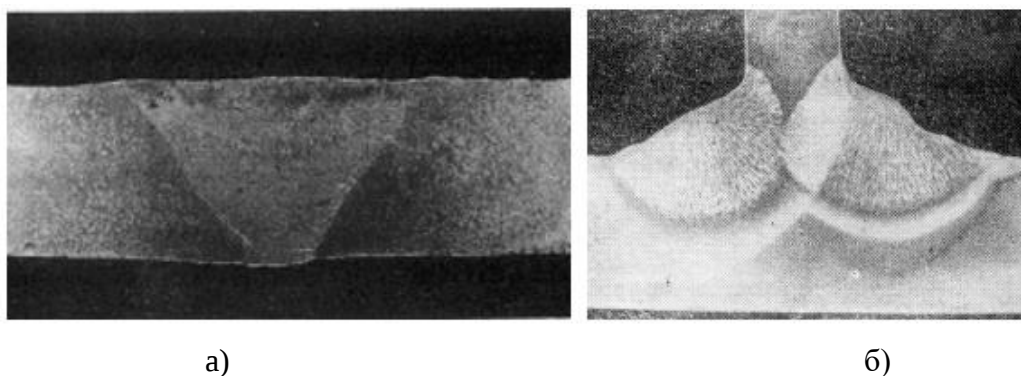
5.3.4 Металографска испитивања

Разликују се *макроскопска* и *микроскопска* испитивања.

Макроскопска испитивања се заснивају на посматрању, голим оком или са лупом повећања до $20\times$ малог узорка исеченог из завареног споја. После брушења и полирања површине попречног пресека добија се металографски избрусак тзв. "шлиф", који се нагриза специјалним хемијским средством. Нагризање омогућава да се уоче метал шавва, ЗУТ и основни метал (сл. 5.11). На основу макроскопских испитивања утврђује се линија стапања, регуларност зоне утицаја топлоте, као и грешке облика шавва и спољни мехурови, налепине, укључци трске и тсл.

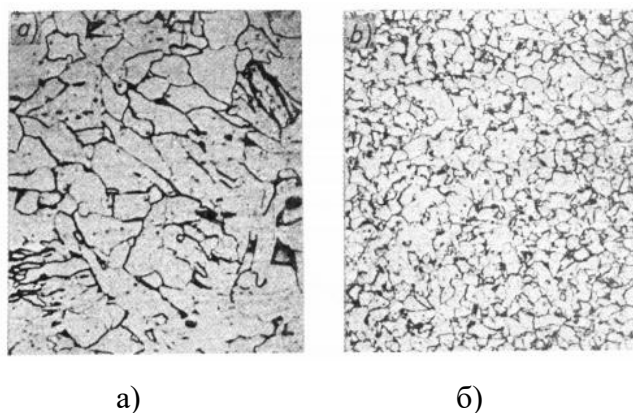
При макроскопском утврђује се дубина уваривања, надвишење шавва и остале грешке облика и грешке као што су: зарези, гасни мехурови, укључци у тврдом стању, налепљивање и евентуалне прслине.

При микроскопском утврђују се врсте структура метала шавва и ЗУТ-а, укључци, присуство прелазних-каљених врста структура, металних и неметалних укључака, а такође прслина и микропрслина, микроукључака, као и гасних мехурова малих димензија.



Слика 5.11 Макроструктура завареног споја: а) сучеоног и б) угаоног

Микроскопска испитивања заснивају се на посматрању пробе под микроскопом при повећању $200-500\times$ (и више). После полирања и нагризања пробе, постаје видљива микроструктура шавва и завареног метала. Груби кристали у шаву или зони утицаја топлоте указују на прегревање шавва (сл. 5.12а). Овакви спојеви су обично крти што се може поправити ако се заварени део нормализационо жари чиме се добија уједначена и ситнозрнаста структура (сл. 5.12б).



Слика 5.12 Структура шавва: а) прегрејаног и б) нормализационо жареног

5.4 МЕТОДИ КОНТРОЛЕ ТАЧКАСТО ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

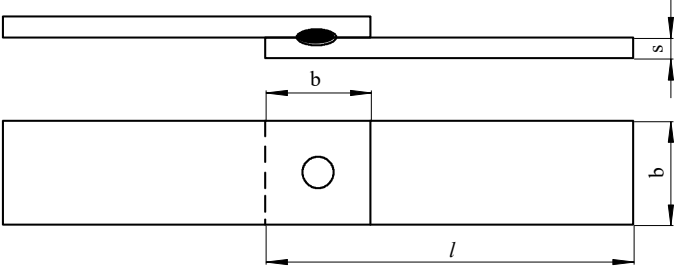
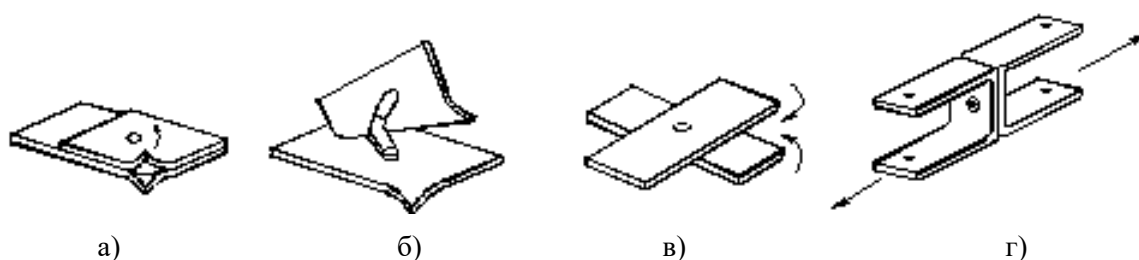
Тачкасто заварени спојеви повремено се контролишу на узорцима завареним истом технологијом као и дати производ. Квалитет изведеног заваривања се утврђује технолошким пробама, испитивањем микроструктуре и одређивањем јачине споја. Димензије проба за одређивање јачине споја дате су у табели 5.4. При испитивању затезањем разарање може настати: смицањем сочива, чупањем сочива и кидањем лима.

Разарање чупањем (откопчавањем) сочива дешава се код материјала веће пластичности (легури Al-Mn, Al-Mg) и уопште код спојева на тањим лимовима ($0.3 \div 0.8 \text{ mm}$). Спојеви лимова велике јачине или велике дебљине разарају се смицањем. Том приликом откривају се унутрашње грешке сочива: напрсине, порозност, прскотине (распрскивање). Заварени спојеви који се разоре кидањем лима показују да нису правилно димензионисани (мала ширина или преклоп б).

Технолошке пробе за одређивање неких других карактеристика дате су на слици 5.13. За прецизније одређивање димензија сочива, дубине отиска електрода и откривање евентуалних грешака, израђује се шлиф за испитивање микроструктуре. Шлиф се прави попречним исецањем споја кроз центар шави и даље обрађује познатим поступком.

Таблица 5.4 Димензије лимова за испитивање затезањем

s, mm	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
b, mm	15	15	20	20	25	25	25	30	30	40	50	50
l, mm	75	75	100	100	100	100	100	125	125	150	150	200

Слика 5.13 Технолошке пробе за: а, б) пречник сочива, в) момент савијања и г) нормалну силу

5.4.1 Мерење основних параметара тачкастог заваривања

Најважнији параметар-ефективна вредност струје заваривања не може се директно измерити јер је прејака за обичне мерне инструменте. Зато се користе струјни трансформатори који се постављају око електроде (прстенасти трансформатор), а на њиховим изводима се везују специјални аналогни или дигитални мерни уређаји. У току процеса заваривања у прстенастом трансформатору (калему Роговског) се индукује електрична струја чија јачина зависи како од струје заваривања тако и од броја навојака у

прстену. Одговарајућим баждарењем сваког мерног прстена могуће је на амперметру регистровати ефективну јачину струје у секундарном колу апарата за заваривање.

За мерење јачине струје, времена и силе притиска постоје савремени универзални мерни уређаји који поред наведених параметара могу мерити и друге електричне величине битне (сл. 5.14) Позната особина металних материјала да се загревају при протицању електричне струје-Џулов ефекат (RI^2)-искоришћена је за електроотпорско заваривање. Нераздвојиви спојеви се образују као резултат локалног загревања метала електричном струјом и пластичног деформисања загрејане зоне.



а)

б)

Слика 5.14 Уређаји за мерење силе на електродама (а) и струје и времена заваривања (б)

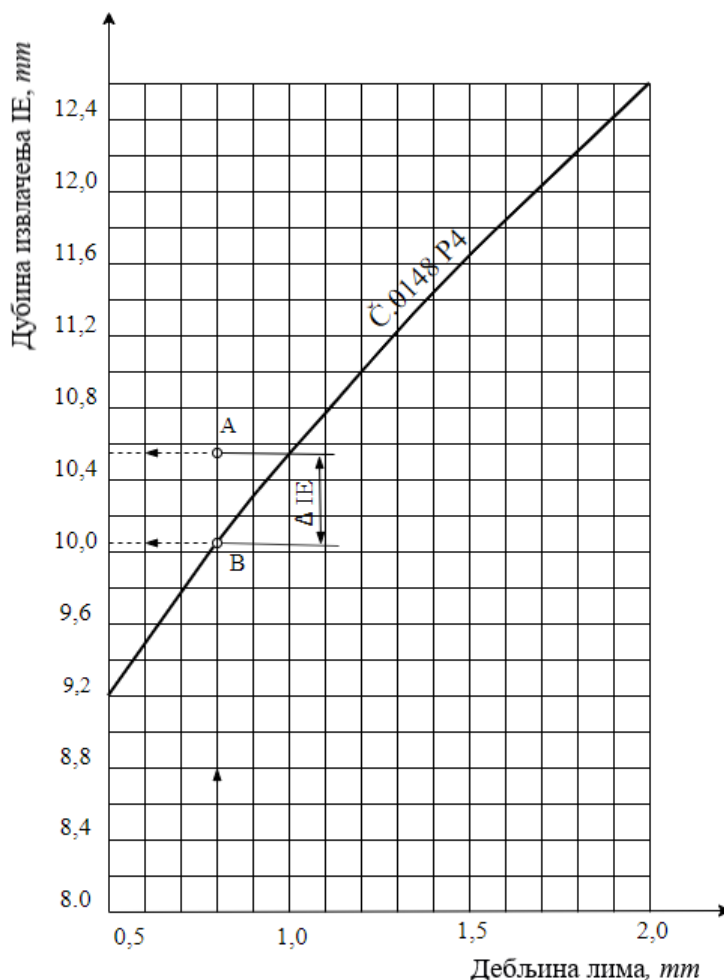
Сила притиска може се измерити помоћу механичких динамометара, хидрауличних динамометара, мерних трака или директним читавањем притиска компримованог ваздуха за померање електрода. Зависност између притиска ваздуха очитаног на манометру уграђеном код већине апарата за заваривање и силе притиска реализоване на електродама, утврђује се мерењем силе при различитим притисцима ваздуха. Помоћу мерних трака на носачима електрода може се мерити промена силе притиска у фази формирања сочива.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ТАЧКАСТО ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

6.1 ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ И НАМЕНА ИСПИТИВАНИХ МАТЕРИЈАЛА

Челици за каросерије аутомобила израђују се најчешће од танких нискоугљеничних челичних лимова намењених пластичној преради. Имају низак садржај угљеника (око 0.1% C), а подесни су за извлачење, савијање и утискивање. Површина ових лимова је веома подесна за наношење боја, лакова, металних превлака, што у случају шкољки аутомобила има посебан значај.

Преглед нискоугљеничних челика за танке лимове намењених за пластичну деформацију са стањима површине дати су у табlici 6.1. Стање површине је равномерно, сјајно и глатко. Наведено стање површина обезбеђује одговарајућу способност пластичне обраде која се утврђује бројним експерименталним методама. Једна од основних метода је способност извлачења по Eriksenу, а најмања дубина извлачења дата је на слици 6.1 за челик Č0148P4.



Слика 6.1 Зависност дубине извлачења (Erichsen-овог индекса) од дебљине лима

*Напомена: крива се односи на минималну вредност дубине извлачења која се постиже за одговарајуће номиналне квалитете лима.

Таблица 6.1 Хемијски састав и механичке особине нискоугљеничних челика за лимове

Ознака	Дезоксидација	Хемијски састав, %			Затезна јачина, МПа	Напон течења, МПа
		С	Р	С		
Č0145	неумирен	0.15	0.060	0.060	280-500	-
Č0146	неумирен	0.10	0.050	0.050	280-420	-
Č0147	умирен	0.10	0.045	0.045	280-400	270
Č0148	умирен	0.10	0.030	0.035	280-380	240

Заварљивост лимова топљењем, с обзиром на мали садржај угљеника је веома добра, а лимови са стањем површина P_3 , P_4 и P_5 су подесни за тачкасто заваривање (P_3 -површина лима без коварине, P_4 -површина лима без коварине али са дозвољеним ситним огреботинама, P_5 - површина лима без коварине са незнатним грешкама).

Микроструктура испитиваних материјала ($s = 0.8 \text{ mm}$ - Č0146P3 и $s = 1.2 \text{ mm}$ - Č0148P3) одређивана је на припремљеним металографским узорцима посматрањем на универзалном металографском микроскопу типа *MeF2 Reichert*. Изглед микроструктура испитиваних лимова различитих дебљина, при увећању од 200 $\times$, приказан је на слици 6.2а,б. Структура лимова састоји се од светлих жилавих зрна ферита између којих су смештена острвца перлита (сл. 6.2а).



а)



б)

Слика 6.2 Микроструктура лима дебљине $s = 0.8 \text{ mm}$ (а) и $s = 1.2 \text{ mm}$ (б)

6.2 ОДРЕЂИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ИСПИТИВАНИХ МАТЕРИЈАЛА

На квалитет заварене тачке највећи утицај имају:

- јачина лима,
- тврдоћа лима,
- степен хладне обраде лима,
- стање површине и
- друге особине лима који се заварује.

С обзиром на врло сложен технолошки поступак добијања каросеријских лимова веома је тешко обезбедити стабилност квалитета од произвођача. Ово је делимично и последица што одговарајући стандарди за квалитет лима прописују само минималне, односно максималне вредности механичких карактеристика.

Стандардна испитивања лимова при производњи и преради углавном се заснивају на испитивању затезањем, одређивању хемијског састава, металографском испитивању микроструктуре, контроли тврдоће, провери дубоког извлачења и стања површине. Поред наведених карактеристика, за дефинисање квалитета лима, у новије време све већи значај имају ванстандардни показатељи, као што је степен деформационог ојачања (n) и коефицијент анизотропије (r). Овде се они неће детаљније обрађивати, али су незаобилазни при примени нумеричких метода оцене квалитета тачкасто заварених спојева.

Најзначајније карактеристике лима који се у овом раду разматра, одређене су лабораторијским испитивањима.

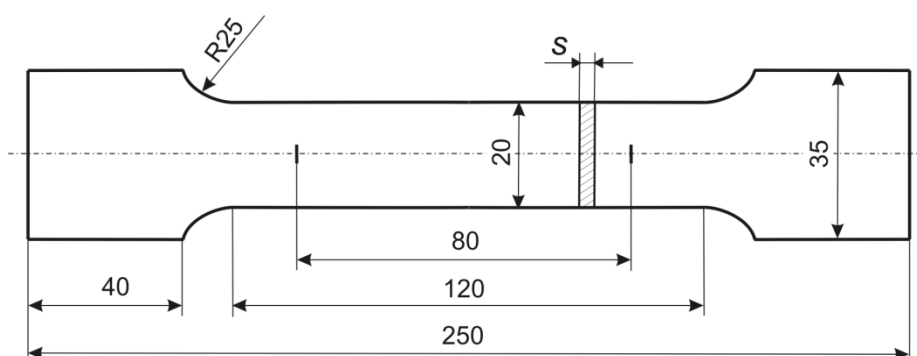
6.2.1 Испитивање затезањем

При испитивању затезањем (SRPS C.A4.002) одређује се велики број карактеристика материјала битних за оцену способности лима за дубоко извлачење. За ово испитивање потребно је доста времена и материјала, поготову ако се пробни узорци секу под различитим угловима.

У овом случају пробни узорци су сечени у три правца:

- у правцу ваљања лима (0°),
- под углом 45° у односу на правац ваљања и
- управно на правац ваљања лима (90°).

Изглед узорака на којима је обављено испитивање приказан је на слици 6.3.



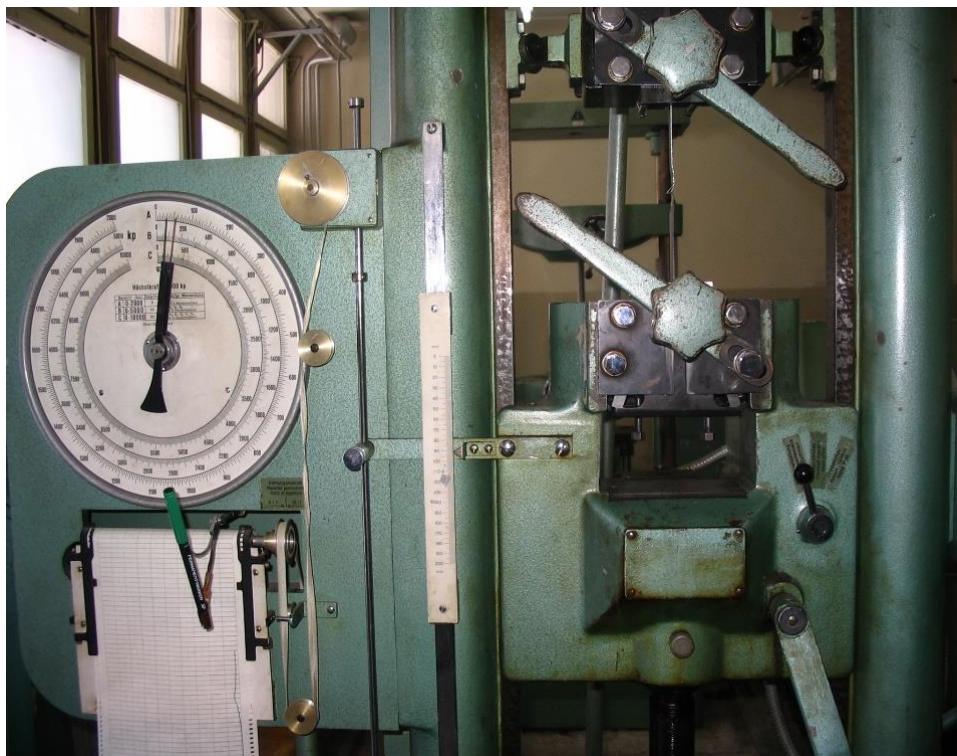
Слика 6.3 Изглед и димензије узорака за одређивање механичких карактеристика материјала

Циљ овог испитивања јесте провера неуједначености особина (анизотропије) материјала у различитим правцима, до које код лимова долази првенствено под утицајем њихове производње (ваљања). Анизотропија у равни лима најчешће се узима у обзир на тај начин што се по одређивању дате карактеристике у правцу ваљања, нормално на њега и под углом од 45° у односу на те правце, налази средња карактеристика, као:

$$X = (X_0 + 2X_{45^\circ} + X_{90^\circ}) / 4 \quad (6.1)$$

При чему се индекси односе на правце сечења у односу на правац ваљања. Испитивања затезањем изведена су на механичкој кидалици (WPM, сл. 6.4) и на савременој машини за испитивање на собној и повишеним температурама (Zwick/Roell Z100, сл. 6.5).

За ова испитивања припремљене су епрувете дебљина 0.8 и 1.2 mm и ширина: 20, 25, 30, 35, 40, 45 и 50 mm. После преклопног тачкастог заваривања приступило се затезању.

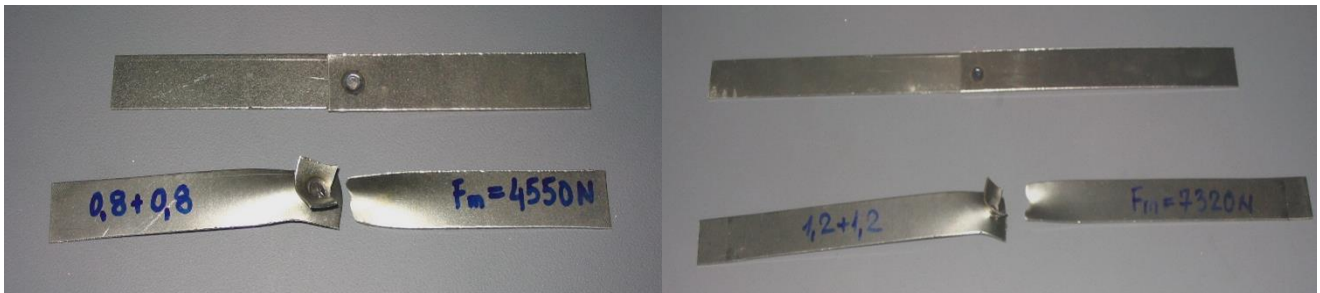


Слика 6.4 Изглед механичке кидалице (WPM)



Слика 6.5 Изглед савременог мерног система (Zwick/Roell Z100): а) изглед екстензометара и б) детаљ стезних чељусти

Добијени резултати испитивања се налазе у таблицама од 6.2 до 6.7 као и на сликама од 6.7 до 6.12, за различите правце и дебљине лимова.

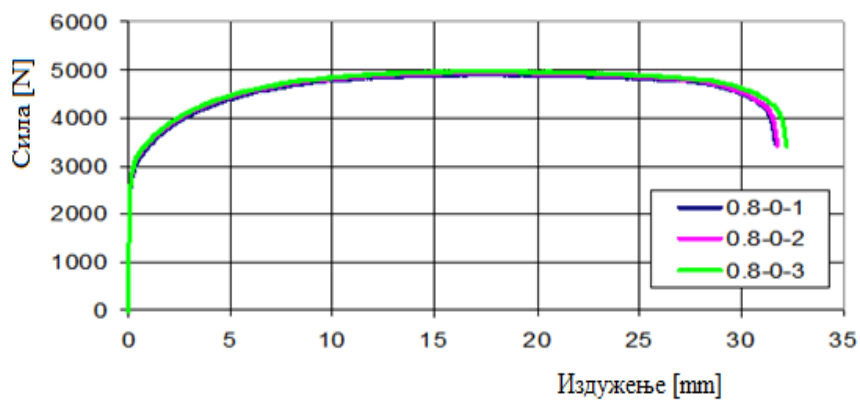


Слика 6.6 Изглед епрувете пре и после кидања (0.8+0.8) и (1.2+1.2) mm

Испитивани лим дебљине $s = 0.8 \text{ mm} - \check{C}0146 \text{ P3} - 0^\circ$ сечен у правцу ваљања лима.

Таблица 6.2 Резултати испитивања затезањем

Број епрувете	S_0 mm^2	L_0 mm	E $\kappa\text{N} / \text{mm}^2$	$R_{p0.2}$ N / mm^2	R_m N / mm^2	A %	n	r
1	16.15	80	183.7	175.77	303.76	39.48	0.206	1.898
2	16.22	80	183.8	180.21	304.44	39.6	0.203	1.829
3	16.16	80	188.4	181.41	307.02	40.14	0.202	1.874

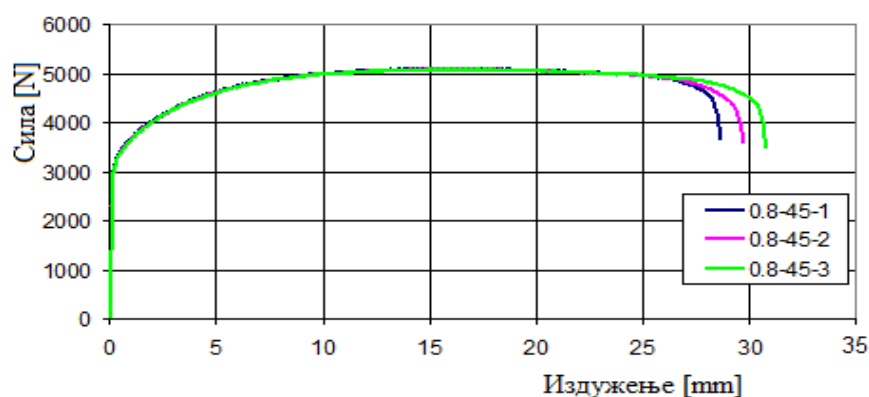


Слика 6.7 Дијаграм сила – издужење

s = 0.8 mm - 45°

Таблица 6.3 Резултати испитивање затезањем

Број епрувете	S_0 mm^2	L_0 mm	E kN / mm^2	$R_{p0.2}$ N / mm^2	R_m N / mm^2	A %	n	r
1	16.16	80	207.2	194.85	315.16	35.66	0.194	1.523
2	16.16	80	209.4	192.72	314.72	36.97	0.196	1.565
3	16.14	80	205	192.9	314.92	38.31	0.196	1.550

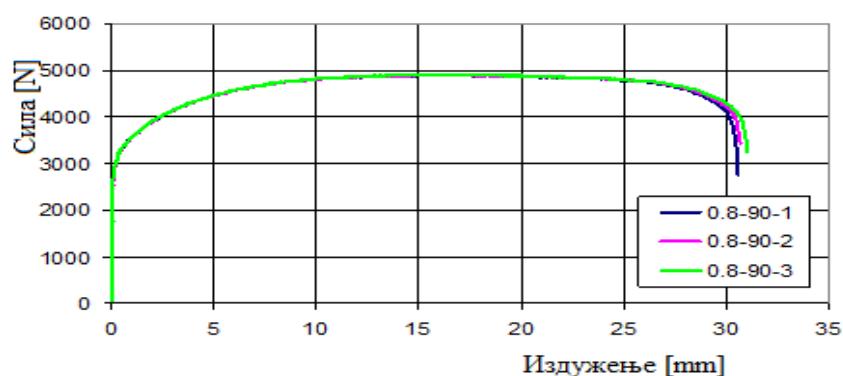


Слика 6.8 Дијаграм сила – издужење

s = 0.8 mm - 90°

Таблица 6.4 Резултати испитивања затезањем

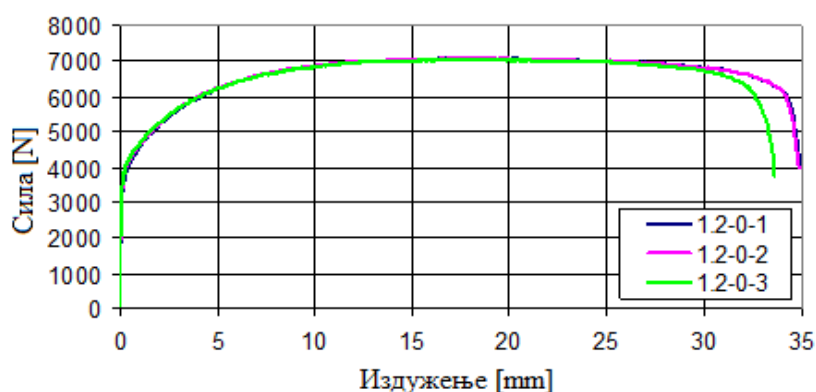
Број епрувете	S_0 mm^2	L_0 mm	E kN / mm^2	$R_{p0.2}$ N / mm^2	R_m N / mm^2	A %	η	r
1	16.21	80	198.1	187.26	301.87	38.15	0.195	2.284
2	16.20	80	193.5	187.43	302.09	38.28	0.194	2.274
3	16.18	80	191.8	188.22	302.93	38.71	0.194	2.269



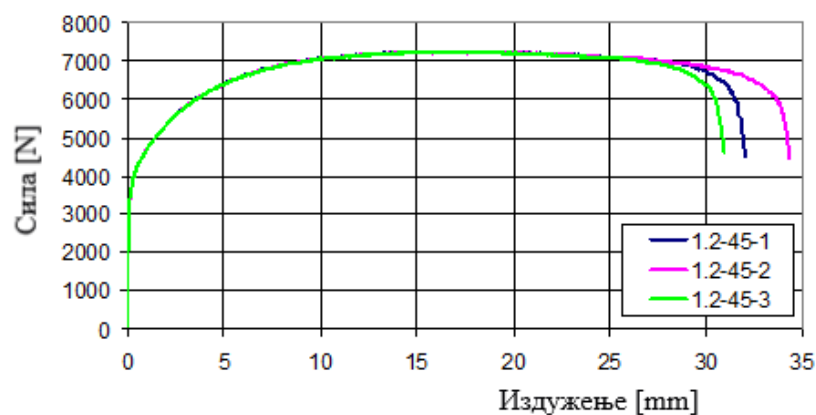
Слика 6.9 Дијаграм сила – издужење

0° - s = 1.2 mm**Таблица 6.5** Резултати испитивања затезањем

Број епрувете	b_0 mm	S_0 mm ²	L_0 mm	E kN / mm ²	$R_{p0.2}$ N / mm ²	R_m N / mm ²	A %	n	r
1	20.25	24.30	80	156.5	152.07	291.44	43.49	0.226	1.918
2	20.25	24.30	80	164.5	156.32	291.40	43.42	0.223	1.922
3	20.23	24.28	80	171.7	159.60	290.46	41.93	0.221	2.046

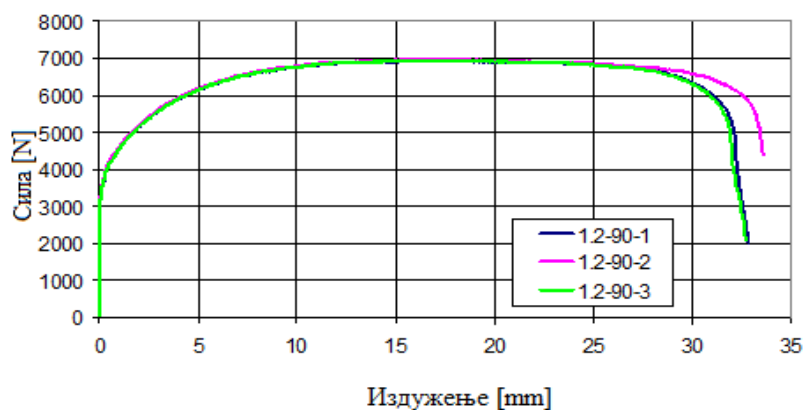
**Слика 6.10** Дијаграм сила – издужење**45° - s = 1.2 mm****Таблица 6.6** Резултати испитивања затезањем

Број епрувете	b_0 mm	S_0 mm ²	L_0 mm	E kN / mm ²	$R_{p0.2}$ N / mm ²	R_m N / mm ²	A %	n	r
1	20.25	24.30	80	196.2	155.96	297.79	39.89	0.220	1.652
2	20.28	24.34	80	192.2	155.77	297.12	42.81	0.220	1.659
3	20.28	24.34	80	191.1	155.75	296.63	38.55	0.220	1.659

**Слика 6.11** Дијаграм сила – издужење

90° - s = 1.2 mm**Таблица 6.7** Резултати испитивања затезањем

Број епрувете	b_0 mm	S_0 mm ²	L_0 mm	E kN / mm ²	$R_{p0.2}$ N / mm ²	R_m N / mm ²	A %	n	r
1	20.25	24.30	80	166.3	152.86	285.52	40.98	0.219	2.408
2	20.28	24.34	80	180.3	155.65	286.04	41.86	0.217	2.319
3	20.28	24.34	80	173.2	152.59	285.32	40.83	0.220	2.362

**Слика 6.12** Дијаграм сила – издужење

Средње вредности добијених резултата лимова дебљина $s = 0.8 \text{ mm}$ и $s = 1.2 \text{ mm}$, за наведене правце дати су у табlici 6.8.

Таблица 6.8 Најважније механичке карактеристике испитиваних материјала (средње вредности)

Материјал	$\gamma_{\text{тао}}, ^\circ$	R_p , MPa	R_m , MPa	R_p/R_m , -	A , %	n , -	r , -	E , MPa
$s = 0.8 \text{ mm}$	0°	179.13000	305.07333	0.58717	39.74000	0.20367	1.86700	185.30000
	45°	193.49000	314.93333	0.61438	36.98000	0.19533	1.54600	207.20000
	90°	187.63667	302.29667	0.62070	38.38000	0.19433	2.27567	194.46667
	$X_{\text{ст}}$	188.43667	309.30916	0.60916	38.02000	0.19716	1.80867	198.54167
$s = 1.2 \text{ mm}$	0°	155.99667	291.10000	0.53589	42.94667	0.22333	1.96200	164.23333
	45°	155.82667	297.18000	0.52435	40.41667	0.22000	1.65667	193.16667
	90°	153.70000	285.62667	0.53811	41.22333	0.21867	2.36300	173.26667
	$X_{\text{ст}}$	155.33750	292.77167	0.53067	41.25084	0.22050	1.90958	180.95834

6.2.2 Одређивање кривих ојачања

При обради метала деформисањем неопходно је познавати особине материјала у стању обраде, како би се могли израчунати основни параметри обраде као што су деформациона сила и деформациони рад. Због великих проблема који се јављају при експерименталном мерењу главних деформација, прибегава се једноставнијој формулацији криве ојачања, као функционалне зависности између специфичног деформационог отпора и деформације представљене графичким путем.

Према литературним подацима, меким челицима и легурама алуминијума највише одговарају следеће аналитичке апроксимације кривих ојачања:

$$K = C\phi^n; \quad C = R_m \frac{e^n}{n^n} \quad (6.2)$$

$$K = C_1 + C_2\phi^m; \quad C_1 = R_p; \quad C_2 = \frac{R_m e^n - R_p}{n \left(\frac{R_m e^n}{R_m e^n - R_p} n \right)}; \quad m = \frac{R_m e^n}{R_m e^n - R_p} n$$

при чему су C , C_1 и n константе материјала.

Претходне апроксимације важе у области равномерних деформација ($\phi \leq \phi_M$). За деформације изнад највећег равномерног издужења користе се следеће апроксимације:

$$K = C_3 + C_4\phi; \quad C_3 = R_m e^n (1-n); \quad C_4 = R_m e^n; \quad (6.3)$$

где су C_3 и C_4 константе материјала.

На основу података из таблице 6.8 одређене су вредности константи за обе дебљине материјала и све правце исецања материјала. Све вредности се односе за брзину $v = 20 \text{ mm/min}$ и собну температуру.

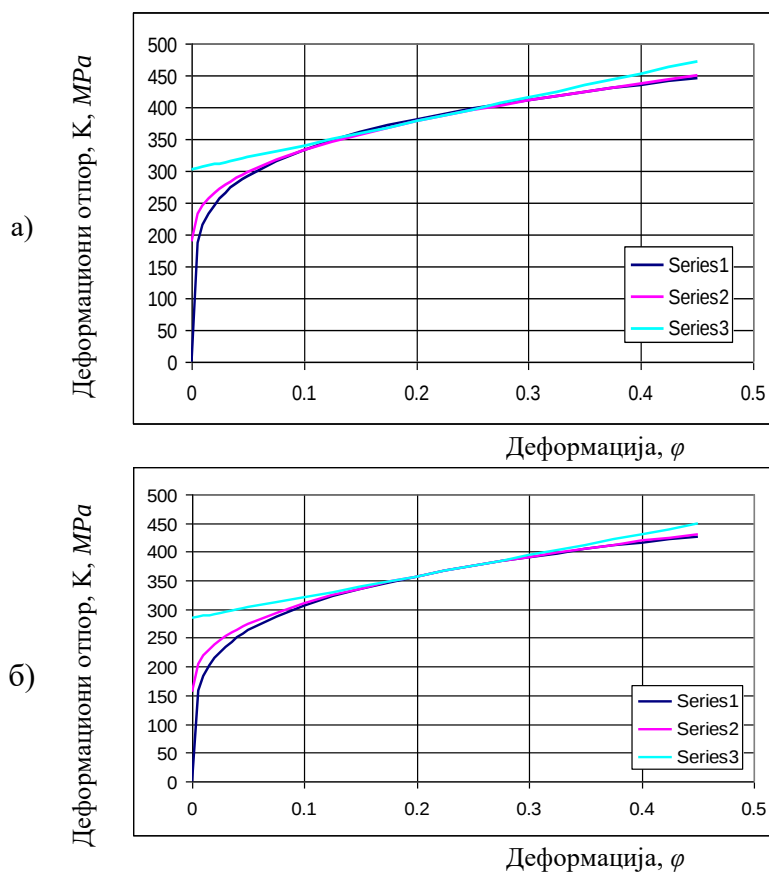
Таблица 6.9 Једначине кривих ојачања за испитиване материјале ($s = 0.8 \text{ mm}$)

Материјал	Угао, °	Облик апроксимације, МПа
Č0146P3	0°	$K = 517.13963 \cdot \phi^{0.20367}$ $K = 179.13 + 362.9595 \cdot \phi^{0.390901}$ $K = 297.81741 + 373.98743 \cdot \phi$
	45°	$K = 526.72444 \cdot \phi^{0.19533}$ $K = 193.49 + 360.916 \cdot \phi^{0.394901}$ $K = 308.08260 + 382.74194 \cdot \phi$
	90°	$K = 504.76340 \cdot \phi^{0.19433}$ $K = 187.63667 + 344.2314 \cdot \phi^{0.39746}$ $K = 295.79239 + 367.13840 \cdot \phi$
	X_{sr}	$K = 518.83798 \cdot \phi^{0.191716}$ $K = 188.43667 + 357.2557 \cdot \phi^{0.39454}$ $K = 302.44375 + 376.65243 \cdot \phi$

Таблица 6.10 Једначине кривих ојачања за испитиване материјале ($s = 1.2 \text{ mm}$)

Материјал	Угао, °	Облик апроксимације, МПа
Č0148P3	0°	$K = 508.66616 \cdot \varphi^{0.22333}$ $K = 155.99667 + 373.5922 \cdot \varphi^{0.39082}$ $K = 282.66349 + 363.94285 \cdot \varphi$
	45°	$K = 516.69157 \cdot \varphi^{0.220}$ $K = 155.82667 + 381.2087 \cdot \varphi^{0.37983}$ $K = 288.84108 + 370.30908 \cdot \varphi$
	90°	$K = 495.60334 \cdot \varphi^{0.21867}$ $K = 153.7 + 362.3681 \cdot \varphi^{0.385269}$ $K = 277.71570 + 355.43970 \cdot \varphi$
	X_{sr}	$K = 509.41316 \cdot \varphi^{0.2205}$ $K = 155.3375 + 374.5944 \cdot \varphi^{0.383941}$ $K = 284.51534 + 365.00018 \cdot \varphi$

На слици 6.13а,б приказане су криве ојачања за челике ($s = 0.8 \text{ mm}$ и $s = 1.2 \text{ mm}$) за средње вредности добијене према изразима из таблице 6.9.

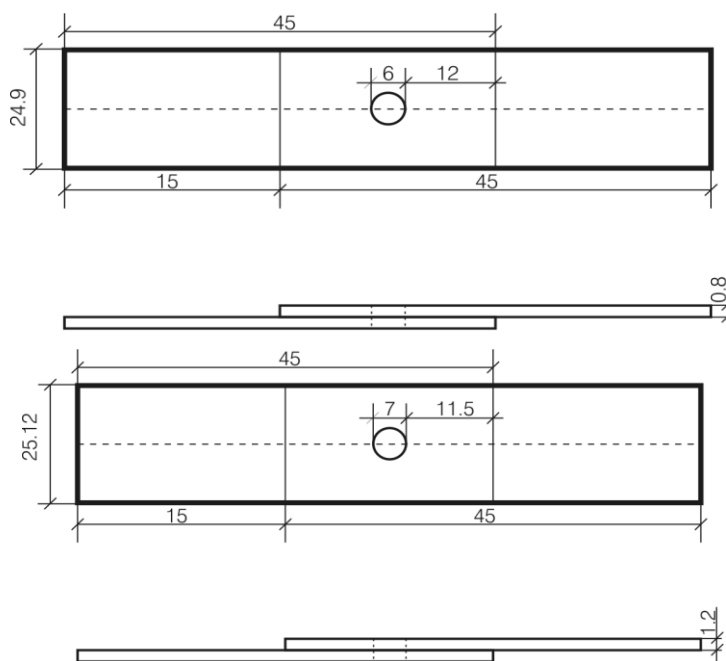


Слика 6.13 Криве ојачања за средње вредности лима за Č0146P3: а) $s = 0.8 \text{ mm}$ и за Č0148P3 б) $s = 1.2 \text{ mm}$

6.3 ИЗБОР ПАРАМЕТАРА ТАЧКАСТОГ ЗАВАРИВАЊА ЗА РАЗЛИЧИТЕ ДЕБЉИНЕ И СПОЈЕВЕ

Основни параметри тачкастог заваривања (I_z , t_z , d_e и F_z) у производним условима бирају се на основу искуствених препорука у зависности од врсте материјала, броја делова у склопу и њихове дебљине.

Будући да су при експериментима извођени преклопни спојеви од два лима исте дебљине ($s = 0.8 \text{ mm}$ и $s = 1.2 \text{ mm}$), почетни параметри заваривања бирани су на основу препорука датих у одговарајућој литератури. После преклопног тачкастог заваривања епрувета-узорака, (сл. 6.14), ($20 \times 100 \text{ mm}$ за $s = 0.8 \text{ mm}$ и $25 \times 100 \text{ mm}$ за $s = 1.2 \text{ mm}$), исти су испитивани затезањем на механичкој кидалици (Лабораторија за ОМД и машинске материјале, ФИН Крагујевац). Као критеријум контроле проверавана је максимална сила кидања споја, пречник сочива-језгра, макро и микроструктура, тврдоћа по пресеку завареног споја и др. У зависности од добијених резултата извођена је корекција параметара заваривања односно њихово дефинитивно усвајање за даља експериментална истраживања.



Слика 6.14 Изглед преклопно тачкасто завареног споја

Усвојени параметри заваривања дати су у табlici 6.11.

Таблица 6.11 Параметри тачкастог заваривања ("средњи" режим)

Дебљина лима, mm	Параметри тачкастог заваривања				
	d_e, mm	I_z, A	t_z, per	F_z, daN	F_b, daN
0.80	5.5	6600	14	125	430
1.20	6.2	8000	20	180	720

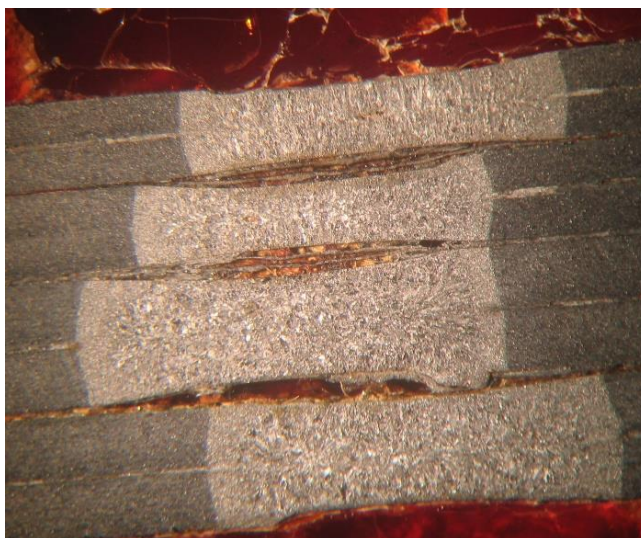
При извођењу затезања заварених спојева силе разарања биле су знатно веће од препоручених. У случају спојева остварених од лимова дебљине $s = 0.8 \text{ mm}$ вредности силе разарања биле су: 450 daN , 452, 463, 433, 461, 454, 469, 470, 476 и 480 (10 узорака). У случају спојева остварених од лимова дебљине $s = 1.2 \text{ mm}$ вредности силе разарања биле су: 762 daN , 734, 732, 764 и 774 (5 узорака).

6.4 МЕТАЛОГРАФСКА ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

Хемијски састав са описом микроструктуре, испитиваних лимова, дат је у табlici 6.1. Челични лим спада у групу квалитетних лимова предвиђених за обраду деформисањем и има особине предвиђене стандардом SRPS C.B4.016 за ову групу материјала. Структура испитиваног материјала одређивана је на металографским шлифовима (металним избрусцима) заварених спојева (сл. 6.15), посматрањем на универзалном металографском микроскопу типа MeF2 фирме REICHERT. Изглед макро и микроструктура, појединих зона завареног споја, дат је сликама од 6.17 до 6.22.



Слика 6.15 Изглед затопљених металографских избрусака

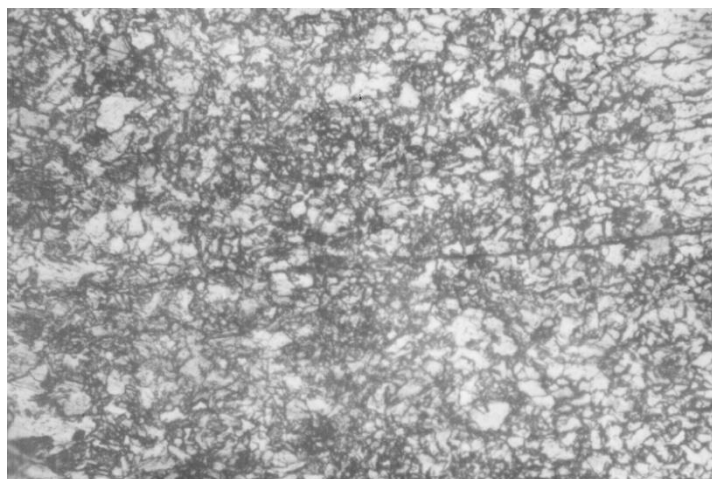


Слика 6.16 Макро изглед металографских избрусака ($s = 0.8 \text{ mm}^{-2} \text{ ком}$ и $s = 1.2 \text{ mm}^{-2} \text{ ком}$)



(ОМ - ситнозрна, претежно феритна структура са незнатним учешћем перлита)

Слика 6.17 Микроструктура ОМ – $s = 0.8 \text{ mm}$ (200×)



(ЗУТ - Уситњена, нормализована феритна структура са незнатним ућешћем перлита)

Слика 6.18 Микроструктура ЗУТ-а – $s = 0.8 \text{ mm}$ (200×)



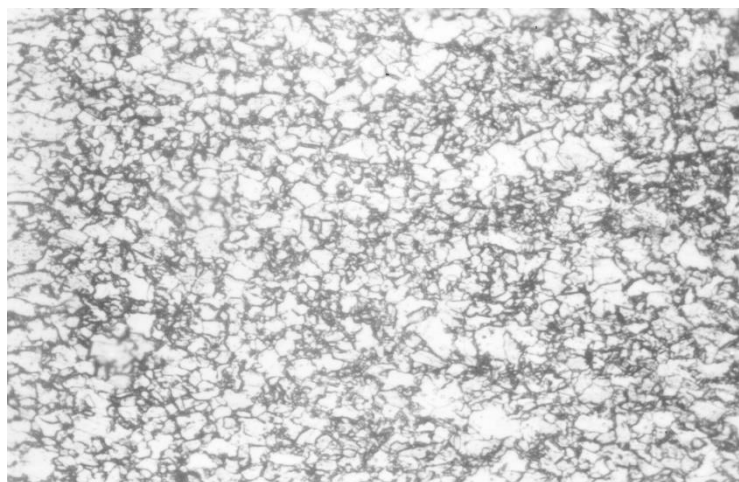
(Видманштетенова структура)

Слика 6.19 Микроструктура метала шава – $s = 0.8 \text{ mm}$ (200×)



(ОМ - ситнозрна, претежно феритна структура са незнатним учешћем перлита)

Слика 6.20 Микроструктура ОМ – $s = 1.2 \text{ mm}$ ($200\times$)



(ЗУТ - уситњена, нормализована феритна структура са незнатним ућешћем перлита)

Слика 6.21 Микроструктура ЗУТ-а – $s = 1.2 \text{ mm}$ ($200\times$)

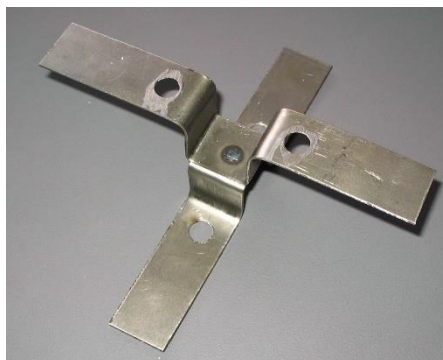


(Видманштетенова структура)

Слика 6.22 Микроструктура метала шави – $s = 1.2 \text{ mm}$ ($200\times$)

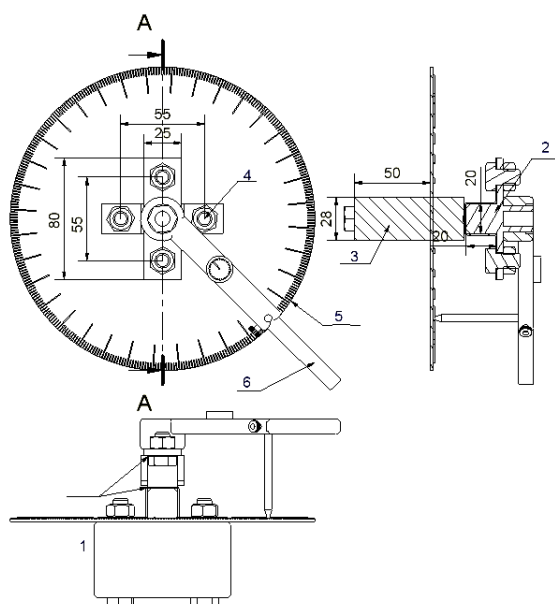
6.5 ИСПИТИВАЊЕ УВИЈАЊЕМ

За потребе испитивања увијањем крстасто заварених спојева (сл. 6.23) неопходно је одредити величину максималног момента увијања, односно пречник тачке (сочива) и на основу тих вредности донети закључак о квалитету изведеног споја. Крстасто заварене епрувете су најпре увијане помоћу импровизованог (приручног) алата. На тај начин је провераван момент увијања као и пречници сочива.



Слика 6.23 Изглед крстасто заварених узорка различитих дебљина

Затим је за потребе модификације и унапређења ове нове оригиналне методе контроле са разарањем, конструисан и израђен специјални алат (сл. 6.24) помоћу којег се посредно проверава квалитет тачкасто завареног споја (директним мерењем момента увијања и величине деформације-угла увијања). Применом ове методе, тзв. "методе на момент увијања", установљене су граничне вредности момента торзије за дату врсту споја, односно дебљину завариваних узорка којима се проверава квалитет оствареног споја. Компарацијом добијених резултата ове пробе, са резултатима проба на затезање и металографском методом, уочава се велика подударност добијених резултата. Ова метода као ефикасно средство контроле могла би бити широко прихваћена и у погонима, како при избору оптималних параметара заваривања тако и при провери постојећих технологија.



Слика 6.24 Склопни цртеж алата за увијање крстасто заварених епрувета: 1) узорци, 2) горњи део алата, 3) доњи део алата, 4) завртњи и навртке, 5) скала, 6) момент кључ

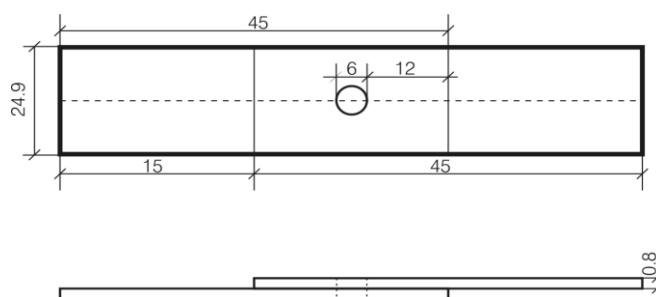
6.6 РЕЗУЛТАТИ НУМЕРИЧКИХ ИСПИТИВАЊА

Пример 1 - Смицање преклопно тачкасто заварених узорака дебљине 0.8 mm

Анализиране су две епрувете дебљине 0.8 mm, ширине 24.9 mm преклопно заварене, дужине $L = 45$ mm. Разматрана је геометријски и материјално нелинеарна анализа завареног споја. Усвојено је да је пречник заварене тачке $d \approx 6$ mm. Епрувете су моделиране са солидима (976) као параболичним елементима. Због раванске симетрије, моделирана је само половина модела уз примену одговарајућих граничних услова симетрије. Коришћен је Мизесов еластопластични материјални модел са изотропним ојачањем.

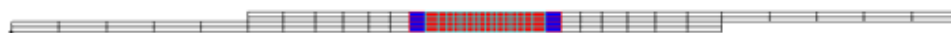
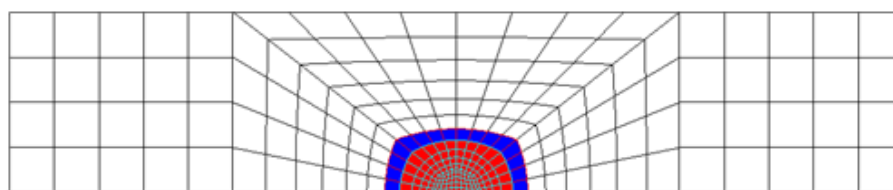
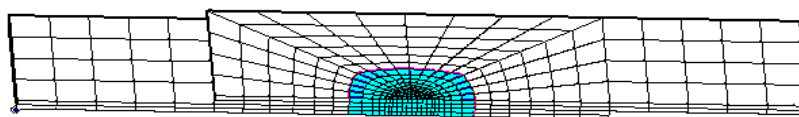
Материјални подаци за Рамберг - Осгуд криву ојачања су: $E = 200000$ MPa, $\nu = 0.3$, $\sigma_y = \sigma_{yv} + C_y e_p^{-n}$, $\sigma_{yv} = 188.44$ N/mm², $C_y = 357.26$ mm², $n = 3945.0$

Зона метала тачке (шава) ојачана је са: $C_y = 520$ N/mm² и $n = 1$. Геометрија модела јеприказана на слици 6.26.



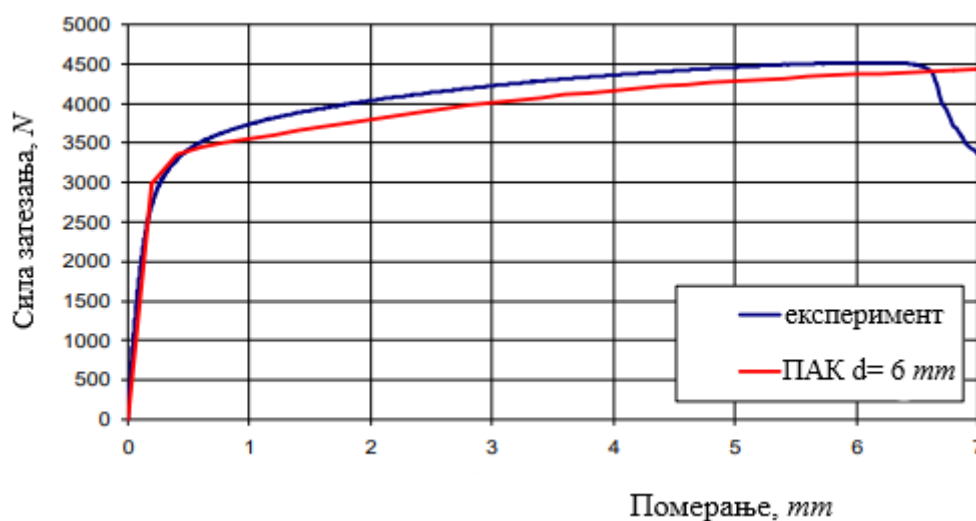
Слика 6.25 Геометрија моделираних узорака

Мрежа коначних елемената је приказана на слици 6.26. Црвеном бојом је приказана зона метала шави, а плавом бојом област ЗУТ-а ширине око 1 mm која настаје као последица утицаја унете топлоте (сл. 6.26)



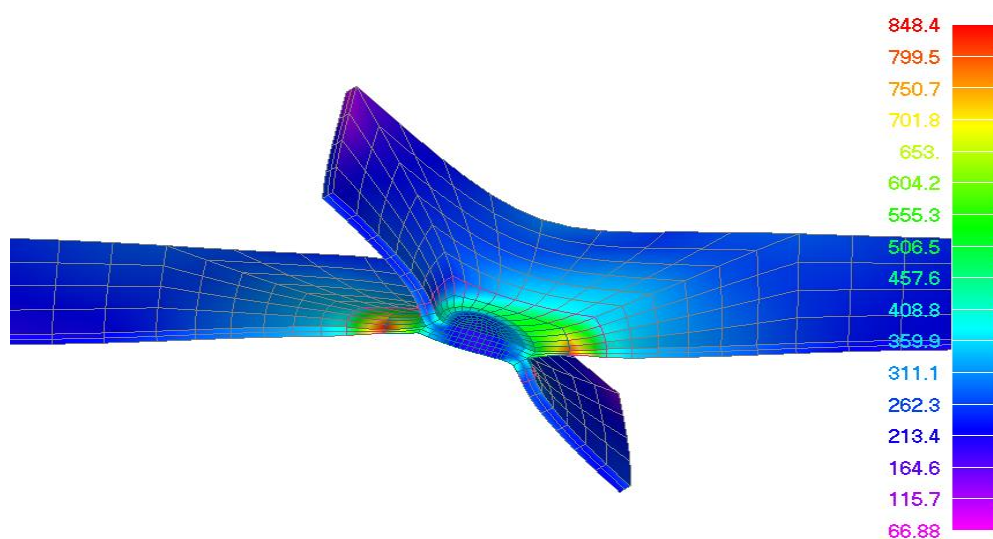
Слика 6.26 Мрежа коначних елемената; зона метала шави и околешавна зона (ЗУТ и О.М.)

Упоредни дијаграм сила-померање приказан је на слици 6.27. Са слике се види да су вредности сила добијених нумеричким прорачуном за пречник заварене тачке $d = 6 \text{ mm}$ за око 5% ниже од вредности сила добијених експериментом.

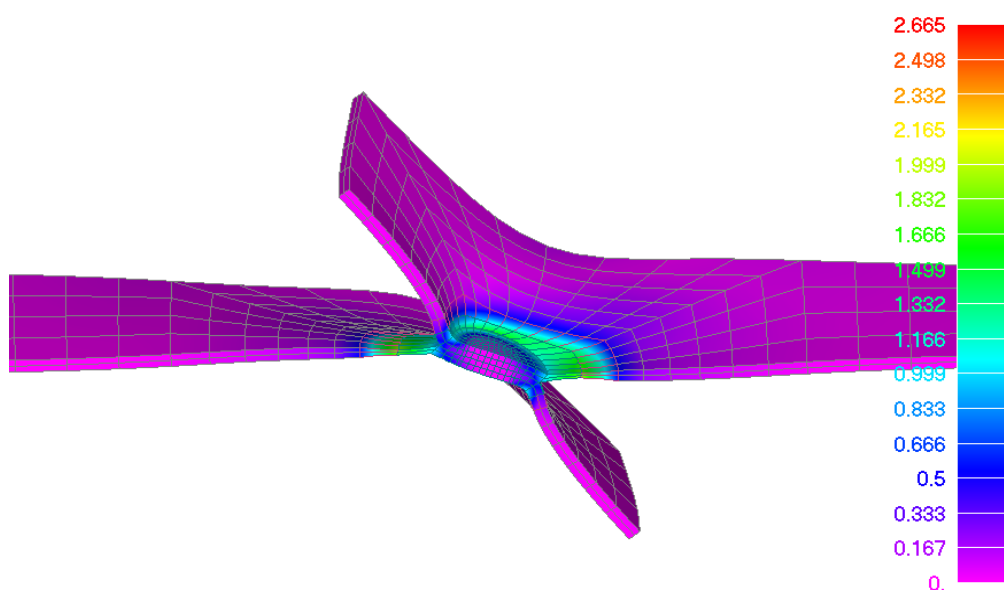


Слика 6.27 Дијаграм сила-померање при кидању преклопно тачкасто заварених епрувета дебљине 0.8 mm

Изглед деформисане епрувете и поље ефективног напона на деформисаној конфигурацији у приказан је на слици 6.28. Са слике се види да је карактер деформисања сличан. Поље ефективне пластичне деформације је приказано на слици 6.29.



Слика 6.28 Поље ефективног напона



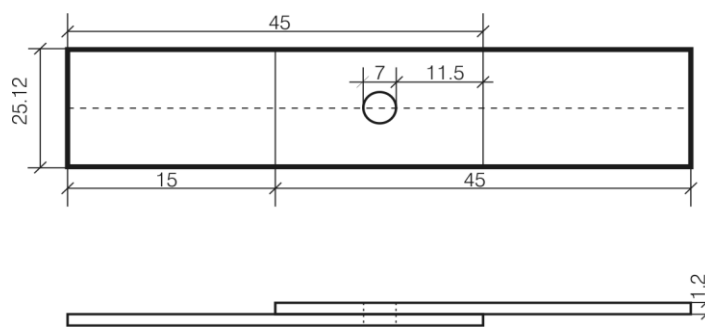
Слика 6.29 Поље ефективне пластичне деформације

Пример 2 - Смицање преклопно тачкасто заварених епрувета дебљине 1.2 mm

У овом примеру, анализиране су две епрувете дебљине 1.2 mm, ширине 25.12 mm заварене у преклоп, дужине $L = 45$ mm. Разматра се геометријски и материјално нелинеарна анализа завареног споја. Усвојено је да је пречник заварене тачке је ≈ 7 mm. Епрувете су моделиране са солидима (976) као параболичним елементима. Приликом моделирања епрувете, због равanske симетрије, моделирана је само половина модела уз примену одговарајућих граничних услова симетрије. Коришћен је Мизесов еластопластични материјални модел са изотропним ојачањем.

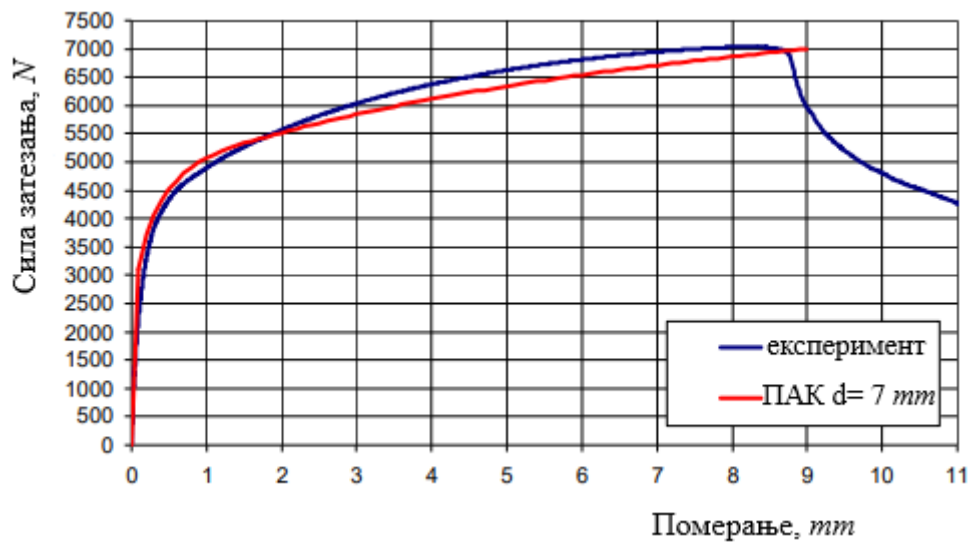
Материјални подаци за Рамберг-Осгуд криву ојачања су: $E = 200000$ MPa, $\nu = 0.3$, $\sigma_y = \sigma_{yv} + C_y e_p^{-n}$, $\sigma_{yv} = 155.34$ N/mm², $C_y = 374.59$ mm², $n = 3839$.

Зона метала тачке (шава) ојачана је са $C_y = 520$ N/mm² и $n = 1$. Геометрија модела је приказана на слици 6.30.



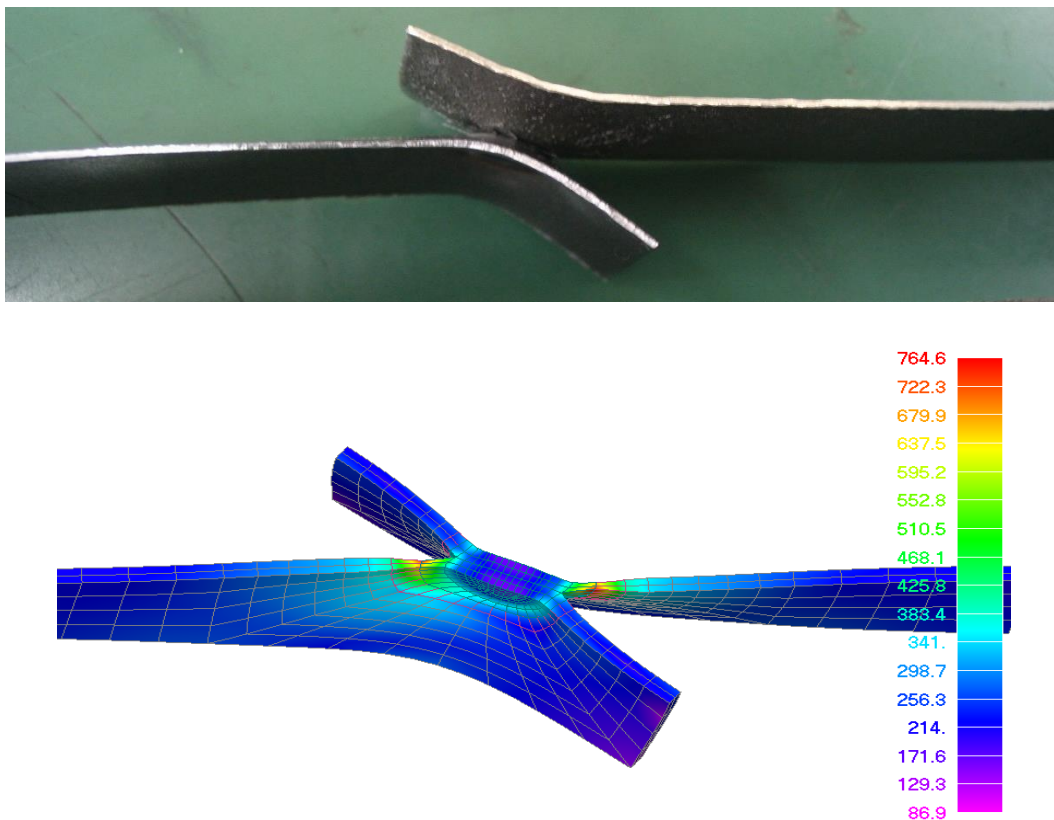
Слика 6.30 Геометрија испитиваног узорка

Упоредни дијаграм сила-померање приказан је на слици 6.31. Са слике се види да су вредности сила добијених нумеричким прорачуном за пречник заварене тачке $d \approx 7$ mm приближне вредностима сила добијених експериментом (разлике у вредностима не прелазе 5% у целом дијапазону).

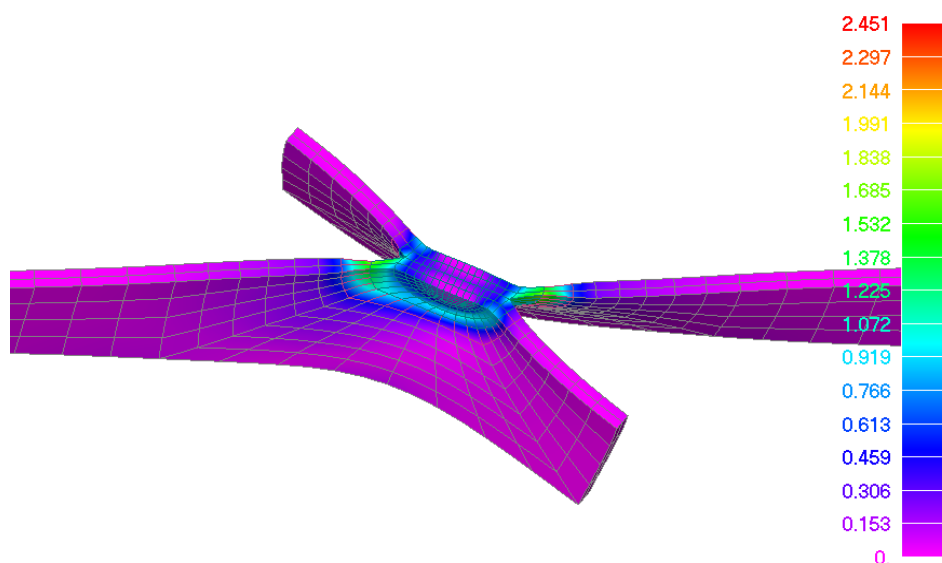


Слика 6.31 Дијаграм сила-померање при кидању преклопно тачкасто заварених епрувета дебљине 1.2 mm

Изглед деформисаног узорка и поље ефективног напона за деформисану конфигурацију је приказан на слици 6.32. Са слике се види да је карактер деформисања сличан. Поље ефективне пластичне деформације је приказано на слици 6.33.



Слика 6.32 Поље ефективног напона



Слика 6.33 Поље ефективне пластичне деформације

Провера квалитета тачкасто завареног споја изведена „методом на момент увијања“ указује на минималне граничне вредности момента увијања измерене разарањем оствареног тачкастог споја. Поред момента увијања, помоћу избјављене поделе могуће је регистровати укупни угао увијања од момента почетка увијања (еластичне деформације) до потпуног откопчавања тачкасто завареног споја. Угао увијања може се по аналогији са испитивањем на затезање поистоветити са величином деформације. Дакле, као критеријум квалитета тачкасто завареног споја, поред наведених метода контроле, може се усвојити и вредност момента торзије. Остварена вредност момента увијања може се повезати са силом кидања тачкасто завареног споја, односно пречником сочива откопчане тачке. Будући да је при овим испитивањима, број узорака био релативно мали, за извођење поузданијег закључка, могуће је успоставити корелацију између поменутих величина, а ова нова метода би притом могла бити шире заступљена не само при лабораторијским, већ и производним-радионичким условима. На овај начин би се убрзао поступак одређивања најповољнијих параметара тачкастог заваривања.

У циљу верификације нумеричких модела, извршена је компарација добијених резултата са експерименталним резултатима. Урађено је више примера за верификацију експеримента. Верификацијом резултата прорачуна дошло се до оцјене о ваљаности развијене методологије и могућности да се развијени софтвер поуздано користи у пракси за решавање проблема носивости тачкасто заварених спојева и конструкција, односно посредно и за избор најповољније технологије тачкасто заварених спојева.

После изведених испитивања затезањем, визуелне контроле, макрографских и металографских испитивања и провере квалитета методом увијања закључили смо да заварени спојеви задовољавају техничке захтеве и прописе а дубина отиска и геометријске мере остварених тачака испуњавају предвиђене захтеве. Такође хемијски састав одговара захтевима стандарда (SRPS C.B4.016).

При "освајању" заварених подсклопова и склопова неопходно је спровести предложену процедуру. Дакле осим радионичких проба, неопходно је спровести и одговарајућа механичка и металогрфска испитивања. Тек по позитивно добијеним резултатима одобрава се серијска производња. Такође, треба се придржавати најповољнијих режима заваривања и исте повремено проверавати и по потреби кориговати у производним условима.

7. ПОСТОЈАНОСТ ЕЛЕКТРОДА ПРИ ЗАВАРИВАЊУ ОБИЧНОГ И ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНОГ КАРОСЕРИЈСКОГ ЛИМА Č0148 P4

7.1 ВРСТЕ ПРИМЕЊИВАНИХ ЛИМОВА

Поступак добијања лима је врло сложен технолошки процес. Циљ свих произвођача је добијање лима стабилног квалитета. Разлике у квалитету лима су различите нарочито каросеријског лима, иако сви ови лимови носе исту номиналну ознаку (Č0148P4 – DCO4).

Лимови се добијају ваљањем метала и пропуштањем између ваљака при чему се добија жељена дебљина. Постоји више конструктивно-технолошких могућности добијања лима у зависности од хемијског састава, површине лима и сл. Лимови се затим сечу на одређене димензије и врши се декапирање лима или по потреби површинска заштита лима.

Најчешће се примењује каросеријски декапирани лим ознаке Č0148P4 дебљине 0,8 и 1,5 mm, док се површинска заштита врши у купатилима. У даљем тексту је објашњен кратак поступак спровођења процеса декапирања и процес површинске заштите.

7.1.1 Декапирање

Када комад дође у радионицу за галванопластику у циљу облагања (превлачења), његова површина није припремљена да прими превлаку. Комад је прекривен тањим или дебљим слојем масти, оксида соли и прашина које треба одстранити. За овакав поступак, галвано-пластика располаже двама операцијама за чишћење:

- одмашћивање које одстрањује масне материје,
- декапирање које скида корозивни слој.

Хронологија ових операција није стална, а одмашћивање не претходи увек декапирању. Декапирање може да се дефинише као хемијска или електрохемијска обрада, намењена да се одстрани корозивни продукти са површине. Кородирани слој може да буде хемијски прост (алумин на површини алуминијума) или сложен (корозија феритних легура). Слој може да садржи и оксиде, хидроксиде, сулфате, карбонате, хлориде, сулфиде итд. За скидање и разлагање.

На основу дебљине слоја, можемо разликовати две операције:

- скидање дебљих слојева (рђа или коварина) помоћу енергетских реактива и
- лако декапирање које дејствује на танак оксидни слој који се може образovati на глаткој површини метала у току разних операција, које претходе стављању у купатило.

При декапирању интересује нас, не само видљив оксидни слој, већи и исто тако и невидљива оксидна скрама чија дебљина варира за неколико десетих ангстрема. Сматрамо да превлака утиче на микроскопски изглед метала када она постигне одређену дебљину микрона. Уколико чисту површину називамо површином која омогућује пријањање превлаке, онда је циљ декапирања да се добије чиста површина. Међутим, декапирање омогућује да извршимо замену штетног слоја танким слојем, који није лош за пријањање. Ефикасност декапирања или урешјаја за чишћење може се измерити пријањањем превлаке. Параметри који утичу на пријањање су врло познати, али је често потребно да се њихов начин дејствовања прецизира. Параметри који зависе од носеће површине, груписани су изразом стање површине.

На тај начин, пријањање је функција кристалографских, хемијских, физичко-хемијских и микрогло-материјских карактеристика површине. Међузависност између декапирања и површинског стања утиче на кристалографски изглед као и на физичку и хемијску чистоћу.

Многобројна истраживања су показала да се једна површина може сматрати као једноставан распоред атома у једном моделу с две димензије: расподела атома на површини врши се у нешто већој дебљини од дебљине слоја који је у контакту са реактивом. Физичка и хемијска чистоћа зависи од присуства страних атома у кристалној мрежи или атома који долазе из околне средине и који се фиксирају за површину физичком или хемијском операцијом или хемијском реакцијом. Из овога произилази да скоро увек постоји танак слој (филм) на површини комада који треба да се стави у купатила чак и на електролитички полираним површинама.

Примарна шема декапирања је једноставна: комад који треба да се декапира потапа се у водени раствор од једног или више реактива, који могу да дејствују на превлаку.

Овде се сусрећемо са више потешкоћа:

- реактиви који се користе нагризају метал, доводе до раздвајања хидрогена, губитака купатила и метала. Хидроген се користи у оној мери у којој он повољно утиче на одвајање корозионог слоја, али је он штетан због кртости коју ствара површински апсорпцијом. Значи да је потребно дозирати средство за нагризање метала. Ово се постиже додавањем инхибитора за декапирање у примарном купатилу;
- производи за реакцију прикупљају се на површини и штите је од реактива. Овакву појаву избегавамо додавањем тензио-активних агенаса или продуката за квашење који поспешују контакт између раствора и метала. Они повећавају пенетрацију испод слојева и у пукотине и с пуним правом сматрамо их акцелераторима. Исти је случај и код површинског кретања;
- нека нагризања се врше са већим брзинама само при извесним температурама, тада је потребно да се купатило загрева;
- реактивни производи могу да измене активност купатила пре него што се постигне нормалан проценат смањења течности. Адитиви за убрзање (акцелератори), покретање површине или таложење омогућиће реактивирање купатила. У неким случајевима где електролиза побољшава нагризање, могуће је користити електролитичко декапирање.

Постоје и други фактори који утичу на избор купатила и његове услове коришћења:

- врста слоја који треба да се скине са носеће површине ношена комада,
- сигурност примене,
- брзина процеса (операције),
- цена куповине производа, време додавања или замене, губици, лакоћа корекције купатила,
- величина инсталираног материјала.

Декапирање се не може постићи добро без неких претходних познавања. Потребно је да се дају нека теоријска разматрања поводом прелиминарног испитивања природе корозивног слоја који треба да се одстрани. На основу таквог познавања могли бисмо да схватимо боље рад класичних купатила, улогу њихових различитих састојака као и улогу спољашњих фактора као што су температура и кретање површине.

Процес површинске заштите лима има за циљ заштиту лима од корозије. У овом случају коришћена је метода наношења цинка с обе стране дебљине 13 *mm*. Овако добијен површински заштићени електропоцинковани лим коришћен је при тачкастом заваривању и одређивању постојаности електрода, као и при одређивању механичких карактеристика. Превлака се наноси у галванском купатилима а постоји и топао начин (потапање).

7.1.2 Механичке карактеристике испитиваног челичног лима Č0148 P4

У експерименталним испитивањима примећиван је каросеријски декапирани лим ознаке Č0148P4 (FeP04) дебљине 0,8 и 1,5 mm. Површинска заштита лима вршила се тада у купатилима.

На квалитет заварене тачке велики утицај имају:

- јачина лима,
- тврдоћа лима,
- степен хладне обраде лима,
- дебљина лима и
- стање површине и друге особине лима који се заварује.

С обзиром на врло сложен технолошки поступак добијања каросеријског лима веома је тешко обезбедити стабилност квалитета. Ово је делимично последица и тога што одговарајући стандарди за квалитет лима прописују само минималне односно максималне вредности механичких особина.

Стандардна испитивања лима при производњи и преради углавном се заснивају на испитивању затезањем, одређивању хемијског састава, металографском испитивању микроструктуре, контроли тврдоће, провери дубоког извлачења и стања површине. Поред наведених карактеристика за дефинисање квалитета лима, у новије време све већи значај имају ванстандардни показатељи, као што је степен деформационог ојачања (n) и коефицијента анизотропије $A(r)$. Најзначајније карактеристике лима који се у овом раду, одређене су лабораторијским испитивањем.

При испитивању затезањем одређује се велики број карактеристика материјала битних за оцену способности лима за дубоко извлачење. За ово испитивање потребно је доста времена и материјала, поготово ако се пробни узорци секу под различитим угловима 0° , 45° и 90° у односу на правац ваљања, да би смо указали на анизотропијске особине у равни лима.

Сила затезања мерена је са тачношћу $\pm 0,1\%$ опсега скале, који је износио (0-20) kN.

Нискоугљенични челични лим, чије су механичке карактеристике испитиване, има ознаку према JUS-у Č0148P4 и номиналну дебљину $s = 0,8$ mm. Упоредо су испитиване и механичке карактеристике површински заштићеног лима, у овом случају то је електрохемијски поцинковани лим са обе стране.

Поред упоредног испитивања механичких особина, у даљем раду испитивана је и постојаност електрода при заваривању лимова електроотпорским тачкастим поступком.

7.2 Резултати механичких испитивања

Таблица 7.1 Механичке карактеристике обичног каросеријског лима Č0148P4

Правец сечења	R_m , MPa	$R_{p0.2}$, MPa	A_{80} , %	r , -	n , -
0°	319	233	36,25	1,0946	0,203
45°	324	244	31,625	0,871	0,236
90°	322	219	34,25	1,730	0,226

Таблица 7.2 Средње механичке карактеристике обичног каросеријског лима Č0148P4

R_m , MPa	$R_{p0.2}$, MPa	A_{80} , %	r , -	n , -
322	235	33,44	1,142	0,225

Таблица 7.3 Механичке карактеристике електропоцинкованог лима

Правац сечења	R_m , МПа	$R_{p0.2}$, МПа	A_{80} , %	r , -	n , -
0°	306	204	37,75	1,626	0,228
45°	330	248	32,25	1,843	0,182
90°	322	226	35,1	1,806	0,23

Таблица 7.4 Средње механичке карактеристике електропоцинкованог лима

R_m , МПа	$R_{p0.2}$, МПа	A_{80} , %	r , -	n , -
322	231	34,313	1,779	0,206

Упоредивањем резултата приказаних у таблицама 7.1 и 7.3 примећујемо извесне разлике између обичног и поцинкованог лима. Разлика између R_m и $R_{p0.2}$ је нешто већа код електропоцинкованог лима. Исто тако релативно издужење се незнатно разликује. Из ових таблица не смомо уопштено рећи који је лим боље обрадив због релативно малог броја испитиваних узорака, већ се у сваком примеру морају спровести детаљна испитивања.

Упоредивањем r -фактора приметимо разлику у корист електропоцинкованог лима, али с обзиром на велику вредност овог фактора од тачног мерења димензија, поменуте разлике могуће су и као последица недовољно прецизног мерења.

У оба случаја добијено је $r > 1$ што значи да је деформација по дебљини лима мања него по ширини, због чега ови лимови поседују знатну отпорност према смањењу па зато постоји мања могућност настајања локализованих деформација у процесу обликовања.

7.3 ПОСТОЈАНОСТ ЕЛЕКТРОДА

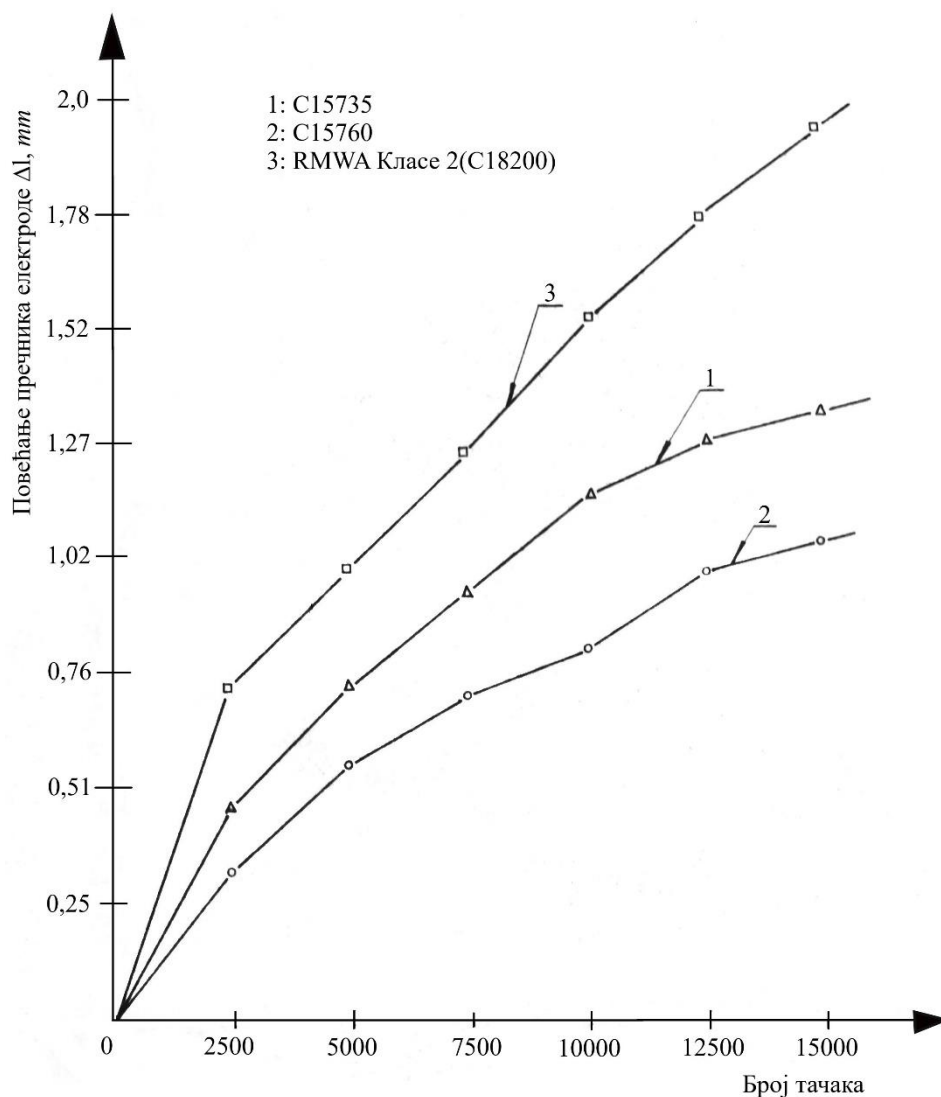
Под постојаношћу електрода подразумева се њихова способност да очувају одређеним границама почетне димензије и облик радне површине. При томе квалитет заварених спојева не сме да буде нижи од захтеваног. Постојаност електрода зависи од великог броја фактора од којих су основни:

- својства легуре од које је направљена електрода,
- својства површине делова који се заварују,
- температура на којој се не топи метал који се заварује,
- режим и темпо заваривања (параметри режима и струја),
- конструкција електрода (облик и димензије),
- хлађење електроде,
- димензије ливене зоне на добијеним спојевима.

До данас не постоји опште познати објективни критеријум по коме се оцењује постојаност електрода на машинама за контактено заваривање. Њихова постојаност може да се оцени бројем квалитетно заварених тачака који могу да се ураде без чишћења или замене електроде. Захтеви квалитетних спојева при додатним условима експлоатације могу да се односе на затезну јачину и димензије ливене зоне споја. На спољашњи изглед површине тачака, на чистоћу радне површине електрода и неке друге факторе. Велики број фактора који утиче на издржљивост електрода отежава утврђивање критеријума за оцену њиховог квалитета. Због тога се издржљивост електрода одређује експериментално.

Постојаност електрода од различитих легура можемо да добијемо на основу квалитета заварених тачака на различитим местима, уз израду графика зависности промене димензија радне површине електрода од броја заварених тачака.

Показатељем постојаности се сматра број заварених тачака до повећања радне површине електроде за 20% у односу на њену почетну величину као и укупно повећање тог пречника при заваривању (нпр. 1000 тачака). У процесу испитивања повремено се мери пречник површине електрода.



Слика 7.1 Утицај броја тачака на повећање почетног пречника

Видимо како се линија (график) отпорности C18200 погоршава док график C15760 тежи да остане раван. Тестови су показали да је проценат хабања ојачаног бакра, а посебно C15760 знатно смањен него код конвенционалног материјала класе 2 (C18200). Ово је карактеристика аутоматског заваривања из чега следи да је ојачан бакар бољи у условима рада аутомобилске индустрије.

Повећање века електроде од хладно кованог бакра C15760 при заваривању чистог челика је најмање 4 пута дуже од бакра C18200 у производним условима. Бакар C15760 не пријања за галванизовани челик приликом тачкастог заваривања, а исто тако је и век електроде приликом заваривања галванизованог челика 5 пута дужи од бакра C18200.

При заваривању електродама равне радне површине, контрола се врши на основу отиска електрода на оловној плочи, а при заваривању електродом сферне радне површине – помоћу одговарајућих шаблона.

Режими заваривања при испитивању електрода треба да се одреде тако да се обезбеди постојање минималне димензије и затезне јачине завареног споја. При одређивању века трајања електрода после сваких 500-1000 тачака (код заваривања челика обично се врши испитивање заварених узорака на затезање или се израђује макро избрусак (металографија) споја да би се провериле димензије споја.

Критеријуми оцене постојаности електрода на основу повећања пречника њихове равне радне површине могу се применити само при заваривању нискоугљеничних, легираних и нерђајућих челика, као и других метала. При заваривању лаких легура, провера димензија и облика радне површине електрода не може да буде јединствен критеријум за оцену постојаности пошто много пре промене димензије електрода, изузев легура од бакра, на површини заварених делова долази до затезања која сведоче о интензивном преласку материјала електроде на део и могућност местимичног кородирања делова који се заварују. Због тога се за критеријум оцене постојаности електрода при заваривању лаких легура узима број заварених тачака пре првог чишћења електрода. На потребу чишћења указује појава тамне мрље на површини заварене тачке као и лепљење електрода за узорке. Степен запрљаности може да се одреди влажењем површине тачке бензинским раствором.

Услови које треба да испуњавају заварени спојеви од лаких легура зависе од услова њихове експлоатације. На важним конструкцијама, неопходно је да спојеви буду чврсти и да на њима не буде трагова бакра на површини делова, да би се спречила појава корозије. При заваривању конструкција које ће бити изложене прорачунским оптерећењима и које ће радити у условима у којима није битна отпорност према корозији, основни услов који треба да задовољи материјал електроде је заваривање максималног броја тачака без чишћења и преоштравања. Прљање радне површине електрода, при заваривању легура алуминијума обично почиње на прстену који одговара периферији ливене зоне заварене тачке, где је густина струје максимална. Испитивања електрода од легуре бакра са сребром и до 0,16% и бакра са додатком магнезијума и бора, су показала да се највећи број тачака (500) завари до појаве затупљења на површини делова. Електроде од кадмијумове бронзе су нешто слабије у погледу броја заварених тачака, док електроде од легуре бакра са 0,08% хрома и бакра са хромом и цирконијумом пријањају на површине заварених делова већ после заваривања малог броја тачака (50).

На постојаност електрода при тачкастом заваривању има велики утицај материјал и стање површине делова који се заварују. Електроде се чисте после заваривања 400-500 тачака, што зависи од квалитета њихове припреме. При заваривању легура алуминијума чије су површине механички обрађене, нпр. жичаном четком, електроде се прљају три до пет пута брже него у случајевима када се површине припремају хемијском обрадом. Треба нагласити да је постојаност електрода при заваривању алуминијумских легура високе затезне јачине, знатно нижа него при заваривању алуминијума и мангана. При тачкастом заваривању алуминијумских легура мале дебљине загревање електрода је нарочито интензивно.

У неким случајевима се у циљу побољшања површине и повећања постојаности између електроде и делова (или само једног дела) поставља бакарна фолија дебљине 0-0,2 mm. Пошто се сваки пут при заваривању користи чиста фолија електроде се практично не прљају тако да је површина добијених тачака доброг квалитета.

Повећање броја тачака постигнутих без чишћења електрода може се остварити ако се површина делова од легуре алуминијума пре заваривања протрља шпиритусом. У неким гранама индустрије, посебно у аутомобилског индустрији темпо заваривања при масовној

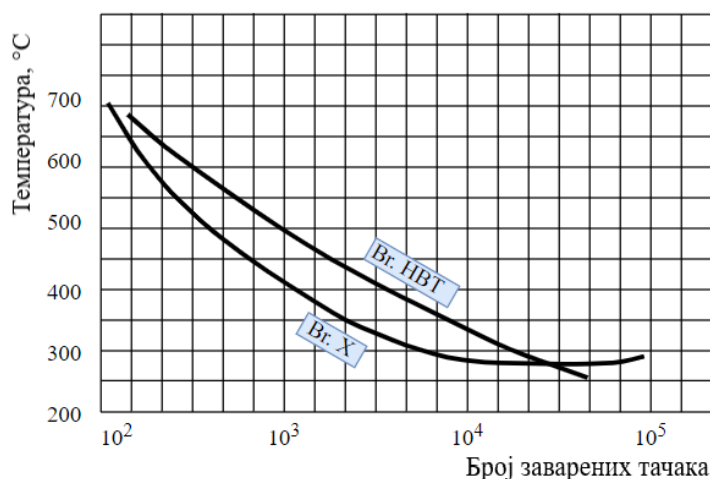
производњи је врло висок и може да достигне 200 тачака у минути. Због неизбежног повећања температуре у контакту електрода, наглог пораста броја циклуса загревања и хлађења и наизменичног дејства силе углови рада електроде се знатно погоршавају. Долази до бржег омекшавања метала што опет намеће потребу чешће чишћења електрода при убрзаном темпу заваривања. Ако при заваривању нискоугљеничних челика дебљине 1+1 mm ($t_z = 0,1$ s) електродама од хромне бронзе и темпом од 40 тачака у минути њихова идржљивост достиже 7500-9000 тачака, то је при темпу од 200 тачака у минити свега 200-2500 заварених тачака.

Дужина протицања струје битно утиче на век трајања електрода при тачкастом заваривању легура алуминијума, тако се са повећањем t_z повећава температура у контакту електрода-лим и интензивније се одвијају процеси узајамног преношења метала.

При тачкастом заваривању нискоугљеничних челика дебљине 1+1 mm електродама од хромне бронзе, са повећањем t_z са 0,1 на 0,7 s век трајања електрода опада са 8000 на 4000 тачака.

Утицај режима заваривања на постојаност електрода може такође да се оцени уопштеним параметром – температуром која се мери на радној површини електрода при јадном или другом режиму.

Благе режиме заваривања прати висока температура у контакту електрода-лим, а оштре нижа (температура се мери на површини електрода осцилографијом помоћу термоелемента причвршћеног на чеону страну електрода).



Слика 7.2 Зависност постојаности електрода различитих легура од температуре на чеоној површини електроде

На слици 7.2 у полулогаритамским координатама показана је зависност броја заварених тачака (до повећања почетног пречника електрода за 20%) од температуре на чеоној површини електрода од различитих легура. Како се види са графика, на високим температурама електроде хромне бронзе су мање отпорне од испитиваних легура НВТ. У исто време, при релативно ниским температурама (230°C) те електроде од хромне бронзе по отпорности превазилазе електроде од испитиваних легура НВТ.

Испитиване легуре се међусобно разликују не само по физичко-механичким својствима, електропроводљивости, тврдоћи на собној и повишеним температурама, затезној јачини и пластичности (које могу да утичу на постојаност електроде) већ и по величини зрна. Највећа зрна у почетном стању има бронза НВТ. Познато је да при повишеним температурама већу отпорност на сабијање поседују материјали са крупнозрнастом структуром а при ниским са ситнозрнастом.

Пошто су на чеоним странама електрода могући процеси сабијања то добијена законитост промене отпорности електрода од легура различите величине зрна може се објаснити испитивањима постојаности.

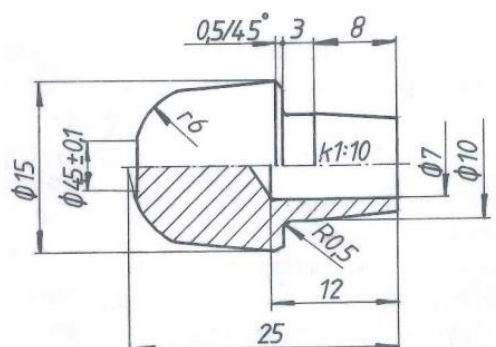
Испитивања постојаности хромне бронзе која садржи 0,3-0,9% Cr при тачкастом заваривању угљеничног челика показала су већу отпорност електрода са садржајем хрома од 0,4-0,5% што се објашњава оптималним садржајем доста крупних зрна са великом количином повољно распоређених дисперзионих честица.

Постојећи подаци о постојаности електрода омогућавају давање препорука како о материјалу електрода тако и о технологији њихове израде и термичкој обради. При изради електрода ливењем обично се добија крупнозрнаста структура па су такве електроде постојаније при режимима заваривања које прати повећано ослобађање топлоте на радној површини. Легуре, чија својства могу да се повећају термомеханичком обрадом, треба да се користе за електроде само ако су термички обрађене. Ово је посебно важно за шупљикасти материјал од обојених метала који се обично испоручује термички обрађен.

7.4 ИСПИТИВАЊЕ ПОСТОЈАНОСТИ ЕЛЕКТРОДА ПРИ ЗАВАРИВАЊУ КАРОСЕРИЈСКИХ НЕЗАШТИЋЕНИХ И ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНИХ ЛИМОВА

7.4.1 Практична проба на незаштићеним лимовима

Практичне пробе имају за циљ да се одреди постојаност електрода при заваривању незаштићених и површински заштићених лимова тј. при заваривању обичног каросеријског и електропоцинкованог лима. За ово испитивање примењиване су типизирани електроде.



Слика 7.3 Облик примењене електроде

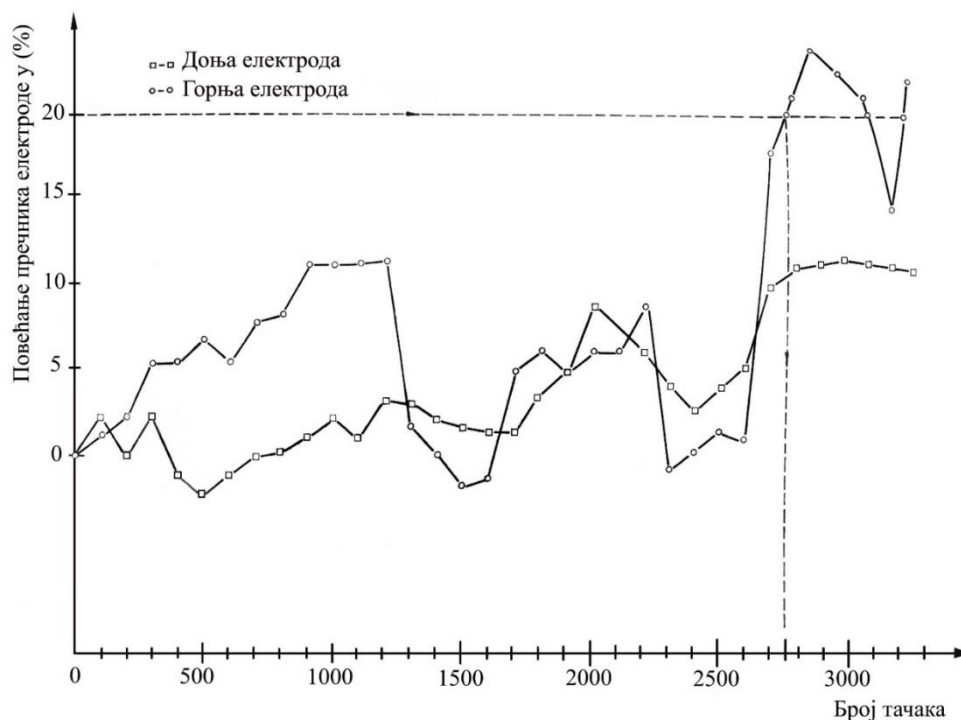
Овим електродама тачкасто је завариван лим Š0148P4, дебљине 0,8 mm, на машини снаге 60 kVA. Остале карактеристике машине су: напон $U = 380 \text{ V}$, струја $I = 15,8 \text{ kA}$, максимална и минимална снага у опсегу (135-21) kVA, фреквенција $f = 50 \text{ Hz}$, фактор снаге $\cos \varphi = 1$, тежина $P = 500 \text{ kN}$, INT (%) = 50.

Као критеријум постојаности усваја се број заварених тачака до проширења врха електрода за 20% у односу на полазни пречник (проширењем пречника врха електроде за 20%, повећава се контактна површина између електроде и лима за 44%, а тиме се густина струје и јединична сила притиска смањују, што као коначан ефект има знатно смањење површине ливеног језгра тачке). Заваривање истим параметрима при проширењу врха електроде већим од 20% не могу се добити заварене тачке доброг квалитета.

Ова метода је веома једноставна, поуздана и доста верно симулира рад у погону. При избору параметара заваривања, намерно су узабрани они по којима се по век електрода остварује веома неповољан режим.

Промена пречника врха електроде одређивана је привлижно при сваких 100 заварених тачака. Пошто су отисци углавном неправилног облика, мерени су спрегнути пречници, а као репрезент узета је њихова геометријска средина

Број заварених тачака у овом случају није регистрован помоћу електромагнетног бројача већ помоћу бројања до приближно 100 заварених тачака. Графички приказ промене полазног пречника контактних површина електрода, за по два пара, у зависности од броја заварених тачака, дат је на слици 7.4. Полазни пречник у случају заваривања обичног каросеријског лима износио је $4,5 \pm 1 \text{ mm}$, $d = k \cdot s$. Експериментално добијени резултати дати су изломљеним линијама.



Слика 7.4 Криве постојаности горње и доње електроде при заваривању незаштићеног каросеријског лима

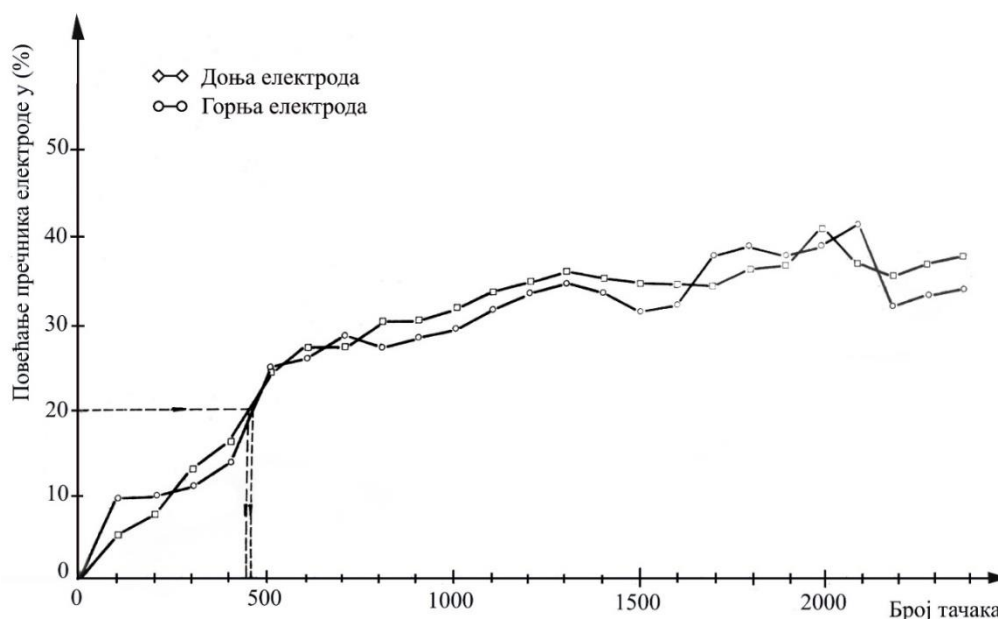
На основу резултата практичних проба може се закључити да је постојаност електрода при заваривању обичног каросеријског лима око 2700-2800 тачака, при чему је коришћен критеријум – повећање почетног пречника за 20%. У овом случају материјал електроде је Mallory 100 (Електроде за тачкасто заваривање угљеничних челика и алуминијум месинга. Овај материјал је посебно погодан за заваривање површински заштићених метала).

Таблица 7.5 Карактеристике материјала примењене електроде

Материјал	Тврдоћа, HRB	Температура омекшавања, °C	Ел. проводљивост, %	Затезна јачина, N/mm^2
Mallory 100	258	500	50	530

7.4.2 Практична проба на површински заштићеним лимовима

Као и у претходном случају, практична проба има за циљ да се одреди постојаност електрода при заваривању електропоцинкованог лима. За ово испитивање примењена је електрода као на слици 7.3 а заваривање је вршено на истој машини. Резултат пробе дат је на слици 7.5.



Слика 7.5 Криве постојаности горње и доње електроде при заваривању електропоцинкованог лима

Резултати практичних проба су показали да је постојаност електрода електропоцинкованог лима знатно мања него при заваривању обичног каросеријског лима при истим режимима и истим материјалом електроде. Ова много нижа постојаност објашњава се као последица сложених механичких, физичких, хемијских, топлотних и електричних појава.

У даљем тексту осврнућемо се на неке начине заштите каросеријских лимова наношењем заштитних превлака као и оцену заварљивости површински заштићених лимова.

У тачки 4.1 приказан је широк спектар електродних материјала како домаћих тако и страних. Упоредивањем постојаности домаћих и страних електрода, утврђено је да предност имају страни произвођачи због веће постојаности.

Класични материјали се могу применити за тачкасто заваривање и при већим брзинама заваривања иако им је постојаност знатно нижа од материјала које производе познати произвођачи као што су Mallory, Elbrodur итд.

Доказано је да на постојаност електроде велики утицај има пречник радног дела електроде D. Електроде са малим пречником радног дела имају већи пречник врха радне површине. Ово се објашњава тиме што су губици топлоте кроз саму электроду мањи услед мањег пречника, а из истих разлога хлађење је боље. Зато је оправдано изабрати већи пречник врха електроде, па се такве електроде употребљавају за заваривање већих дебљина. Како су показала искуства, облик радне површине (сферна или равна) имају велики утицај на постојаност електрода, како при заваривању нискоугљеничних тако и нерђајућих челика.

Ипак електроде са сферним обликом контактне површине, мање су осетљиве на поремећаје при инсталирању, него електроде са равном површином врха. Због тога, при заваривању делова великих дебљина алуминијумских, бакарних и титанових легура, на машинама са радијалним ходом треба употребити електроде са сферном површином.

Закључак је да се за делове велике дебљине користе електроде са сферном површином, зато што је њихово трошење мање. На постојаност електрода са равним врхом електроде, велики утицај има угао закошења те површине. Већу постојаност су показале електроде са углом врха од 120° , овај угао је препоручен за праве електроде.

Постојаност електроде се повећава интензивним хлађењем течностима и повећањем канала за хлађење унутрашњим озубљењем. Ипак, та решења компликују израду и

експлоатацију и због тога им је примена ограничена. Поред наведених елемената на постојаност електроде велики утицај има и растојање од врха канала до радне површине (дужина радне површине).

7.5 ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНИХ ЛИМОВА

7.5.1 Појам и дефиниција заварљивости

Заварљивост је комплексна технолошка карактеристика материјала којом се углавном изражава утицај процеса заваривања на заварени спој и његово понашање у топлотном и деформационом смислу у току и после заваривања. Стога се може рећи да појам заварљивости одређује релативну способност материјала да ствара заварене спојеве одабраном технологијом заваривања, а да изведени спојеви удовољавају свему што се од њих тражи у радним условима. То значи да, нпр. при REL заваривању, материјал заварљив овим поступком може образовати спој чија су тражена својства приближно једнака својствима завариваног материјала. Тражена својства своде се на испуњавање техничких услова који се односе на механичке, структурне и хемијске особине метала шавова и зоне око шавова и споја у целини.

С обзиром на комплексност заварљивости, дефиниције и оцене, подела на уже појмове олакшава проучавање и оцену погодности материјала за одређене заварене конструкције. Стога се посебно разматрају: *металуршка, конструкциона и технолошка заварљивост*.

Металуршка заварљивост материјала зависи од низа фактора: хемијског састава, почетне структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. На ову заварљивост утичу све металуршке промене у материјалу које настају под дејством топлоте унете при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног снижења механичких и технолошких особина споја, нарочито у зони око шавова, што значи да код материјала рђаве заварљивости могу настати знатне промене хемијског састава, односно могу се појавити тврде и крте структурне компоненте, прслине и тсл., све зависно од датог случаја.

Утврђено је да су метали и легуре незаварљиви са металуршке тачке гледишта ако се њихови саставни хемијски елементи међусобно не растварају у чврстом агрегатном стању већ образују тврда и крта хемијска једињења (нпр. Fe-Al, Fe-Cr, Ni-Al, ...).

Насупрот томе, заварљиви су сви хомогени метални материјали који образују чврсте растворе и нееутектичке или еутектичке смеше, односно сви материјали који поседују металуршку заварљивост могу се успешно заварити, ако се одабере одговарајући метод, поступак и технологија заваривања.

Конструкциона заварљивост показује утицај низа параметара на пројектовање заварене конструкције, нпр. дебљине, врсте, броја и распореда шавова, које конструктор поставља пројектним захтевом за дати случај, све према врсти оптерећења и другим радним условима.

Технолошка заварљивост обухвата технолошке параметре који утичу на особине заварених спојева, нпр. додатни материјал, метод и поступак заваривања, погонску енергију (унос топлоте), брзину хлађења, итд. При томе се цени да ли се технолошки поступак изводи без тешкоћа или се морају применити посебне мере (предгревање, догревање у току и отпуштање после заваривања, рад у специјалним атмосферама), а оцена се доноси према предузетим мерама и добијеним резултатима.

Са оперативног становишта које се односи на понашање неких материјала у току заваривања или наваривања, они се оцењују као "добро заварљиви" када је шав чист и

хомоген, тј. када се основни и додатни материјал стапају у хомогену легуру, а при томе се топе без тешкоћа, без великог прштања (бризгања) и појаве прслина, гасних мехурова и других грешака.

Нечистоће на страницама жлеба и околини: прљавштине, масти и уља, коварине и тсл., погоршавају оперативну заварљивост па је неопходно да се све споменуто одстрани из зоне топљења у оквиру припреме за заваривање.

Општа заварљивост представља глобалну оцену појединачно објашњених компонената заварљивости при чему се за коначну оцену процењује већи број фактора као што су: основни и додатни материјал, заваривачки рад, врста напрезања у шавовима и у близини концентратора напона. Све наведено се разликује од случаја до случаја. При процени склоности завареног споја ка кртом лому, битан је критеријум да ли је спој способан да све велике сопствене напоне поништи или смањи пластичним деформисањем, тј. претварањем еластичних деформација у пластичне.

Оцена заварљивости метала и легура своди се на то да се предвиде особине заварених спојева после заваривања. Коначне особине за дати материјал и технологију зависе од процеса и појава који се дешавају и настају у основним зонама завареног споја:

- у шаву, где се материјал потпуно топи и меша са додатним материјалом, а затим очвршћава,
- у прелазној зони - зони стапања - полустопљеног материјала и
- у зони утицаја топлоте (ЗУТ-у), где се основни материјал у чврстом агрегатном стању и мења се услед загревања и хлађења.

Само неке промене настале у овим зонама могу се непосредно запазити, док се о већини закључује на основу резултата испитивања већ изведених пробних спојева, односно оцењује се склоност материјала ка образовању прслина, склоност према кртом лому, старењу и тсл.

Из изложеног се може закључити да је при заваривању одређеног материјала потребно утврдити:

- како се материјал понаша при заваривању одређеним технолошким поступком и
- како се заварени спој понаша у најнеповољнијим процесним условима заваривања.

То значи да ће материјал добре заварљивости образовати поуздане спојеве, односно компактне и непрекидне заваре, и довољно јаке и пластичне шавове и ЗУТ, да издрже сва напрезања у процесу заваривања, тј. да поседују одговарајућу технолошку чврстину и да се одупру свим непредвиђеним преоптерећењима у току рада тако што ће се локално пластично деформисати. Другим речима основни материјал мора да поседује добру пластичност и жилавост.

Образовање нових структура у завареном споју зависи од кинетике кристализације и преображаја унутрашње грађе у чврстом стању све зависно од услова заваривања, хемијског састава основног и додатног материјала и стања растопа.

Стога за неке материјале (ливено гвожђе, бакар), добра металуршка заварљивост не значи истовремено и довољну глобалну заварљивост, јер се метал шава и ЗУТ, и поред добре металуршке заварљивости могу знатно разликовати од основног материјала поготову по механичким особинама и херметичности споја.

Зато ће и при задовољавајућој металуршкој заварљивости, тек, технолошка заварљивост указати на способност основног материјала да се са одабраном технологијом остваре тражена својства и компактан спој. То доказује да се, полазећи од добре металуршке заварљивости, може изабрати одговарајући метод и поступак заваривања који даје заварени спој задовољавајућег квалитета.

Из до сада познатих сазнања за оцену и дефиницију заварљивости запажа се да нема једнозначних и бројно одређених величина, ове за праксу важне карактеристике. Може се зато, као пример, навести најраспрострањенија дефиниција заварљивости Међународног института за заваривање која гласи:

"Метални материјал се сматра, на одређени начин заварљив, ако помоћу заваривања, при коришћењу одговарајуће технике спајања, настају јединствени метални спојеви, који испуњавају захтеве, који се постављају за својства локалних шавова и њихов утицај на чврстину конструкције".

Глобални смисао ове дефиниције и других дефиниција је да су непотпуне и неподобне за праксу што упућује на даља истраживања заварљивости посебно са становишта поузданости. То је разумљиво, јер је заварљивост комплексан појам и својство зависно од материјала и његовог понашања у току и после заваривања, а такође и од технолошког поступка заваривања, као и од врсте заварене конструкције. Из наведеног се запажа да за оцену заварљивости треба увек узимати у обзир узајамну везу (1) конструкције (крутост, дебљина, врста споја), (2) материјала (способност заваривања) и (3) технологије (могућност заваривања). Због повезаности ових чинилаца производног система није увек могуће заварљивост оценити само једном врстом практичних проба заварљивости, па се за челике уводе допунски показатељи који се односе на:

- структуру,
- компактност,
- механичка својства и др.
- У пракси су уобичајена два приступа за оцену заварљивости:
- процена задовољавајућих вредности показатеља заварљивости за испитани облик споја, материјал и начин заваривања (тестирање материјала) и
- избор услова и других мера при заваривању да би се постигли задовољавајући резултати (потврда технологије).

Практичним пробама одређују се поједини видови заварљивости и доносе оцене о подобности испитиваног материјала и одабране технологије. Најважнији критеријум за оцену заварљивости је одржавање металног континуитета тј. целовитости завареног споја, што може бити нарушено кад год се појаве прслине одређене величине и распореда.

Према механизму настајања прслине могу бити:

- Вруће (топле),
- Хладне,
- Ламеларне и
- Прслине жарења.

Поред наведеног критеријума целовитости, битне су и граничне механичке особине:

- Тврдоћа завареног споја (укључујући метал шавова, ЗУТ и ОМ),
- Својстава отпорности и
- Ударна жилавост.

Вредности тврдоће и затезне јачине, као међусобно линеарно зависне величине, користе се као једноставан показатељ заварљивости, јер њихово повећање у ЗУТ-у указује на смањење пластичности и ударне жилавости, односно погоршање заварљивости.

Ударна жилавост је индикатор који најбоље указује на промене технологије и/или режима заваривања, које се нарочито испољавају у ЗУТ-у, па се често оцена заварљивости доноси испитивањем жилавости у зони утицаја топлоте, зони стапања и основном материјалу (нпр. проба Чабелке).

7.5.2 Методе за испитивање заварљивости

У практичним условима нема "идеалне заварљивости", тј. не може се ниједном методом заваривања добити спој потпуно истих особина у шаву, ЗУТ-у и основном материјалу.

Како се стварна заварљивост разликује од идеалне, услед неизбежних разлика у особинама насталих при заваривању, то се заварљивост своди на процењивање граничних величина неких показатеља заварљивости.

Према многим препорукама полазна основа за процену заварљивости непознатог материјала јесте одређивање хемијског састава и механичких особина; у том смислу користе се:

1. Рачунске и емпиријске методе,
2. Лабораторијске методе,
3. Практичне пробе заварљивости и
4. Процена заварљивости на основу КН (KNZ) дијаграма.

Подаци потребни за оцену заварљивости горњим методама су:

- хемијски састав материјала (челика),
- дебљина, тип и понекад крутост завареног споја и
- метод заваривања.

7.6 ЗАВАРИВАЊЕ ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНИХ ЛИМОВА

На спољашње површине предмета од угљеничних и нисколегираних челика изложених хемијској или електрохемијској корозији, често се наносе танки слојеви или превлаке неких корозивно отпорних метала (Al, Zn). Поступак површинске заштите алуминијумом назива се *алитирање*, а површинска заштита челичних лимова и цеви цинком зове се *гальванизација*. Алитирани или поцинковани лимови отежавају заваривање. Наиме, површинска превлака се топи пре основног метала, па може контаминирати основни и додатни метал у купки. Цинк у шаву доводи до појаве прслина у зони шавова. То такође умањује ефикасност заштитне превлаке.

Методи заваривања који се уобичајено користе за челике без површинске заштите, такође се могу применити и за површински заштићене челике. Ипак, треба применити додатне материјале са ниским садржајем силицијума, јер шавови који садрже мање од 0.20% С и уопште нису склони ка прслинама изазваних цинком

7.6.1 Проблеми електроотпорског заваривања површински заштићених челичних лимова

Особине танких лимова при практичној примени могу бити побољшане металним или органским корозивно отпорним превлакама. Заштита против корозије постаје све важнија са све већом употребом соли за одржавање путева, са порастом загађења ваздуха у великим градовима и индустријским областима. Повећањем деловања корозије смањује се век трајања каросерије аутомобила и других производа од танких лимова. Штете на каросеријама аутомобила проузроковане корозијом су велике и тешко их је смањити. Јако кородирани делови носећих делова умањују њихову општу чврстоћу као и увојну и савојну крутост. Способност апсорбовања ударне енергије се смањује. У САД је предложено да се уведе ударно испитивање после осмогодишње употребе аутомобила.

Корозија спољашњих делова каросерије може се ограничити побољшањем начина наношења боје. Заштитно деловање правилно примењеног система бојења још се умањује абразивним деловањем песка и ситног камена, као и малим оштећењима у раду.

Много је већи проблем кад корозија нападне шупље делове конструкције где је заштита бојењем, врло мање или више сумњива. Произвођачи стога улажу много напора да побољшају конструкцију делова изложених могућности корозије и у многим случајевима они почињу да примењују боље корозивно отпорније материјале. Без обзира на неке поступке код којих се израђују извесни делови од нерђајућег челика и ширу употребу алуминијума, ови скупни материјали тешко да ће имати перспективу у конструкцији аутомобила. Изгледа да неке врсте површински заштићених лимова, као што су цинком или епокси смолом заштићени лимови, у садашњим економским условима, имају много више предности. Нажалост, поред извесних проблема са пресовањем, при њиховој примени мора се рачунати са још најмање једном главном тешкоћом, а то је веома отежано заваривање када се упореди са незаштићеним нискоугљеничним челичним лимовима. Проблеми заваривања тј. електроотпорског тачкастог заваривања површински заштићених лимова су предмет овог рада.

7.6.2 ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ ПОВРШИНСКИ ЗАШТИЋЕНИХ ЛИМОВА (ПОЦИНКОВАНИХ)

У вези са заваривањем поцинкованог лима треба истаћи да у принципу не постоје технолошке препреке за његову примену. Заваривање поцинкованог лима не изискује специјалне машине, већ се врло успешно може спровести на постојећим машинама. Имајући у виду мањи прелазни електрични отпор него код обичних каросеријских лимова, при заваривању овог лима потребна је јача струја и дуже време заваривања, што значи да је за заваривање поцинкованог лима потребна знатно већа енергија. Према литературним подацима за сваку заварену тачку троши се 30% више енергије него при заваривању обичних лимова.

Општа тешкоћа при тачкастом заваривању скоро свих врста комерцијално произведених заштита је више у смањеном веку електрода за заваривање, проузрокованом вишим термичким оптерећењем неопходним за заваривање лимова са превлакама, које имају ниску температуру топљења (цинк, калај, олово), легирањем електроде са површински заштитним материјалом, површинским оксидима (алуминијум), производима сагоревања мазива и органских заштита.

Контаминирањем или легирањем електрода погоршавају се њихове механичке и електричне особине па се морају често поново оштрили или замењивати. Ово је непрактично и скупо али неопходно, јер се густина струје у шаву смањује и настаје незадовољавајући спој - особине неопходне за рад шавова у практичним условима ће опати.

Могуће мере смањења корозије су следеће: побољшање начина заштите, побољшање електродног материјала, оптимизација процеса заваривања, корекциони систем код процеса аутоматског управљања. Углавном се истражују два последња начина.

Разматраћемо заштиту на бази цинка која се највише примењује. Изгледа, постоје само два начина како да се побољша заварљивост поцинкованих челичних лимова:

- 1) Наношење превлаке цинка што је могуће тање и равномерније. Могућа решења су галванизација лимова, избор различитих дебљина превлака - тања са стране електрода, дебља на додирним површинама и једнострана заштита.
- 2) Примена цинка у облику који има већу електричну отпорност и механичке особине као интерметална једињења или легуре цинк-гвожђе или цинк-никл или прах цинка везаног органским материјалима. Стога се неопходна струја заваривања мора применити, таблица 7.6.

Таблица 7.6 Препоручена струја заваривања и температуре топљења модификованог слоја од цинка на нискоугљеничном челику

Заштитни систем	Температура топљења, °C	Релативна струја заваривања
Zn	420	1.45
Zn - 9Fe	594	1.34
Zn - 23 Fe	705	1.22
Zn - 30 Fe	787	1.17
Zn -20 Ni	860	1.36
Zn - 27 Ni	420	1.45

*Струја заваривања за незаштићен челик, пречник сочива 3 mm, једнака је 1.0.

Код обе од ове две могућности, које се такође сједињују за исти материјал, систем мора бити пројектован са гледишта неопходне корозионе отпорности.

За тачкасто заваривање заштићених челика у текућој пракси примењују се класични преципитационо отврднути материјали од Cu-Cr-Zr или Cu-Cr-Ti. Код ових је материјала не само хемијски састав већ углавном и метод израде (на хладно или топло), пресудни фактор који утиче на њихове радне особине.

Таблица 7.7 Особине различитих електродних материјала на собној температури

Материјал	Тврдоћа, HRB	Ел. проводљивост, % IACS	Затезна чврстоћа, MPa	Издужење, %	Температура омекшавања, °C
Elbrodur HF (Cu-Cr-Zr)	81-90	76-86	540-640	10-20	500
Elbrodur N (Cu-Cr-Zr)	71-85	81-90	440-540	10-25	475
Elbrodur RS (Cu-Cr-Zr)	71-77	81-90	390-440	18-25	356
RMWA Класа 2 (Cu-Cr)	75	75	500	13	482
Cu-1.57% Al ₂ O ₃	77	87	600	18	927
Cu-2.68% Al ₂ O ₃	84	82	650	13	927

Нека истраживања била су извршена са електродним материјалом који се састоји из бакарне основе и волфрамских или молибденских влакана за ојачање, али резултати још нису широко примењени, сем за неке специјалне намене где се користе волфрамове легуре (најчешће са бакром), које имају мању проводност од легура бакра али знатно већу тврдоћу.

Најзад, амерички аутори су објавили резултате у вези са развојем и истраживањем нових дисперзионо отврднутих електрода (Cu-Al₂O₃). Особине ових електрода зависе од сложеног начина производње који укључује синтеровање, унутрашњу оксидацију алуминијума и топло и хладно обликовање. Постоје неки подаци о истраживањима сличних материјала у другим земљама али нажалост ми данас још не располажемо таквим материјалима.

Испитивањима којима је вршено разарање спојева поцинкованог лима, утврђено је да је потребна већа сила смицања, захваљујући допунској јачини добијеној на рачун стапања цинка. Ово указује на одличну заварљивост поцинкованог лима, чак и нешто бољу од

обичног лима. Треба напоменути да је постојаност електрода код заваривања поцинкованог лима много мања и да се захтева чешће чишћење, што још више поскупљује производњу.

Неки аутори наводе металографска испитивања и јачину на кидање завареног споја, као критеријуме постојаности електрода, па су у том смислу вршена практична механичка и микрографска испитивања при чему се мере силе кидања тачкасто заварених узорака. Међутим, ова микрографска испитивања и одређивање јачине на кидање споја нису дала жељене резултате, тј. нису показатељи постојаности електрода.

При изради заварених конструкција примењују се челични лимови са различитим врстама површинске заштите. Заштитна превлака повећава отпорност против корозије. Неки типови покривача истовремено дају и декоративни изглед завариваном делу. За површинску заштиту лимова употребљавају се цинк, олово, калај, алуминијум, хром, бакар и тсл. Понекад се површина челичног лима покрива пластичним масама или заштитном скрамом нанетом хемијским путем (фосфатирање) или процесима електроталожења (електрофореза). Површина превлаке (лице покривача) мења електрични отпор зависно од услова загревања и заваривања.

Карактер промене отпора на месту заваривања се такође мења. При заваривању незаштићених челичних лимова после краткотрајног пада, отпор расте и достиже максимум у моменту растапања језгра. При заваривању површински заштићених места, максимална вредност отпора је мање изражена. При заваривању таквих материјала неопходна је промена параметара (режима) заваривања.

Услови рада електрода при заваривању челика покривених танким заштитним слојем су отежани. Постојаност контактне радне површине електрода се смањује. Површина са танким заштитним слојем има мању температуру топљења од материјала електроде, па истопљени метал превлаке прелази на површину електроде, лепи се, оксидише и чак легира са материјалом електроде. Механизам разарања и преноса посебно лакотопљивих покривача разматра се као комплексан процес, који се састоји из хладног и топлог везивања, дифузије, електропреноса и сублимације. Све то повећава отпор на контакту електрода-лим, захтева чешће чишћење радних површина електроде и тиме снижава постојаност (радни век).

Због већег загревања на месту контакта електрода-лим делимично се разара превлака и тако смањује отпорност према корозији. Степен поремећаја аникорозионих особина зависи од типа превлаке, одабраног циклуса заваривања, његових параметара, материјала електроде и стања радних површина.

У циљу повећања дуготрајности каросерија све више се у аутомобилској индустрији примењују поцинковани лимови. Цинк штити површину дела од електрохемијске корозије на одређено време. Такав лим се доста добро заварује и боји. Цинкана превлака у условима експлоатације аутомобила продужава његов век више него други покривачи (боје). У целокупној заштити против корозије од таквог челичног лима произвођачима он служи као мера за поређење у односу на мање ефикасне методе заштите. Према неким литературним подацима, на једном аутомобилу утроши се знатна количина истопљеног цинка и цинка неопходног за галванску заштиту.

За цинковање се најчешће примењују нискоугљенични челици, масовно коришћени при изради пресовано-заварених конструкција. Превлака се може нанети топлим потапањем или у галванским купатилима. Слој мора бити што равномернији да би се тачкасто заваривање успешно извело.

Технологија цинковања треба да буде таква да спречи образовање интерметалног једињења гвожђа и цинка, који смањује својства пластичности лима и погоршава заварљивост. На смањење пластичности утиче формирање неравномерне структуре при жарењу и цинковању, а такође је могућа и појава водоничне кртости.

[У зависности од намене лаких, средњих и тежих покривача, различитих дебљина, одређује се потребна маса покривача по јединици површине лима. Код лаких покривача маса цинка на 1 m^2 износи 120-275 g, средњих 245-410 g и тежих 390-685 g, при средњој дебљини покривача одговарају 14, 21 и 30 μm . (литературни подаци!)]

Понекад се у циљу снижавања потрошње цинка и побољшања заварљивости примењују лимови с једностраним покривачем или двостраним са разним дебљинама. Специјално за аутомобилску индустрију израђују се двострано заштићени лимови различитих дебљина. Дебљина превлаке цинка са једне стране је 2.5-6 μm , а са стране више подложне корозији 20-25 μm . Дебљина покривача утиче на заварљивост. Са повећањем дебљине заварљивост опада, треба повећати струју заваривања, изменити циклус заваривања и добро/чешће чистити радне површине електроде.

При заваривању поцинкованог челичног лима површина мора бити чиста, без уља, масти, боје, лакова и других нечистоћа. Понекад се на површини лима појављују оксиди цинка (бели слој) који отежава заваривање и треба га odstrанити пре заваривања.

Таблица 7.8 Режији тачкастог заваривања поцинкованих нискоугљеничних челичних лимова

Дебљина лима, mm	Пречник електроде, mm	Сила на електроди, kN	Време заваривања, s	Јачина струје, kA	Пречник сочива, mm	Сила разарања, kN
0.8	4.0	2.15	0.22	10.5	4.3	4.20
0.9	4.5	2.50	0.24	11.0	4.6	5.00
1.0	5.0	2.85	0.26	12.5	5.0	6.35
1.3	5.5	3.80	0.36	14.0	5.8	9.10
1.5	6.5	4.87	0.46	15.0	6.6	11.35
1.9	8.0	6.35	0.56	19.5	7.9	14.50
2.4	9.0	8.20	0.64	24.0	9.0	19.10
2.8	10.5	10.0	0.78	28.5	10.4	23.15

У табелици 7.9 приказани су Режији заваривања поцинкованих нискоугљеничних челичних лимова при средњим дебљинама галванских превлака. У поређењу са "оштрим" Режијима који се примењују при заваривању незаштићених челичних лимова, при овим Режијима увећана је јачина струје за око 40%, времена заваривања и до 90% и сила на електродама до 20%. Почетни пречник електрода се у току заваривања повећава, делимично разара, а околу заварене тачке ствара се прстен од растопљеног цинка.

Постојаност на корозију на месту заваривања унеколико се снижава (до око 20%) и са делимично разореног прекривача под врхом електрода. Време искивања после прекидања протока електричне струје неопходно је увећати (нпр. за 0.40 s када се преклопно заварују поцинковани челични лимови дебљине 1.6 mm) (таб. 7.9). У том моменту слој цинка растапа се при заваривању, хлади и у мањим количинама прелази на на контактну површину електрода. Према неким препорукама за лимове дебљине преко 1.5 mm потребно је увећати силу на електродама чиме се повећава јачина споја и побољшава постојаност електрода (смањује се налепљивање на контактним површинама).

При заваривању поцинкованих лимова, примењују се електроде од бронзе типа BrX (саства: 0.4-1.0% Cr, тврдоће: 110-130 HB, температура рекристализације: 350-450°C, проводљивости у односу на чист бакар око 70-80%) или легуре BrXZr (саства: 0.4-1.0% Cr и 0.03-0.08% Zr, тврдоће: 80-85 HB, температура рекристализације: 480-500°C, проводљивости у односу на чист бакар око 80-85%), које имају добру постојаност.

Таблица 7.9 Режи́ми тачкастог заваривања поцинкованих нискоугљеничних челичних лимова (средња дебљина превлаке)

Дебљина, <i>mm</i>	Сила на електродама, <i>kN</i>		Укупно време заваривања, <i>s</i>		Јачина струје, <i>A</i>	Пречник сочива, <i>mm</i>	Сила разарања, <i>kN</i>
	Заваривање	Искивање	Заваривање	Искивање			
1.65	2.05	4.75	0.50	0.33	11.50	7.1	12.5
2.70	3.20	9.00	0.80	0.51	15.50	8.9	30.0
3.5	6.80	11.70	1.20	0.83	19.00	12.2	43.0

Електроде су са коничном радном површином и углом врха (оштрења) 120-140°. Електроде са сферичним површинама (радијус сфере око 75 *mm*) примењују се у случају, када је тешко обезбедити вертикалност осе електроде на завариваној површини. Важно је обезбедити интензивно хлађење електрода са протоком од 7 *l/min*. Контактну површину треба претходно чистити и контролисати. При заваривању челичних лимова дебљине до 2.5 *mm* са средном дебљином превлаке треба оштрити врх електроде после 1000 тачака. Са повећањем дебљине завариваних делова и дебљине заштитног слоја, постојаност електрода опада. За заваривање два поцинкована лима треба користити двострано заваривање.

Скретање електричне струје, тзв. шентирање је нешто веће при заваривању поцинкованих лимова, него незаштићених захваљујући допунској јачини струје, легирајуће дејством цинка у кругу ливеног језгра. Јачина при променљивом оптерећењу такође расте. Критеријум за оцену обично је однос динамичке издржљивости и затезне јачине на смицање при поређењу поцинкованих и незаштићених челичних лимова дебљине 0.5 и 0.3 *mm*. Та разлика снижава се повећањем дебљине, што се објашњава умањеним легирајућим дејством цинка у укупној маси ливеног језгра тј. сочива.

У оба случаја - заштите лимова, као и електродног материјала - развој је у рукама специјализованих институција и фирми, а заваривачи на то могу утицати само индиректно, тражећи нове особине и спецификације. У случају самог процеса на успех операције заваривања може се утицати исправним подешавањем.

Многи истраживачи су радили на одређивању оптималних параметара за заваривање различито заштићених челичних лимова. Општа је тежња да се смањи доведена количина топлоте, углавном скраћењем времена заваривања. Међутим, за различите материјале и чак различите области примене, мора се одредити другачија комбинација параметара. Познавање технолошких могућности мора такође да има важну улогу у производним условима, применом метода математичке оптимизације услова заваривања.

Код заваривања са једносмерном струјом утврђени су мањи губици у секундарном колу. Могуће је постићи више вредности јачине струје те краћа времена заваривања. Такође је побољшана контрола параметара, односно могуће их је финије подешавати у односу на заваривање наизменичном струјом. Неким експериментима утврђено је и да је могуће добити правилније, односно једноличније облике језгра у заварима. Додатне предности утврђене заваривањем једносмерном струјом су нижи унос топлоте те висока продуктивност. Недостатак је, као што је већ споменуто, подешавање вредности јачине струје.

8. ЗАКЉУЧАК

На основу изнетих теоријских поставки и експерименталних испитивања у овом мастер раду, могу се извести следећи најважнији закључци.

У трећој глави дате су уводне теоријске напомене које у потпуности описују процес тачкастог заваривања и указују на значај основних параметара заваривања. Ови параметри се морају пажљиво бирати, како би квалитет завареног споја био што бољи.

У четртој глави приказан је широк спектар различитих електроодних материјала и извршено упоређивање њихове постојаности, при чему се може донети закључак да је тачкасто заваривање површински заштићених лимова (цинком, калајем, алуминијумом и тсл.) у условима масовне производње отежано, јер се за сваку заварену тачку троши 30% више енергије него при заваривању незаштићених каросеријских лимова.

Испитивањем заварљивости незаштићених каросеријских лимова на експерименталним узорцима $\check{C}0146P3$ - $s=0.8\text{ mm}$ и $\check{C}0148P3$ - $s=1.2\text{ mm}$, који су најчешће примењивани лимови при изради каросерије аутомобила, и применом метода контроле без разарања и са разарањем, дошло се до позитивно добијених резултата испитивања, који указују на то да ови лимови задовољавају технолошке и функционалне захтеве и прописе, те да се могу користити у серијској и масовној производњи.

Применом практичних проба у одређивању постојаности електрода при заваривању незаштићеног каросеријског лима и електропоцинкованог челичног лима $\check{C}0148P4$, при чему је коришћен критеријум – повећање почетног пречника за 20%, долази се до закључка да је постојаност електрода код заваривања поцинкованог лима знатно мања и да електроде захтевају чешће чишћење, што још више поскупљује производњу.

Упоређивањем резултата механичких испитивања незаштићеног каросеријског лима и поцинкованог, упућује на закључак о нешто бољој обрадивости пластичним обликовањем (деформисањем) незаштићеног каросеријског лима у односу на поцинковани.

У вези са заваривањем поцинкованог лима треба истаћи да не постоје технолошке препреке за његову примену. Заваривање поцинкованог лима не изискује специјалне машине, већ се врло успешно може спровести на постојећим машинама. Имајући у виду мањи полазни отпор него код незаштићених лимова, при заваривању овог лима потребна је јача струја и дуже време заваривања, што значи да је за заваривање поцинкованог лима потребна знатно већа енергија.

Проблем трошења електрода знатно је побољшан развојем нових дисперзионо отврднутих материјала за израду електрода на бази бакра и оксида алуминијума $Cu-Al_2O_3$. Класични материјали се могу користити за тачкасто заваривање и при већим брзинама заваривања иако им је постојаност знатно мања.

Побољшања су могућа развојем нових врста заштите лимова погодних за заваривање и применом нових електроодних материјала. Ова два начина су у надлежности специјализованих произвођача и њиховог истраживања и развоја. Произвођачи заваривачке опреме морају да обезбеде нове и ефикасније системе за аутоматско заваривање и управљање процесима, док технолози заваривања морају изабрати најповољније параметре заваривања. Комбинацијом ова четири начина проблеми се могу добрим делом отклонити и обезбедити задовољавајући квалитет заваривања.

9. ЛИТЕРАТУРА

1. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2015.
2. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: *Технологија заваривања – приручник*, друго издање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
3. М. Сарван: *Технологија заваривања*, Универзитет у Приштини, Приштина, 1996.
4. В. Палић: *Заваривање I*, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, 1976.
5. А. Седмак, В. Шијачки-Жеравчић, А. Милосављевић, В. Ђорђевић, М. Вукићевић: *Машински материјали*, Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2000.
6. О. Поповић, Р. Прокић Цветковић: *Поступци заваривања*, Машински факултет у Београду, Београд, 2016.
7. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, Н. Ратковић: *Машински материјали*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
8. В. Лазић: *Испитивање тачкасто заварених спојева и оцена заварљивости површински заштићених лимова*, дипломски рад, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1979.
9. Ж. Рвовић: *Понашање електрода при тачкастом заваривању*, дипломски рад, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1981.
10. H. Zhang, J. Senkara: *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*, CRC Press, 2005
11. М. Вуковић: *Експериментална испитивања и нумеричка анализа тачкасто заварених спојева и конструкција*, магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
12. K.R. Chan: *Weldability and Degradation Study of Coated Electrodes for Resistance Spot Welding* Master's Thesis, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 2005.
13. M.R. Finlay: *A study of resistance spot weldability of metallic coated steels and PVD coated electrodes*. Master's Thesis, University of Wollongong, Wollongong, New South Wales, Australia, 1995.
14. Handbook for Resistance Spot Welding, Miller Welds (2012) 1-29.
15. H. Zhang, J. Senkara: *Resistance welding – Fundamentals and Applications*. Taylor & Francis Group, New York, 2006.
16. P. Howe, S.C. Kelly: *A comparison of the resistance spot weldability of bare, hot-dipped, galvanized, and electrogalvanized DQSK sheet steels*. In Proceedings of the International Congress and Exposition, Detroit, MI, USA, 29 February–4 March 1988.
17. R. Raoelison, A. Fuentes, P.H. Rogeon, P. Carré, T. Loulou, D. Carron, F. Dechalotte: *Contact conditions on nugget development during resistance spot welding of Zn galvanized steel sheets using rounded tip electrodes*. *J. Mater. Process. Technol.* 2012, 212, 1663–1669.
18. S. Gewang, F. Ping, G. Zhenghua: *Electrode Lifetime in Spot Welding Galvanized Sheet with Insert Material*. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China, 2011
19. www.JandaWelders.com, приступљено, септембар, 2019.
20. С. Александровић: *Савремени обрадни системи и поступци*, пластично обликовање - скрипта, Факултет инжењерских наука, moodle portal, електронско издање, Крагујевац, 2014.
21. С. Александровић: *Производне технологије* (Технологија обраде деформисањем), помоћни уџбеник -скрипта, Машински факултет, Крагујевац, 2007.
22. Б. Девеџић: *Пластичност и обрада метала деформисањем*, Научна књига, Београд, 1992.
23. М. Којић, Р. Славковић, М. Живковић, Н. Грујовић: *Метод коначних елемената I- линеарна анализа*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1998.
24. М. Којић, K.J. Bathe: *Inelastic Analysis of Solids and Structures*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.