

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 100/2013

Александар Д. Малетић

**Тачкасто заваривање каросеријских
лимова и методи контроле заварених
спојева**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру завршног рада кандидат треба да:

- наведе преглед основних поступака електроотпорског заваривања и укаже на њихов значај и примену;
- опширније објасни поступак тачкастог електроотпорског заваривања с посебним освртом на избор технологије тачкастог заваривања у ауто-индустрији као и могућност аутоматизације и роботизације процеса тачкастог заваривања;
- на примеру изведеног експеримента са два узорка од лимова различитих дебљина, који се најчешће употребљавају у ауто-индустрији за израду каросерија, докаже да су исти погодни за серијску производњу.

Препорчена 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: *Испитивање тачкасто заварених спојева и оцена заварљивости површински заштићених лимова*, магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1991.

Крагујевац, 2016

Ментор:
Проф. др Вукић Лазић

РЕЗИМЕ

У раду је обрађена тема тачкастог заваривања каросеријских лимова и методи контроле заварених спојева, а у оквиру које су анализирани поједини поступци електроотпорског заваривања са шематским приказима и параметрима заваривања за сваки поступак. Такође су наведене предности и недостаци електроотпорских поступака заваривања као и њихова практична примена.

Детаљно је описан поступак тачкастог електроотпорског заваривања, параметри заваривања, облици електрода као и материјали потребни за њихову израду. Дат је преглед материјала који се могу заваривати, с посебним освртом на примену овог поступка заваривања при заваривању каросеријских лимова у ауто-индустрији. Наведени су примери примене, као и могућности аутоматизације и роботизације овог поступка.

Описан је процес експерименталног заваривања каросеријских лимова различитих дебљина, након чега је извршена и контрола тачкасто завареног споја методама контроле са разарањем. Експериментални део има за циљ утврђивање технолошких и функционалних захтева испитиваних лимова, како би се утврдило да ли могу бити коришћени у серијској производњи.

Кључне речи: Електроотпорско заваривање, тачкасто заваривање, параметри тачкастог заваривања, електроде, лимови каросерије, аутоматизација и роботизација, ауто-индустрија.

ABSTRACT

The paper deals with the topic of electrical resistance spot welding of car body sheets and methods of control of welded joints, and in which are given analyzes of specific procedures of electrical resistance welding with a schematic view of each process and welding parameters for each procedure. Also advantages and disadvantages of electrical resistance welding and application of procedure are analyzed.

In particular, the paper describes procedure of spot welding, welding parameters, forms and material required for the production of electrodes are described along with an overview of the material that can be spot welded, with special emphasis on the application of spot welding procedure in auto-industry. The paper specifies examples of application and possibilities of automation and robotics of spot welding procedure.

Welding experiment was performed; two car body sheets of different thicknesses are welded and then controlled with destructive methods in order to conclude the possibility of mass production.

Key words: Electrical resistance welding, spot welding, parameters, electrodes, car body sheets, automation and robotics, auto-industry.

САДРЖАЈ

РЕЗИМЕ	
ABSTRACT	
1. УВОД-ОСНОВИ ЕЛЕКТРООТПОРСКОГ ЗАВАРИВАЊА	1
1.1 Електроотпорско заваривање	1
1.1.2 Уређаји за електроотпорско заваривање	4
1.2 Врсте електроотпорског заваривања	5
1.2.1 Шавно заваривање.....	6
1.2.2 Брадавичасто заваривање	9
1.2.3 Сучеоно заваривање са електричним отпором.....	10
2. ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ	12
2.1 Уређаји за тачкасто заваривање.....	13
2.2 Електроде за тачкасто заваривање.....	14
2.3 Техника и технологија тачкастог заваривања	17
2.3.1 Техника тачкастог заваривања.....	17
2.3.2 Технологија тачкастог заваривања	24
3. ИЗБОР ТЕХНОЛОГИЈЕ ТАЧКАСТОГ ЗАВАРИВАЊА КАРОСЕРИЈСКИХ ЛИМОВА	27
3.1 Електроотпорско тачкасто заваривање легура алуминијума.....	27
3.2 Проблеми тачкастог заваривања у ауто-индустрији	29
3.2.1 Оптимизација процеса заваривања.....	29
3.3 Аутоматизација и роботизација технологије тачкастог заваривања.....	30
3.3.1 Индустијски роботи	31
3.3.2 Роботско електроотпорско тачкасто заваривање	32
3.4 Сензори.....	34
4. МЕТОДИ КОНТРОЛЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА	35
4.1 Методе контроле заварених спојева без разарања	35
4.2.1 Визуелна контрола	35
4.2.2 Проба непропустљивости (херметичности)	36
4.2.3 Радиографска проба	36
4.2.3 Магнетна метода	37
4.2.4 Ултразвучна испитивања.....	38
4.3 Методе контроле заварених спојева са разарањем	40
4.3.1 Испитивање затезањем	40
4.3.2 Испитивање савијањем	41
4.3.3 Испитивање ударне жилавости.....	42
4.3.4 Металографска испитивања	42

5. ПРИМЕРИ ИЗВЕДЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТА	44
5.1 Основне карактеристике и намена испитиваних материјала	44
5.2 Одређивање механичких карактеристика испитиваних материјала	45
5.2.1 Испитивање затезањем	46
5.3 Избор параметара тачкастог заваривања за различите дебљине и спојеве	51
5.4 Металографска испитивања завареног споја	52
Закључак	55
Литература	56

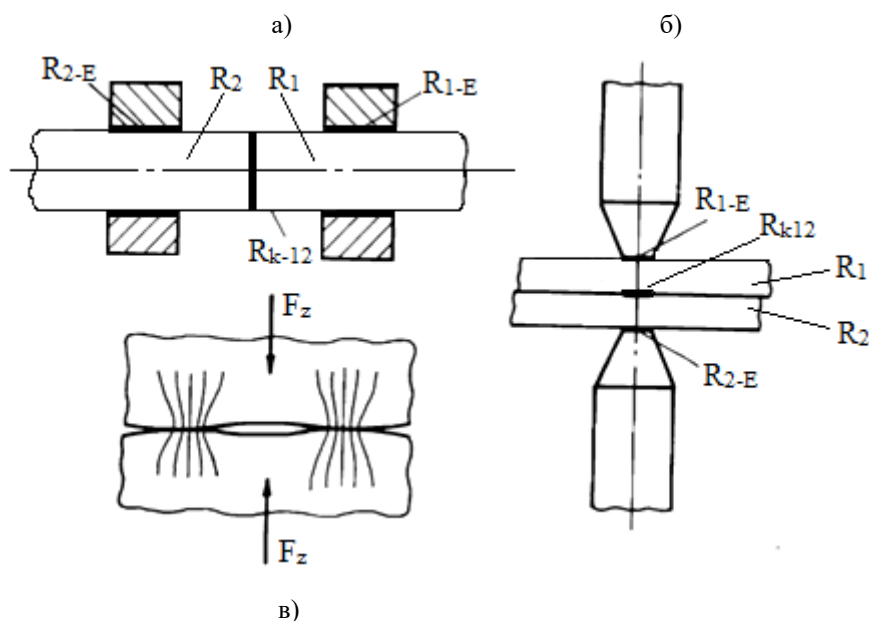
1. УВОД-ОСНОВИ ЕЛЕКТРООТПОРСКОГ ЗАВАРИВАЊА

1.1 Електроотпорско заваривање

Електроотпорско заваривање обухвата групу поступака код којих се материјал загрева топлотом створеном електричним отпором, а заварени спој настаје додатним дејством силе притиска између електрода. Створена топлота се користи за загревање одређене количине материјала на температуру заваривања, као и за загревање материјала у околној зони ради лакшег пластичног деформисања.

Основни поступци електроотпорског заваривања су:

- Преклопни поступци заваривања:
 - **тачкасто**, код кога спојеви настају у појединим тачкама преклопљених делова;
 - **шавно**, код кога спој настаје преклапањем и повезивањем низа заварених тачака;
 - **брадавичасто**, код кога спој настаје у појединим тачкама преклопљених делова; које су пре заваривања обликоване као брадавице.
- Сучеони поступци заваривања:
 - **збијањем**, код кога спој настаје сталним притиском на две сучеоне површине;
 - **варничењем**, код кога спој настаје варничењем између две сучеоне површине.



Слика 1.1 Подела заваривања електричним отпором: а) сучеоно заваривање, б) преклопно тачкасто заваривање, в) заваривање збијањем и варничењем

При сучеоном заваривању (слика 1.1.a), заваривани елементи су стегнути у чељусти машине за заваривање, док се међусобно додирују по чеоним површинама. Струја заваривања пролази кроз радне делове постављене у чељусти машине.

При преклопном заваривању (слика 1.1.б), заваривани елементи су притиснути између електрода које имају облик цилиндра (тачкасто заваривање) или диска (шавно заваривање). Струја заваривања пролази кроз електроде и завариване елементе.

Код оба наведена поступка заваривања, електроде су израђене од специјалних легура бакра па пружају релативно мали отпор проласку струје заваривања. Електроотпорско заваривање је засновано на коришћењу топлоте, остварене тзв. Џуловим ефектом.

$$Q = I_z^2 \cdot R \cdot t_z, J,$$

где је:

I_z - струја заваривања у А;

R - укупни омски отпор између електрода, Ω ;

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 (J).

Уколико струја заваривања и омски отпор посматраног дела струјног кола нису константни, то се Џулов закон изражава у следећем облику:

$$Q = \int_0^t I_z^2 \cdot R \cdot dt, J.$$

При протицању струје кроз проводник ослобађа се укупна количина топлоте, Q_{uk} . Међутим у формирању споја учествује само ефективна топлота, Q_{ef} , која је једнака разлици укупне количине топлоте и губитка топлоте, Q_{gub} . Губици топлоте настају услед дисипације топлоте на загревање електрода (Q_2) и основног материјала (Q_3), као и на зрачење (Q_4).

$$Q_{ef} = Q_{uk} - Q_{gub}$$

$$Q_{gub} = Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

Q_{ef} - ефективна топлота

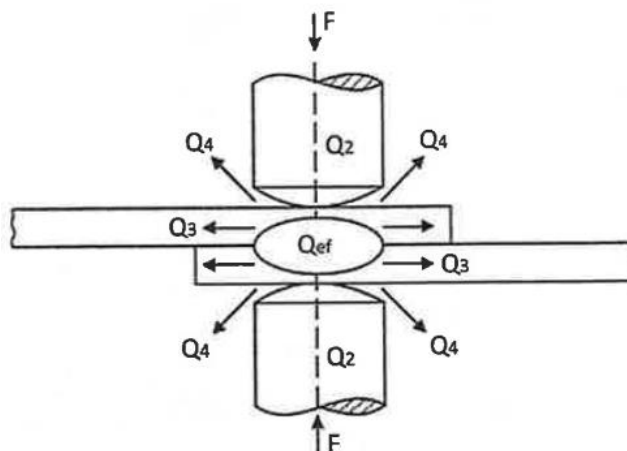
Q_{uk} - укупна количина топлота

Q_{gub} - укупни губици

Q_2 - губици на загревање електроде

Q_3 - губици на загревање околног материјала

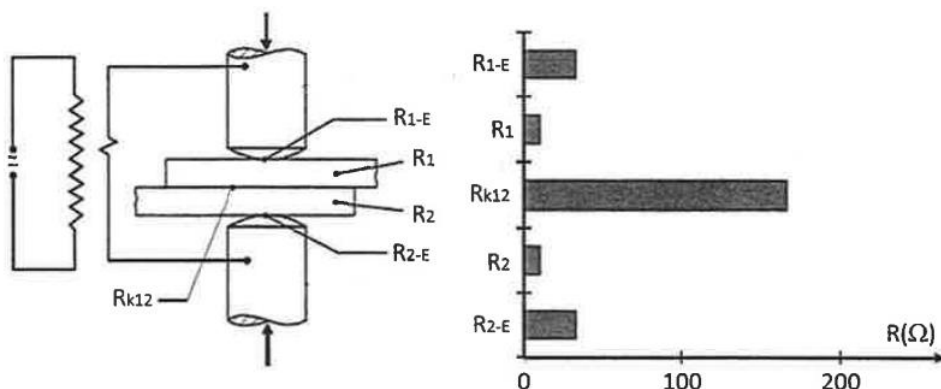
Q_4 - губици на зрачење



Слика 1.2 Расподела топлоте при електроотпорском заваривању

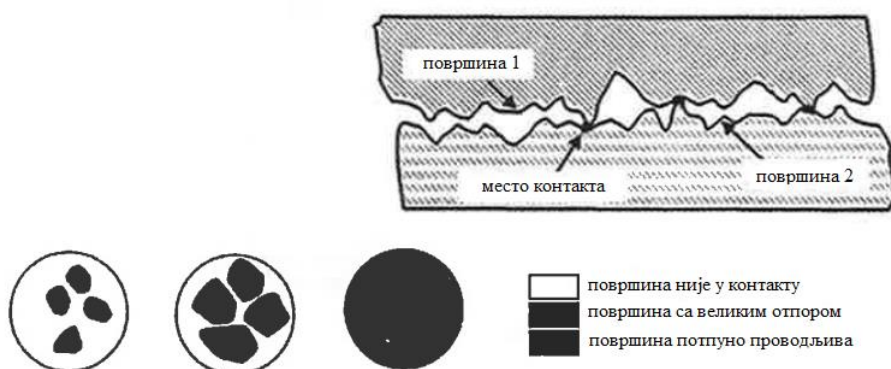
Укупни отпор између електрода, R_u , се може представити као збир сопствених отпора материјала који се заварују, R_1 и R_2 , и контактних отпора R_{1-E} (материјал-горња електрода), R_{2-E} (материјал-доња електрода) и R_{k12} (материјал-материјал).

$$R_u = R_{1-E} + R_1 + R_{k12} + R_2 + R_{2-E}.$$



Слика 1.3 Отпори код тачкастог заваривања

У почетку заваривања, највећи је контактни отпор R_{k12} , услед нехомогености и хрпавости додирних површина. Контакт се остварује на месту додира, односно испупчења, што значи да струја тече само кроз мали део пресека, тј. врхове неравнина, па се на месту додира јавља велики контактни отпор, слика 1.4.



Слика 1.4 Промена контактне површине са временом

Контактни отпори материјал-електрода R_{1-E} и R_{2-E} задржавају приближно константне вредности у току заваривања. Ови контактни отпори су знатно мањи од контактног отпора R_{k12} јер електроде добро проводе електричну струју. Сопствени отпори материјала R_1 и R_2 се одређују изразом за отпор проводника пресека S (mm^2) и дужине l (mm):

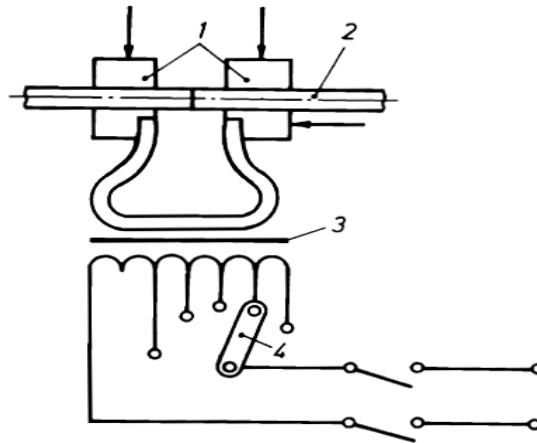
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$$

при чему је ρ специфични електрични отпор, који расте са порастом температуре, тако да и сопствени отпори материјала расту са порастом температуре.

1.1.2 Уређаји за електроотпорско заваривање

Постоји велики број типова уређаја за заваривање електричним отпором. На слици 1.5 приказана је електрична шема уређаја за електроотпорско заваривање. Та шема иста је за сучеоно и преклопно заваривање.

Уређаји за електроотпорско заваривање раде по правилу са наизменичном струјом. Струје заваривања износе и до 100 000 А, док је мрежни (примарни) напон 220 или 380 V.



Слика 1.5 Електрична шема уређаја за електроотпорско заваривање: 1- челоусти за стезање основног материјала, 2- основни материјал, 3- заваривачки трансформатор, 4- регулатор струје заваривања

Примарна страна трансформатора изведена је у секцијама са много извода, па је могућа измена броја укључених намотаја. Секундарна страна трансформатора се обично састоји из једног намотаја, док се секундарни напон креће у границама од 1-12 V. Код савремених уређаја за електроотпорско заваривање, за укључивање и искључивање струје заваривања користе се механички прекидачи. Струја заваривања се мења укључивањем и искључивањем броја намотаја на примарној страни трансформатора помоћу регулатора 4 (слика 1.4).

При промени броја укључених намотаја N_1 , мења се секундарни напон U_2 према следећем изразу:

$$U_1 \cdot N_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot N_2 \cdot I_2$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{N_1}{N_2},$$

где су:

U_1 и U_2 - примарни и секундарни напон трансформатора;

N_1 и N_2 - број намотаја примарне и секундарне стране трансформатора;

I_1 и I_2 - струје заваривања на примару и секундару.

Пошто је обично $N_2 = 1$, тада ћемо имати:

$$U_2 = \frac{I_1}{I_2} \cdot N_1.$$

Струја заваривања тече од секундарне стране трансформатора према електродама. Растојање од секундарне стране трансформатора, као и од површина коју обухвата секундарна контура, морају бити што мањи пошто од тога зависи омски и индуктивни пад напона у секундарном колу па самим тим и струја заваривања.

Струја заваривања се одређује према следећем изразу:

$$I_z = \frac{U_2}{\sqrt{X_2^2 + (R_2 + R_m)^2}},$$

где је:

I_z - струја заваривања у А;

U_2 - напон празног хода трансформатора (између крајева електрода) у V;

X_2 - индуктивни отпор секундарне контуре у Ω ;

R_2 - омски отпор секундарне контуре у Ω ;

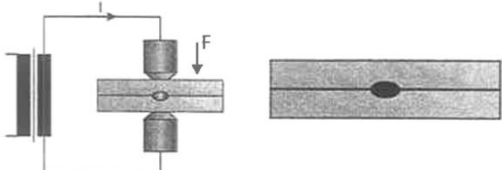
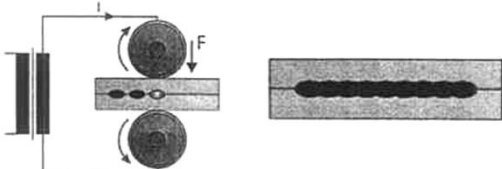
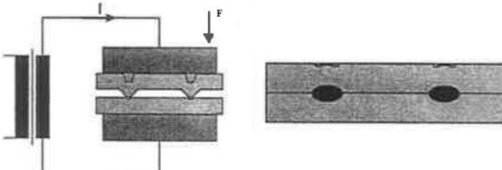
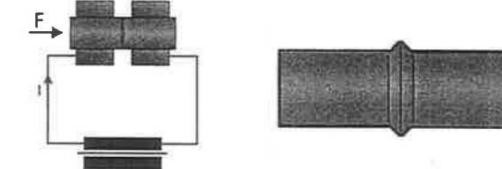
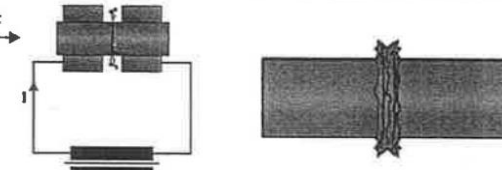
R_m - омски отпор основног материјала у Ω .

1.2 Врсте електроотпорског заваривања

Електроотпорско заваривање се дели на неколико поступака заваривања. Подела поступака приказана је у табели 1.1.

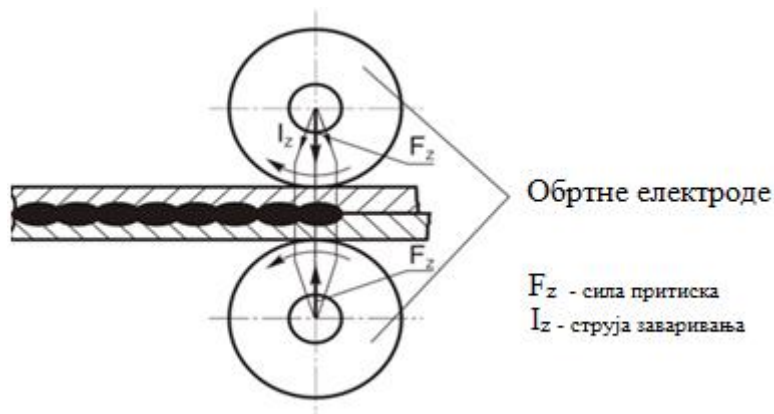
Како је тачкасто електроотпорско заваривање примарни предмет разматрања овога рада, оно ће бити детаљно описано у другом поглављу.

Таблица 1.1 Поступци електроотпорског заваривања

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

1.2.1 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 1.6 дата је шема двостраног шавног заваривања, а на слици 1.7 фотографија поступка шавног заваривања.

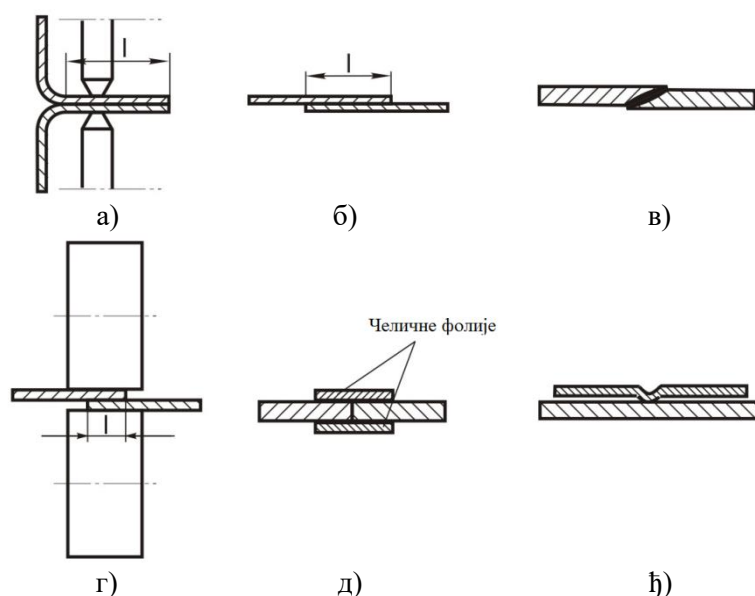


Слика 1.6 Шема двостраног шавног заваривања



Слика 1.7 Изглед машине за шавно заваривање

Основне врсте спојева који се могу извести шавним заваривањем приказане су на слици 1.8. 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 1.8 *Врсте спојева за шавно заваривање*

У споју (г) преклоп је веома мали $l = (1.5-2.5) \cdot s$, *mm*, тако да се заваривањем и пластичним деформисањем страница лимова они готово доводе у исту раван. У споју (д), танке челичне фолије остају утиснуте у материјал тако да се добија сучеои спој са готово равним површинама. Попречно испупчење на споју (ђ), локализује загревање и притисак, што доприноси повећању брзине заваривања. Ако се параметри заваривања правилно изаберу, 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 поперечно преклапање страница или њихово деформисање, потребно је припојима учврстити делове на растојању 70-150 *mm*. Већа растојања се узимају за дебље лимове. Пре заваривања, нагореле површине припојних тачака треба очистити. Ако конструкција споја омогућава, може се шавно заваривање извести и без припојних тачака али уз примену масивних тегова постављених на лимове.

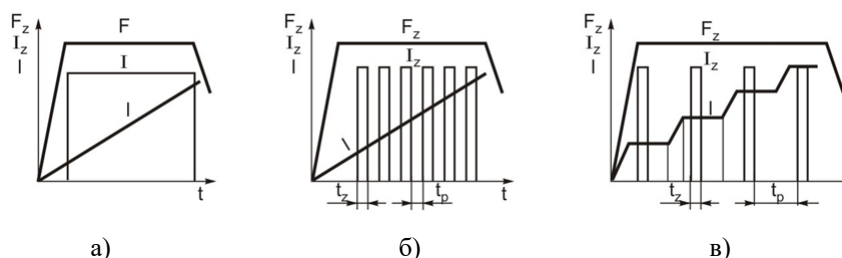
1.2.1.1 Техника и технологија шавног заваривања

Шавно заваривање се може извести према програмима приказаним на слици 1.9. Најпростији је програм са непрекидно укљученом струјом I_z и равномерним кретањем обртних електрода брзином v_z , ($I = v_z \cdot t$) (слика 1.9а). Највише се користи програм дат на слици 1.9б, који одговара непрекидном обртању дискова и прекидном (импулсном) укључивању струје. Према програму приказаном на слици 1.9в, електроде се окрећу само када је искључена струја, а струја протиче у неком временском интервалу док електроде мирују.

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);
- облик радне површине електроде као и њена ширина (b) 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.



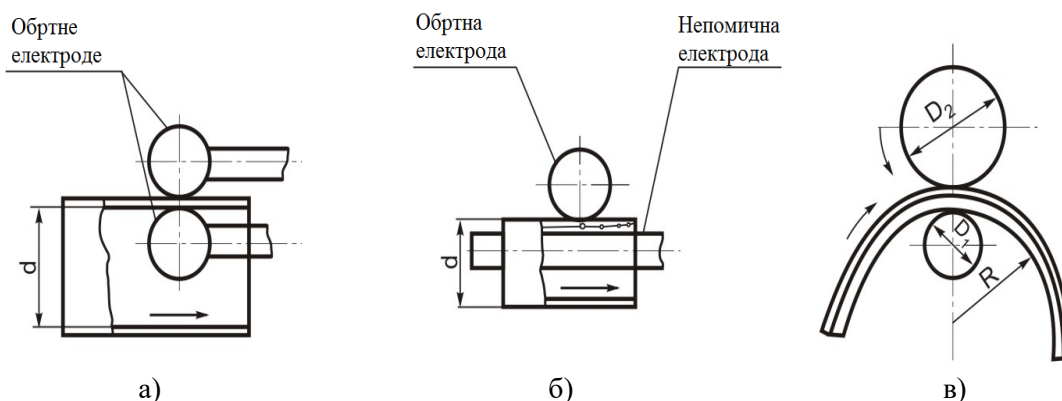
Слика 1.9 Шема програма шавног заваривања

Процесни параметри шавног заваривања могу се наћи у каталозима произвођача уређаја за заваривање (таблица 1.2), 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 1.2 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 (слика 1.10а,б) долази до промене индукционог отпора секундарног кола у складу са померањем електрода ка средини суда. Варнице због прејаке струје може се смањити заваривањем цеви од крајева ка средини и аутоматским или ручним подешавањем јачине струје $I_z = f(L)$.



Слика 1.10 Шавно заваривање цилиндричних судова

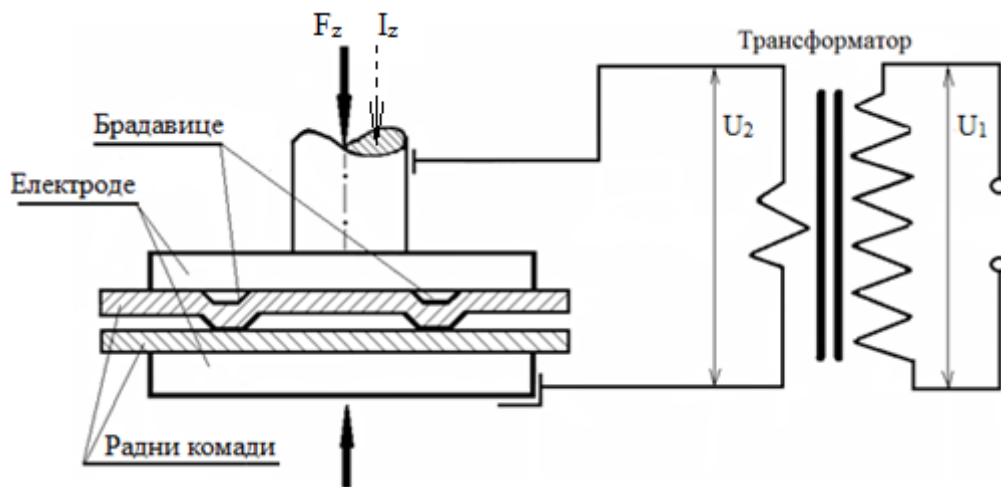
Препоручује се да се после шавног заваривања неких челика изведе накнадна термичка обрада због уједначавања структуре и отклањања унутрашњих заосталих напона. Шавно заваривање површински заштићених челичних лимова (поцинкованих, калајисаних) мора се изводити струјама велике јачине и дисковима са сферичним радним површинама уз интензивно хлађење дискова.

1.2.2 Брадавичасто заваривање

Поступак брадавичастог заваривања је у основи сличан као и поступак тачкастог заваривања с тим што се код брадавичастог заваривања на једном од лимова који се заварују претходно направе испупчења (брадавице) које налажу на други лим и тиме одређују пут струји у затвореном струјном колу, шема овог поступка приказана је на слици 1.11.

Предност брадавичастог заваривања у односу на тачкасто је у томе што у једном пролазу настаје онолико тачака колико је брадавица припремљено на лиму, тј. у већој производности. Осим тога, електроде трају знатно дуже јер нису оптерећене као код тачкастог или шавног заваривања.

Мана брадавичастог заваривања је потреба за великом снагом уређаја и силом притиска, што компликује и поскупљује уређај за заваривање.



Слика 1.11 Шематски приказ брадавичастог поступка заваривања

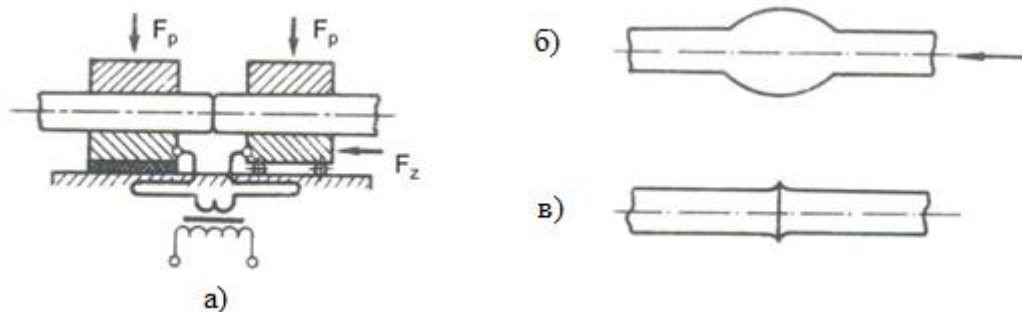
Брадавичастим заваривањем се најуспешније заварују лимови дебљине 0.5 - 3 mm.

Главне предности брадавичастог заваривања јесу:

- Број заварених спојева који се могу истовремено остварити у једној операцији машине за заваривање зависи искључиво од могућности контроле струје заваривања и силе притиска;
- Електроде коришћене за брадавичасто заваривање имају већу радну површину од електрода за тачкасто заваривање, према томе, због мање густине струје, захтевају и мање одржавања за разлику од тачкастог заваривања;
- Брадавичастим заваривањем се могу спајати и метали који су толико танки да се спој не може остварити електроотпорским тачкастим заваривањем;
- Завари могу бити позиционирани прецизније у односу на тачкасто заваривање;
- Уље, рђа, и друге облоге металних елемената мање ометају процес брадавичастог заваривања.

1.2.3 Сучеоно заваривање са електричним отпором

По овој методи, шипке се сучеоно спајају по целој додирној чеоној површини (слика 1.12). У зависности од врсте метала, површине пресека завариваних делова и захтева у погледу јачине споја, разликују се сучеоно заваривање збијањем (слика 1.12б) и заваривање варничењем (слика 1.12в).



Слика 1.12 Шема сучеоног заваривања а) и облици спојева изведених збијањем б) и варничењем в)

1.2.3.1 Сучеоно заваривање збијањем

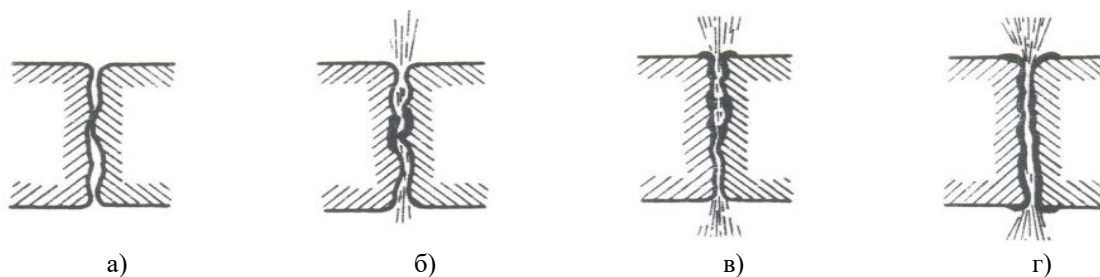
Радни предмети најпре се стежу у чељусти машине, па се малим аксијалним притиском доводе у непосредан додир. После тога укључује се струја тако да се у току кратког времена ослобађа топлота сразмерна омским отпорима у појединим деловима секундарног кола. Највећи је отпор на месту сучељавања радних предмета, 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 1.12б. 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.

1.2.3.2 Сучеоно заваривање варничењем

1. Сучеоно заваривање непрекидним варничењем одвија се у две фазе:

- прва је варничење а
- друга збијање.

Радни предмети се најпре учвршћују у чељусти 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 1.13а), 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 1.13). Деловањем притиска металних пара и магнетног поља избацују се сагореле и делимично истопљене честице ван зоне споја, што се испољава варничењем (слика 1.13б,в,г). Притисак металних пара спречава продирање кисеоника из ваздуха у растопљени метал, што показује благотворан утицај на механичке особине споја.



Слика 1.13 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.

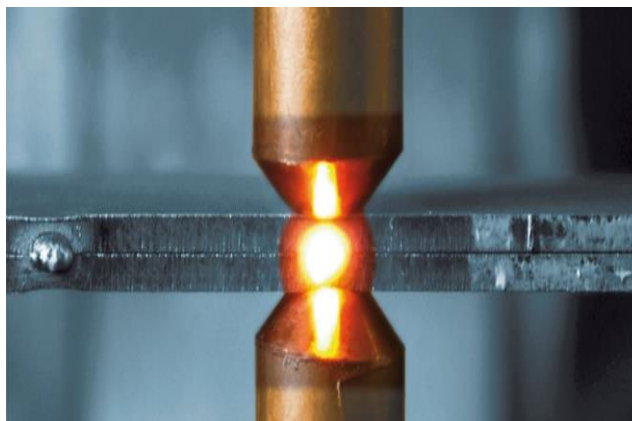
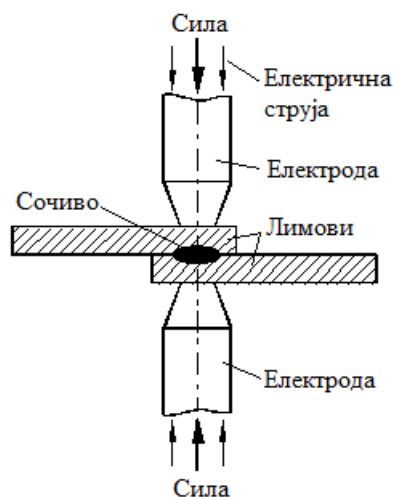
2. *Сучеоно заваривање варничењем са предгревањем* разликује се од непрекидног варничења по томе што се делови, стегнути у чељустима машине, пре почетка варничења загревају вишеструким међусобним додиривањем и раздвајањем. У тим моментима настаје прекидно варничење, а радни предмети се незнатно скраћују 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 odstraniti боју или грубе љуспе (рђу).

Сучеоним електроотпорским заваривањем могу се спајати штапови, дебљи лимови и траке, цеви и алати.

2. ТАЧКАСТО ЗАВАРИВАЊЕ

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.

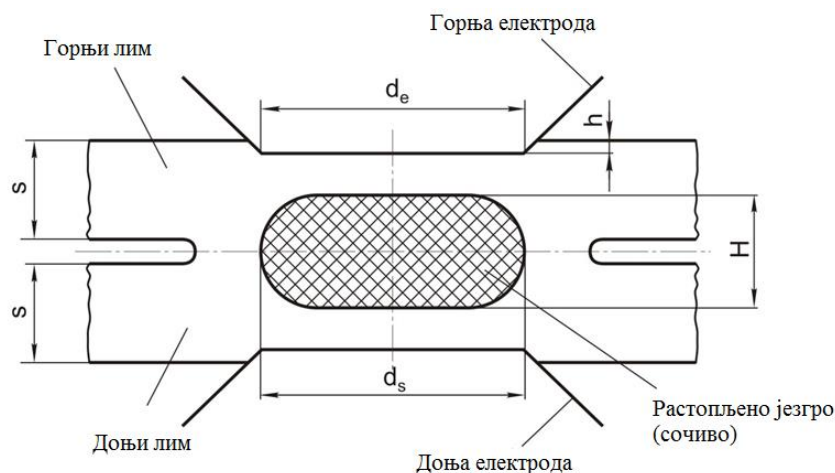


Слика 2.1 Шема тачкастог заваривања

Тачкастим заваривањем спајају се танки лимови постављени један преко другог тако да образују преклопни спој. Физичко спајање преклопљених лимова остварује се преко заједничког ливеног језгра - сочива (слика 2.1) које настаје на месту где су се локално загрејани лимови притиснути електродама највише приближили.

Основни елементи тачкасто завареног споја приказани су на слици 2.2, где је:

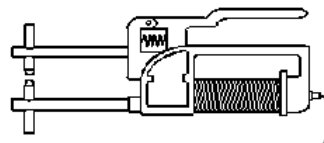
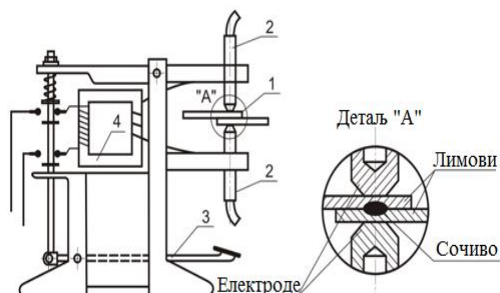
- d_e - пречник врха електроде,
- d_s - пречник сочива,
- s - дебљина лима,
- h - улегнуће после заваривања (настало деловањем силе притиска на омекшане лимове),
- H - висина сочива.



Слика 2.2 Шема тачкасто завареног споја

2.1 Уређаји за тачкасто заваривање

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 описују лук) и притисне (електрода се креће вертикално). Машине за тачкасто заваривање обухватају 70% укупне примене машина за отпорско заваривање.



а)



б)

Слика 2.3 Шеме и слике стационарног а) и покретног апарата б) за тачкасто заваривање

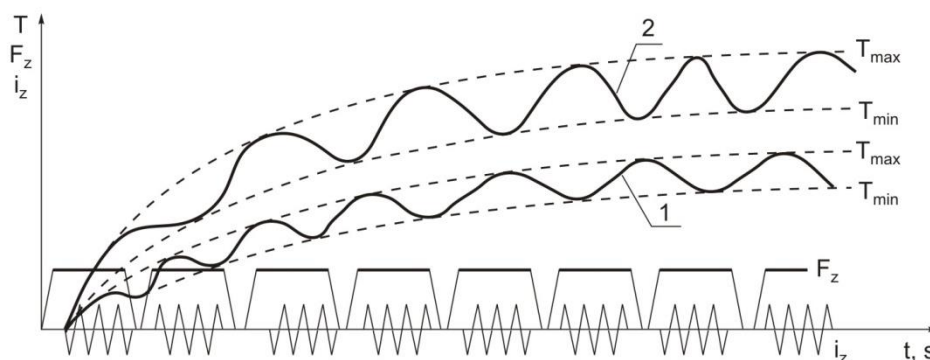
Уређаји за тачкасто заваривање, стабилне машине или заваривачка клешта, састоје се из енергетског блока и система за отварање-затварање електрода и довођење силе притиска по одређеном програму.

Бакарне електроде (са додацима легирајућих елемената - Cr , 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 2.3, 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 протикање струје у секундарном намотају трансформатора, односно кроз електроде.

2.2 Електроде за тачкасто заваривање

У процесу тачкастог заваривања електроде остварују непосредан контакт са лимовима који се заварују, преносе силу притиска, спроводе струју и одводе већи део топлоте ослобођене у зони контакта лимова. У условима серијске и масовне производње тачкасто заварених склопова, деловање топлоте и притиска на електроде циклично се понавља (слика 2.4), 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 допунска термичка напрезања. Електрода хлађена водом приказана је на слици 2.6б.



Слика 2.4 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 термопостојаност на повишеним температурама;
- отпорност против оксидације и легирања са неким елементима из основног материјала.

Електроде се праве од легура бакра које треба да имају што већу електричну проводност и што већу отпорност на хабање на повишеним температурама. Први захтев најбоље испуњава чист бакар, али је његова тврдоћа, посебно на повишеним температурама недовољна. Стога се за израду електрода најчешће користе легуре бакра са хромом (0,3–1,2% Cr), кадмијумом (0,7–1,3% Cd) или тројна легура Cu-Cr-Zr (0,5–1,4% Cr, 0,02–0,2% Zr), сем за неке специјалне примене где се користе волфрамове легуре (најчешће са бакром), које имају мању проводност од легура бакра али знатно већу тврдоћу.

Оцена да ли су одређене легуре подобне за електроде може се донети на основу испитивања у лабораторијским и производним условима. Као критеријум постојаности при заваривању челичних лимова може се узети број заварених тачака до проширења пречника врха електроде за 20%. Овај критеријум не важи за електроде коришћене за лимове од Al, Mg или површински заштићене челичне лимове; за њих је меродаван број заварених тачака до чишћења запрљаног, тј. спонтано легираног врха електроде.

У почетној фази развоја и примене тачкастог заваривања у условима појединачне производње коришћене су чисто бакарне електроде, којима се по критеријуму проширења пречника од 20% може заварити око 100 тачака. За серијску и масовну производњу, век бакарних електрода постао је прекратак што омета производни циклус и умањује продуктивност рада. Најновије захтеве које намеће серијска производња, испуњавају електроде од дисперзионо отврднуте легуре типа Cu-Cr, Cu-Cd, Cu-Zr и Cu-Cr-Zr. Упоредни преглед неких особина електроодних материјала дат је у таблици 2.1, где % IACS означава електричну проводност у односу на електролитички бакар.

Таблица 2.1 Неке особине електроодних материјала

Материјал	Тврдоћа, HRB	% IACS	Температура омекшања, °C	Затезна јачина, МПа	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

Облик врха електроде утиче на изглед и обликовање заварене тачке. Врх електроде може бити раван и заобљен (слика 2.6) такође постоје и електроде специјалног облика које се користе за специјалне случајеве (слика 2.5). Код електрода са равним врхом при употреби потребно је водити рачуна да је врх електроде паралелан са површином комада који се заварује.

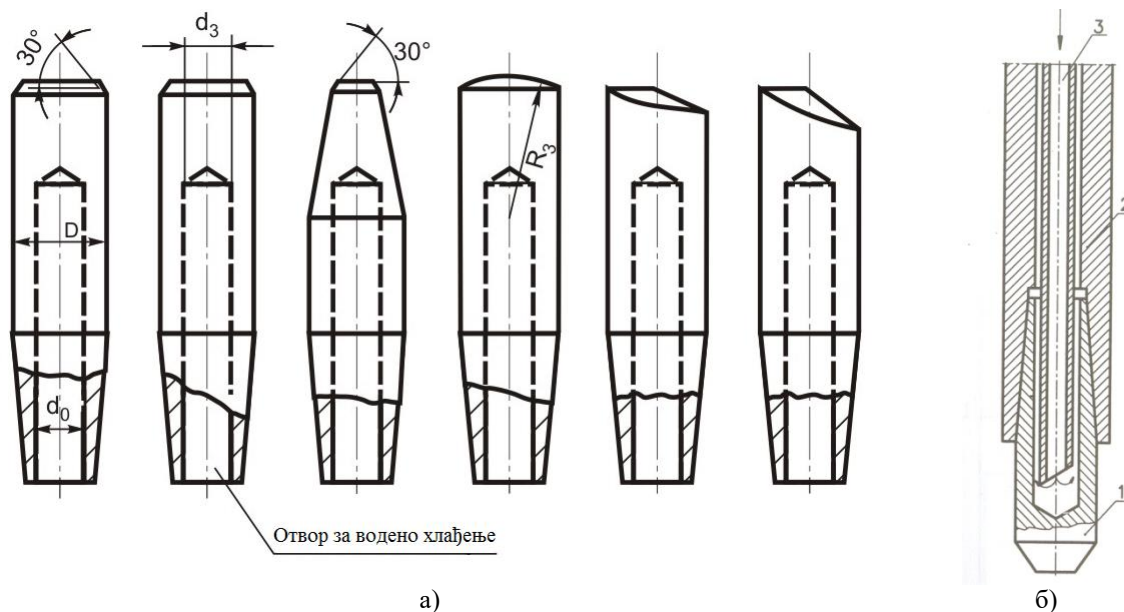


Слика 2.5 Различити облици електрода за тачкасто електроотпорско заваривање

Код равних електрода пречник заварене тачке може достићи величину отиска врха електроде. Код електрода са заобљеним врхом пречник заварене тачке је мањи него површински отисак 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 нискоугљичних, угљеничних и нерђајућих челика, као и ливеног и ковног гвожђа. Електроде од легираног бакра могу издржати више од хиљаду заварених тачака пре накнадног обликовања радног врха.

Конструкциони облици електрода који се најчешће примењују у индустријским условима, приказани су на слици 2.6а. Осим ових електрода, користе се и електроде са радним уметцима од синтерованог волфрама или молибдена.



1- Електрода, 2- Носач електроде, 3- Цевчица за водено хлађење

Слика 2.6 Облици радних врхова електрода за тачкасто заваривање (а) и изглед система за водено хлађење електрода (б)

Последњих година, развијен је и нови електродни материјал за тачкасто заваривање површински заштићених челичних лимова. То су дисперзионо отврднути материјали састава $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$. Корисне особине ових електрода добијају се веома сложеним начином производње који се састоји из унутрашње оксидације алуминијума, синтеровања и обликовања ковањем у калупу на топло и хладно. Постојаност ових електрода је неколико пута већа од најчешће коришћених електрода на бази бакра.

2.3 Техника и технологија тачкастог заваривања

2.3.1 Техника тачкастог заваривања

На квалитет тачкасто заварених спојева највише утичу јачина струје заваривања, сила притиска, време заваривања, димензије електрода, 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 који за дати заваривани материјал, одређују ток процеса тачкастог заваривања јесу:

- јачина струје заваривања (I_z);
- време заваривања (t_z);
- сила притиска на електроде (F_z).

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 $d_e = 10\sqrt{s}$.

при чему је:

- d_e - пречник електроде у mm а
- s - дебљина лимова у mm

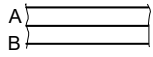
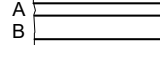
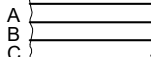
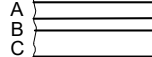
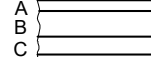
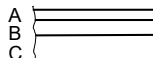
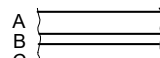
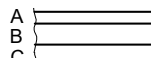
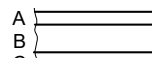
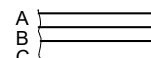
Таблица 2.2 Избор пречника језгра тачке за различите материјале и дебљине

Челици са садржајем $C \leq 0.2\%$ *		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 2.3.

Таблица 2.3 Одређивање еквивалентне дебљине за заваривање 2 или 3 лима једнаких или различитих дебљина

 $A = B$ 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;
- $F_z = 1.2 \cdot s$ за алуминијумски лим,

при чему је:

- F_z - сила притиска изражена у kN а
- s - дебљина лимова у mm

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 (слика 2.7) 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:

$$Q = \int_0^t R \cdot I_z^2 \cdot dt, J,$$

где је:

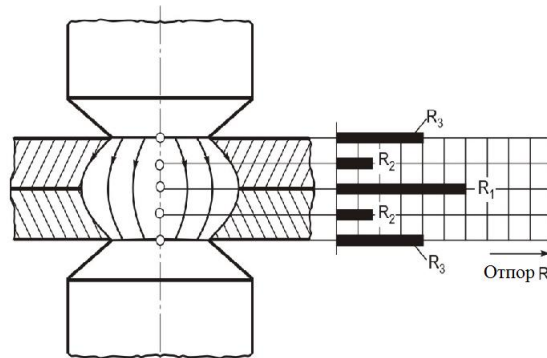
Q - топлота у J (џулима) или Ws (ват-секундима);

R - електрични отпор у Ω (омима);

I_z - јачина струје у A (амперима) и

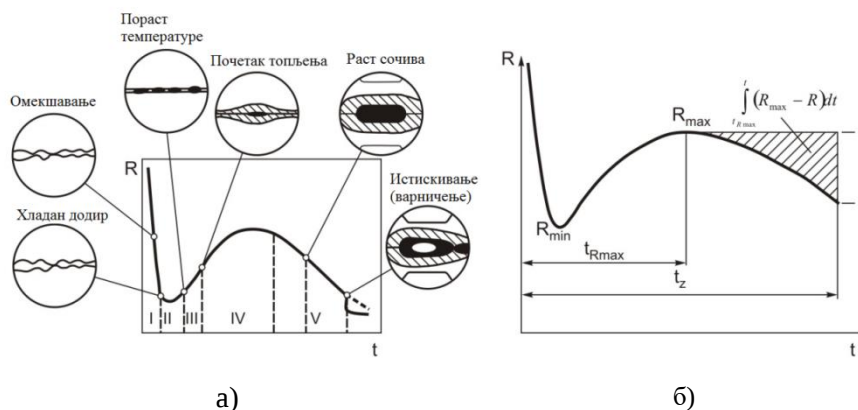
t - време заваривања у s (секундама).

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 (слика 2.7). То су сопствени отпори лимова (R_2), отпор на месту додира лимова (R_1) и 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 2.7 Омски отпори при успостављању струјног кола

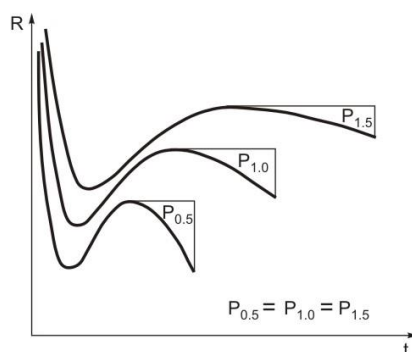
Укупан електрични отпор између електрода (R) мења се са порастом температуре односно у току времена заваривања према дијаграму на слици 2.8. У почетку делују сви наведени отпори (R_1 , R_2 , R_3), а после извесног времена преостаје само отпор лимова R_2 , будући да контактни отпори R_1 и R_3 постају 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 2.8.



Слика 2.8 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 2.8а, а у физичком смислу, то стање одговара кривој линији динамичког отпора $R = R(t)$.

Експериментално је доказано да од тренутка постизања $R_{\max}$ (слика 2.8б) 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 2.9 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 интегралњем површина $\int (R_{\max} - R) \cdot dt$ добија се површина P за успешно заварену тачку. Стога се површина P може искористити као параметар за монитороване 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 2.9 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.

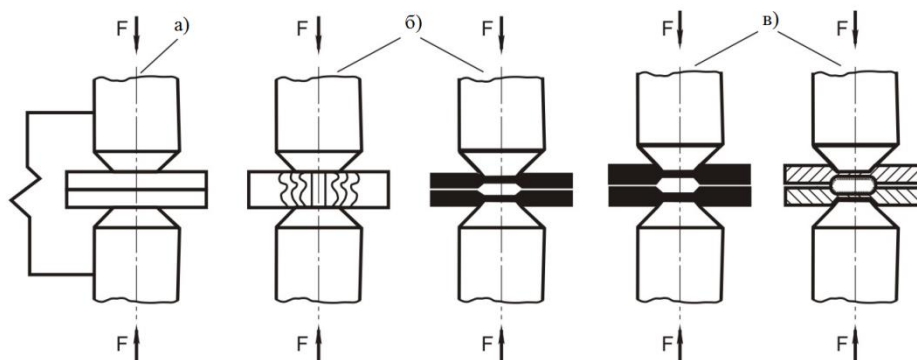
Контактни електрични отпори R_1 и R_2 који дејствују само у првој фази загревања (слика 2.9), а често се називају и прелазни отпори. Сопствени отпор лимова R_2 у хладном стању зависи од врсте и дебљине лима, а контактни отпори R_1 и R_3 зависе и од стања додирних површина. Са гледишта заваривања најзначајнији је контактни отпор R_1 , јер на додиру лимова почиње процес топљења 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 ($I = \frac{U}{R}$) 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 (слика 2.7) 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 (слика 2.10а,б,в):

- притискивање лимова између електрода;
- укључивање струје и загревање контактне зоне до температуре при којој почиње делимично топљење на додирним тачкама лимова и почетак формирања ливеног језгра и
- искључивања струје и хлађења језгра уз деловање силе притиска.

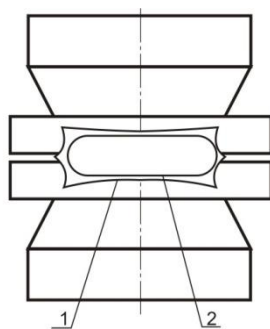


Слика 2.10 Фазе тачкастог заваривања (F - сила притиска)

Као што је већ споменуто, цео циклус се може одвијати аутоматски према претходно уведеним параметрима који се бирају зависно од врсте и дебљине лимова.

Режими тачкастог 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. Режији 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 дужи а попречни пресек сочива готово елиптичан (слика 2.11).

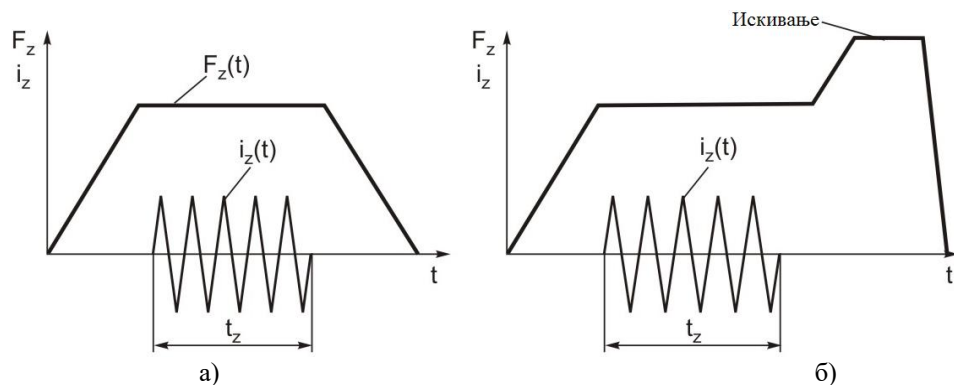


Слика 2.11 Облик сочива при заваривању оштрим (1) и меким (2) режимом

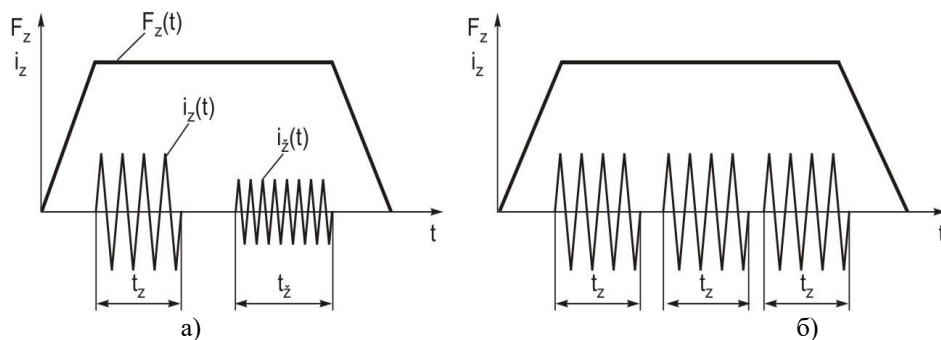
У практичним условима, Режији заваривања могу се одредити рачунски, рачунски-опитно и на пробним узорцима. Без обзира на који је начин одређен, режим заваривања се мора експериментално проверити на спојевима који се испитују разарањем и металографским методама. При томе, оптималан режим представља такав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

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 (слика 2.12).

Примери основних циклуса тачкастог заваривања без додатне силе искивања (а) и са додатном силом искивања (б) дати су на слици 2.12. Код неких челика неопходно је, после искључивања струје и одређене паузе, укључити струју жарења (i_z) која делује за време t_z (слика 2.13а). Тачкасто (и рељефно) заваривање лимова дебљих од 3 mm често се изводи периодичним искључивањем и укључивањем струје, тј. импулсним заваривањем (слика 2.13б).



Слика 2.12 Основни циклуси тачкастог заваривања: а) без искивања и б) са искивањем



Слика 2.13 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 и осетљивост на термички циклус заваривања.

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 2.4.

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 2.4 Режими тачкастог заваривања нискоугљеничних челика

Дебљина једног лима, s , mm	Пречник 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

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 искивања 2.5-4 пута веће него за нискоугљеничне челике. Сличним режимима заварују се и термостостојани 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. $t_z = (2 - 4) \cdot T = (2 - 4) \cdot 1/f = 0.04 - 0.08 s$. Сила притиска у N се израчунава према изразу:

$$F_z = k \cdot s^2 \cdot R_{p0.2}$$

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.

Термофизичке карактеристике лимова које битно утичу на заварљивост електричним отпором, дате су таблци 2.5.

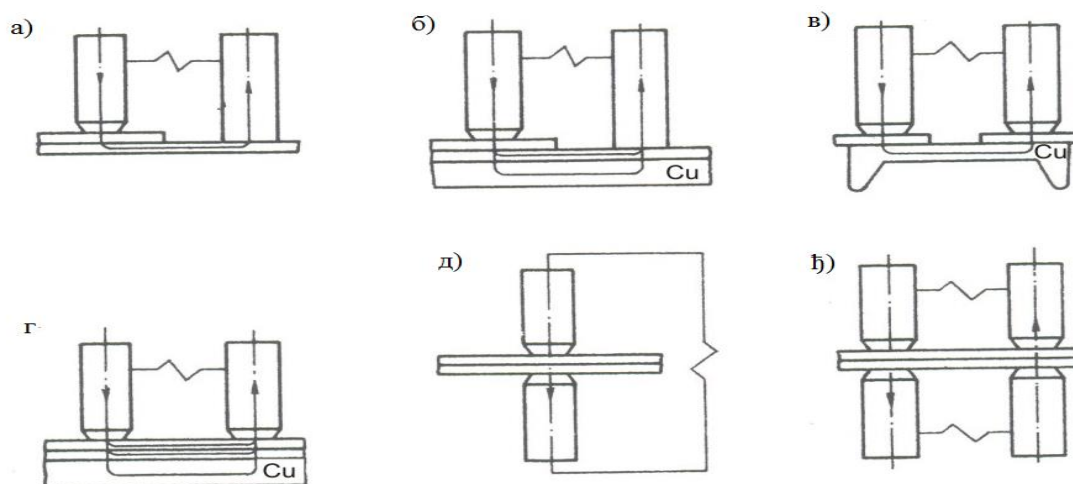
Таблица 2.5 Неке термофизичке карактеристике челика, алуминијума и месинга

Материјал	λ , $J/m \cdot s \cdot K$	c , J/kgK	$\rho_T \cdot 10^{-6}$, Ωm	T_b , $^{\circ}C$	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

2.3.2 Технологија тачкастог заваривања

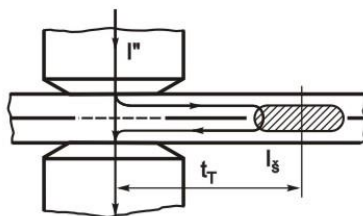
Тачкасто заваривање најзаступљенији је облик електроотпорског заваривања који се примењује у данашњој индустрији. Заварени спој није континуиран, већ заварени спој чине једна или више тачака. Радни комади најчешће се преклапају и притискају електродама како би се фиксирали и како би се остварила довољна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

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 вишетачкасто и једнотачкасто. Код вишетачкастог заваривања остварује се више заварених места, јер струја заваривања пролази кроз више тачака. У већини случајева изводи се двострано тачкасто заваривање (слика 2.14е), мада се по потреби користе и шеме дате на слици 2.14а,б,в,г,д,ђ.



Слика 2.14 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 (слика 2.15); 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 2.15 Шема 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 2.6.

Таблица 2.6 Минимални кораци (t_T) и преклопи (a) при тачкастом заваривању

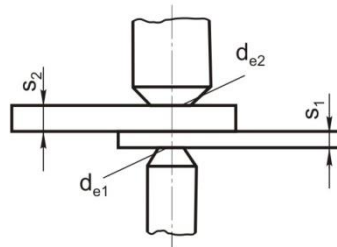
s, mm	Конструкциони челици		Ватростални челици		Лаке легуре		Легуре бакра	
	t_T , mm	a, mm	t_T , mm	a, mm	t_T , mm	a, mm	t_T , mm	a, mm
0.5	10	8	8	6	15	12	10	10
1.0	12	10	10	8	15	14	14	12
2.0	18	14	14	12	25	20	20	16
3.0	25	18	18	16	30	26	26	22
4.0	35	22	22	20	35	30	30	26

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 лима s_1 , пречник 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:

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{s_1}{A_1} = \rho_1 \cdot \frac{4 \cdot s_1}{d_{e1}^2 \pi}; R_2 = \rho_2 \cdot \frac{s_2}{A_2} = \rho_2 \cdot \frac{4 \cdot s_2}{d_{e2}^2 \pi}$$

За правиан положај сочива, мора се успоставити топлотна равнотежа, $R_1 = R_2$, или $\rho_1 \cdot s_1 / d_{e1}^2 = \rho_2 \cdot s_2 / d_{e2}^2$. 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.

3. ИЗБОР ТЕХНОЛОГИЈЕ ТАЧКАСТОГ ЗАВАРИВАЊА КАРОСЕРИЈСКИХ ЛИМОВА

Тачкасто електроотпорско заваривање је веома заступљено у аутомобилској индустрији и најчешће се користи за спајање челичних каросеријских лимова. У једном аутомобилу може бити и до 15 000 тачкасто заварених спојева. Велике фабрике користе више од 2000 апарата за заваривање за производњу аутомобила, где инсталисана снага достиже вредност од 160 000 kVA. Машине које се најчешће користе за тачкасто заваривање у аутомобилској индустрији могу заварити по 200 тачка у минути, а постоје машине које достижу бројку од 350 тачка у минути. Поред елемената каросерије у аутомобилској индустрији електроотпорски се заварују и резервоари за гориво, делови издувног система и др. Електроотпорско заваривање у аутомобилској индустрија је углавном аутоматизовано и роботизовано што има за циљ повећање продуктивности и смањење трошкова рада, али и побољшање квалитета заварених спојева.

Електроотпорско тачкасто заваривање је кључни процес спајања лимова у аутомобилској индустрији. Развој напредних челика велике јачине за примену у аутомобилској индустрији прати се са изазовом да се што боље разуме физичка и механичка металургија ових материјала у процесима електроотпорског тачкастог заваривања. Најчешће примењивана дебљина лимова која се користи за израду каросерија у аутомобилској индустрији је $s = 0.8 \text{ mm}$. Поред челика и његових легура у изради аутомобилских каросерија примењују се још и бакар и његове легуре, алуминијум и легуре алуминијума, цинк итд.

3.1 Електроотпорско тачкасто заваривање легура алуминијума

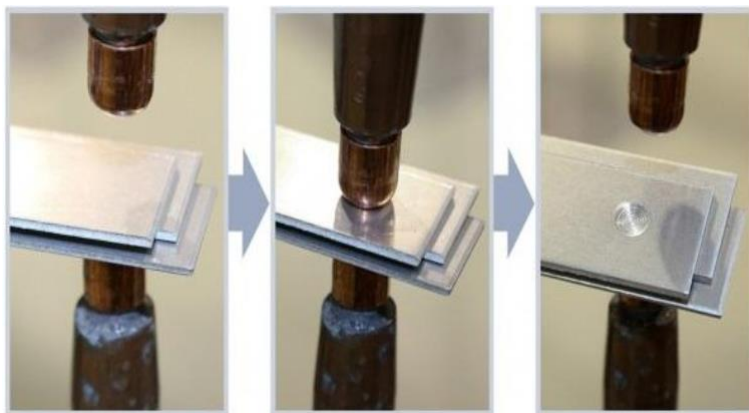
Избор материјала представља кључну фазу при дизајнирању возила. Данашња возила имају велику масу јер се највећим делом састоје из челика, материјала који се показао веома чврстим али и велике специфичне тежине. Протеклих 25 година уложени су велики напори, и знатна финансијска средства за примену алуминијума као замену за досад најкоришћенији материјал у ауто-индустрији - челик.

Џенерал Моторс (GM) развио је прву технику заваривања двају и више легираних алуминијумских лимова у производњи својих аутомобила, за разлику од тежих, конвенционалних материјала. То доводи до производње лакших аутомобила чиме се и потрошња горива знатно смањује.



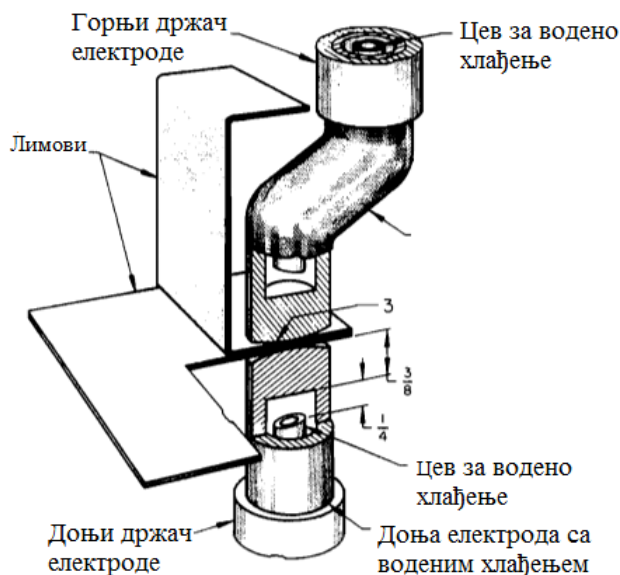
Слика 3.1 Алуминијумска каросерија

Користећи ову технологију знатно се смањује маса закивних спојева за делове каросерије, врата, хаубе итд. Осим тога на крају животног циклуса, рециклирање тачкастих спојева је једноставније него рециклирање закованих спојева. На слици 3.2 приказан је изглед тачкасто завареног споја сачињеног од три лима од алуминијума.



Слика 3.2 Тачкасто заварен спој изведен од три алуминијумска лима

Алуминијум и његове легуре могу се успешно заваривати електроотпорским поступцима. Јачина тачкасто заварених спојева варира у зависности од врсте алуминијумских легура и дебљине лима. При спајању лимова различитих димензија, оне са сличном електричном проводљивошћу и температуром топљења је најлакше заварити. Пресовани алуминијум и легуре алуминијума се често тачкасто заварују. Легуре алуминијума имају много већу електричну проводљивост за разлику од многих других метала који се тачкасто заварују. Велика термичка проводност захтева брзо заваривање како би се избегла дисипација тополоте на радне комаде. Како би се то избегло користе се машине за заваривање мање инертности како би електроде могле да изврше брзо померање и одржавање неопходне силе притиска на радни комад. Иако су ова померања мала, потребно је да се она изведу у интервалу од 2-5 милисекунди.



Слика 3.3 Конструкција електрода за тачкасто заваривање легура алуминијума са правим и измештеним лицем

3.2 Проблеми тачкастог заваривања у ауто-индустрији

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 у зимским периодима, са порастом загађења ваздуха у великим градовима и индустријским областима. Повећањем деловања корозије смањује се век трајања каросерије аутомобила. Штете на каросеријама аутомобила проузроковане корозијом су велике и тешко их је смањити. Корозија спољашњих делова каросерије може се ограничити побољшањем начина наношења боје. Произвођачи аутомобила стога улажу много напора да побољшају конструкцију делова изложених појави корозије, у многим случајевима они почињу да примењују материјале који имају већу корозивну отпорност.

Главна потешкоћа при тачкастом заваривању скоро свих комерцијално произведених заштита јесте смањење века електроде за заваривање, ово је изазвано вишим термичким оптерећењем неопходним за заваривање лимова са превлакама, које имају ниску температуру топљења (цинк, калај, олово), легирањем електроде са заштитним материјалом.

Прилепљивање нечистоћа или контаминирањем електрода погоршавају се њихове механичке и електричне особине, па се морају често поново оштрили и замењивати. Ово је непрактично и скупо али неопходно, јер се густина струје у шаву смањује и настаје незадовољавајући спој.

Могуће мере за продужење века електрода су следеће:

- побољшање начина заштите;
- побољшање квалитета електродног материјала;
- оптимизација процеса заваривања;
- корекциони систем код процеса аутоматског управљања и тсл.

За избор технологије тачкастог заваривања при спајању делова каросерије битно је размотрити последње две мере.

3.2.1 Оптимизација процеса заваривања

У случају самог процеса на успех операције заваривања може се утицати исправним подешавањем параметара заваривања. Многи истраживачи су радили на одређивању оптималних параметара за заваривање различито заштићених челичних лимова. Општа тежња је да се смањи доведена количина топлоте, углавном скраћењем времена заваривања. Међутим, за различите материјале и различите области примене мора се одредити другачија комбинација параметара. Познавање технолошких могућности мора такође да одигра своју улогу у производним условима, применом метода математичке оптимизације услова заваривања.

3.3 Аутоматизација и роботизација технологије тачкастог заваривања

У ауто-индустрији спајање лимова изводи се, по правилу, низом тачкастих спојева.



Слика 3.4 Тачкасто заваривање каросеријског лима

Пошто су производни трошкови у ауто-индустрији углавном одређени ценом радне снаге, многи погони покушавају да смање или рационализују трошкове увођењем делимично или потпуно механизованих производних процеса. Механизовано заваривање може побољшати продуктивност, квалитет тачкасто завареног споја, и радне услове. Механизација омогућава заваривање у случајевима када оно није могуће ручним поступком.

Потпуно аутоматизовано заваривање подразумева механизовано позиционирање радног комада, а након заваривања, и његов аутоматски транспорт на следеће место. Увођење и примена роботизованог тачкастог заваривања представља највиши ниво аутоматизације, где поред почетка и завршетка заваривања постоји и кретање између позиција помоћу програмски управљаног робота.

Поступак спајања код већих делова од релативно танког лима роботизован је по први пут пре више од 30 година. Данас је ауто-индустрија највећи корисник робота за ову намену (седамдесетих година заваривање у аутомобилској индустрији представљало је главно поље индустријске примене робота), мада се за спајање дебљих, али и тањих лимова, све више уводи поступак шавног заваривања, који има одређене предности над овим поступком (јачи, континуалан спој лимова, херметичност, и др.).

Упркос томе што се увођењем роботизације губи велики број радних места, она је незаобилазна из више разлога. Сталним захтевом за повећањем продуктивности, побољшањем рада заваривача, повећањем и понављањем високог квалитета, избегавањем грешака које настају као последица људског фактора и многим и многим другим. Увођење роботизованог заваривања захтева утрошак додатног времена потребног за програмирање робота, и врло тачно позиционирање радних комада за извођење заваривања.

Тачкасто заваривање је основна технологија за зафомирање шасије аутомобила и многих других производа, тако да ћемо се усредсредити на примену индустријских робота за тачкасто заваривање у овој грани индустрије.

3.3.1 Индустијски роботи

Индустијски робот је рачунарски управљан, репрограмабилан вишенаменски манипулатор који је пројектован да замењује човека у обављању одређених послова. Састоји се од механичког дела, који се покреће, и управљачког система који обрађује и координира кретање и деловање робота. Механички део је направљен као кинематички ланац од чврстих сегмената спојених помоћу зглобова који омогућавају ротационо и транслаторно померање врха робота.



Слика 3.5 Изглед робота за тачкасто заваривање

3.3.1.1 Програмирање робота

Постоји више начина програмирања робота који су се хронолошки развијали као и сама роботизација у индустрији. Основне методе програмирања роботског заваривања:

- програмирање на самом роботу, тзв. *on-line програмирање* ;
- програмирање ван роботске ћелије, *off-line програмирање* и
- *хибридно (мешано) програмирање*.

On-line програмирање (програмирање обучавањем) се изводи тако што оператер ручно води робота по путањи и идентификује кључне тачке, односно позиције на којима робот мења правац, где се мењају параметри заваривања или где робот започиње или завршава заваривање. Координате позиција се снимају у меморији робота, заједно са додатним инструкцијама, што омогућава роботу да касније понови исту операцију. Овај начин програмирања данас се врло ретко користи у индустрији, па тако и у оквиру технологије заваривања.

Off-line програмирање се изводи на рачунару који може бити дислоциран од робота и не захтева физичко кретање робота, што је економски оправдано чиме се избегавају скупи застоји. Данашње *off-line* програмирање робота се најчешће врши у програмским језицима за роботе и користи софистициране 3D графичке програме у које се уносе информације о роботском систему, њихању и радном комаду, па се трајекторија робота и програм за његово управљање по задатој трајекторији генеришу интерактивно.

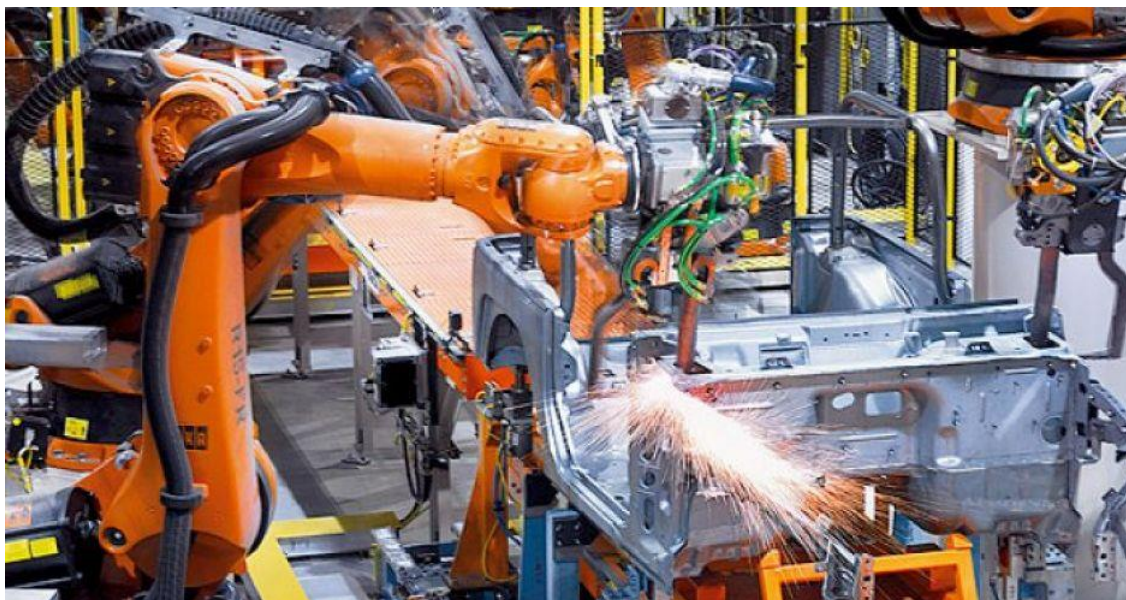
Хибридно (мешовито) програмирање је комбинација *on-line* и *off-line* програмирања са сврхом да се искористе предности од сваке поједине методе, а елиминишу недостаци. Овом методом потребно је превести робота преко жељених тачака како би запамтио позиције (*on-line* део), након тога се на рачунару који није директно повезан са роботом, помоћу прикупљених информација о позицијама кључних тачака израђује програм заваривања (*off-line* део). Таквим начином програмирања робот је краће време изузет из производње.

Такође унутар наведених основних метода програмирања постоје даље поделе на:

- “teach-in” метода;
- директно и индиректно програмирање;
- програмирање кретањем по стази;
- програмирање постављањем на тачку;
- програмирање са сензорском подршком;
- макропрограмирање;
- графичко програмирање;
- програмирање оријентисано задатку;
- програмирање оријентисано покрету.

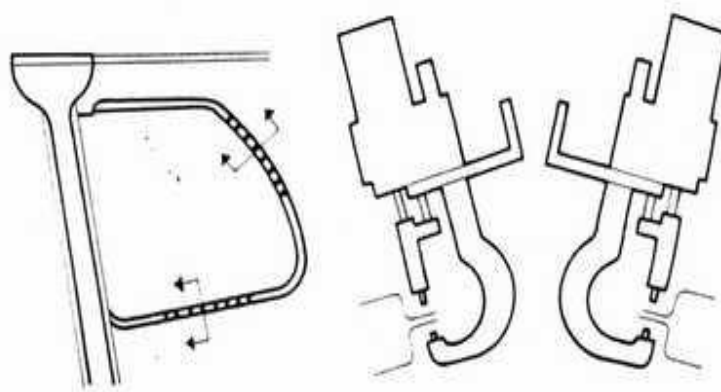
3.3.2 Роботско електроотпорско тачкасто заваривање

Електроотпорско тачкасто заваривање изведено помоћу робота је први успешан метод који се користи још од раних седамдесетих година прошлог века. Разлог томе је сто је захтевана тачност позиционирања тачкастог споја често $\pm 1 \text{ mm}$. Роботи за тачкасто заваривање аутокаросерија у данашњој употреби су на хидраулички и у последње време све бројније на електромоторни погон. Они имају знатну носивост до 100 kg , због тежине клешта за заваривање са кабловима од око $40\text{--}60 \text{ kg}$. Међутим, није само статичка носивост оно што одређује снагу погона. Робот мора бити способан да помера заваривачки уређај кратким и брзим покретима (брзине кретања су до $1,6 \text{ m/s}$), при чему се јављају велика убрзања, па отуда и инерцијална оптерећења.



Слика 3.6 Роботи за тачкасто заваривање каросерије аутомобила

Ови роботи се одликују високом тачношћу позиционирања и поновљивости унутар вредности од 1 *mm*, дохват “руке” им је обично 2,5 до 3,5 *m*, а практично сви имају шест активних степени слободe: три у основној конфигурацији и три у погону хватаљке у циљу њене пуне оријентације у простору. Да је то заиста потребно, види се са слике 3.7, која приказује малу али сложену промену радне зоне код заваривања два суседна прозорска руба на аутокаросерији. Са цртежа се одмах види промена два угаона положаја клешта а ако се има на уму да су код скоро свих савремених аутомобила прозорска стакла на бочним прозорима закривљена око уздужне осе, види се потреба и за трећом променом угла, тј. степена слободe носача клешта за заваривање.



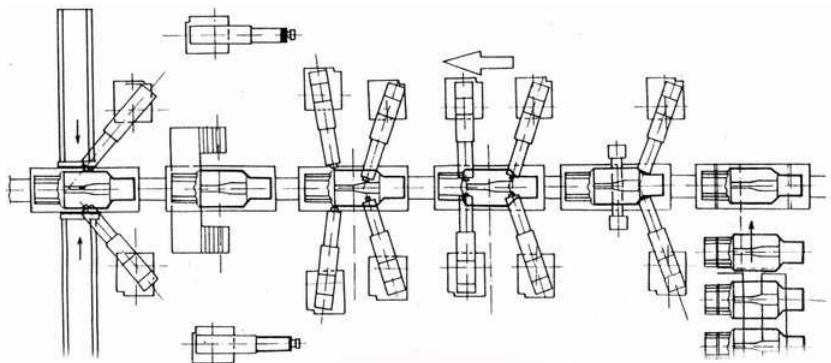
Слика 3.7 Сложена промена радне зоне

Са становишта типа управљања, тачкасто заваривање захтева управљање од тачке до тачке. Међутим, ова тврдња би се морала ограничити на простије проблеме тачкастог заваривања, оне код којих конструкција која се заварује стоји. Код сложенијих проблема ова тврдња није тачна. На пример, ако се заварује нека конструкција која се налази на покретној траци и ако се трака не зауставља у време заваривања, тада управљачки систем робота мора обезбедити праћење путање, а не само стицање у тачку.

Закључујемо да код овог радног процеса, који се обично одвија на линијама (трансфер), изузетно важну улогу игра синхронизација рада целе линије, која се може кретати на два начина:

- *прекидно*, са заустављањем каросерија на тачно одређеним местима, на којима роботи, обично у паровима, заварују групе тачака те фазе операције спајања,
- *непрекидно*, без заустављања, кад роботи прате у току фаза својих операција радни комад (аутокаросерију) и у кретању заварују тачке из те фазе.

Слика 3.8 приказује типичну линију заваривања аутокаросерија (крећући се одоздо на горе) са 16 робота у раду на линији и два резервна, који стоје спремни за замену оног који би могао испасти из рада, у данас уобичајеном временском интервалу од пола часа.



Слика 3.8 *Линија заваривања каросерија*

Робот може узастопно да помера пиштољ на сваку локацију и позицију наспрам заваривачког шавва. Такође може да понови програмиране распореде заваривања. Оператер који ручно заварује није у могућности да заварује добро као робот због тежине пиштоља и монотоности посла.

Роботи за тачкасто заваривање требали би да имају шест или више оса како би били способни да приђу тачкама у радном пољу из свих углова. То омогућава флексибилност позиције пиштоља да врши заваривање. Неке позиције које су незгодне за људског оператера, као што је заваривање наопачке (одоздо) су лаки задаци за робота.

Употреба робота у пословима заваривања обезбеђује већу продуктивност и бољи квалитет, а такође значајно доприноси и хуманизацији рада.

3.4 Сензори

Процес заваривања изложен је разним спољашњим факторима који доводе до грешака, попут непрецизне припреме жлеба, смицаља радног комада, одступања радних параметара и слично. Разлика између заваривања човека и робота је, између осталог, и што човек види спој који заварује, што уочава поремећаје и што може да предузме кораке ради обезбеђења квалитетног споја. Ти кораци су дефинисани одговарајућом процедуром која се учи и стиче искуством. Робот, с друге стране, под овим условима може да произведе лош спој. Развој опреме за заваривање пратио је и развој мерних уређаја за праћење параметара заваривања током процеса заваривања. У новије време за праћење ових параметара користе се сензори који замењују очи и уши искусног заваривача. Управљачки системи и рачунарска опрема раде и реагују на промене параметара заваривања много брже него човек. Данашња опрема омогућава интелигентнији рад опреме за заваривање, тј. могуће је у меморију уградити знање и искуство заваривача и технолога заваривања, а самим тим и побољшати квалитет на тај начин да се открије одступање од прописаних параметара и да се то одступање коригује. Коришћењем разних сензора, хардвера и софтвера за праћење, регистровање и обраду података могуће је пратити брзе промене параметара заваривања.

4. МЕТОДИ КОНТРОЛЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

У свим фазама извођења 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.

Тачкасто заварени спојеви повремено се контролишу на узорцима завареним истом технологијом као и дати производ.

Контрола заварених спојева се може поделити на:

- Контролу без разарања и
- Контролу са разарањем.

4.1 Методе контроле заварених спојева без разарања

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

У испитивања без оштећења завареног споја спадају:

- спољашњи преглед (визуелна контрола);
- проба непропустљивости (херметичности);
- радиографске пробе (рендгенским x и γ -зрацима);
- магнетна и
- ултразвучна испитивања.

4.2.1 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.



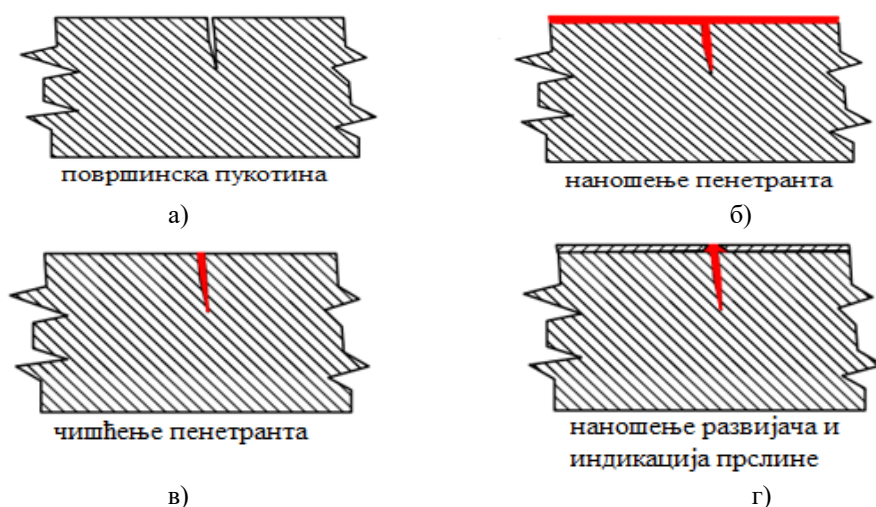
Слика 4.1 Бороскоп, уређај који се понекад користи за визуелну контролу

4.2.2 Проба непропустљивости (херметичности)

Пробе херметичности завареног споја изводе се помоћу нафте и креде, пенетраната, водене пробе или помоћу компримованог ваздуха. Проба непропустљивости помоћу нафте изводи се тако што се са стране корена шавананесе прах креде, а лице шаванобилно се накваси нафтом. Пролазак нафте кроз шав, и затамњење слоја креде, сведочи о нехерметичности споја. Време трајања пробе мора износити најмање 1 h, а при прецизнијем испитивању око 8 сати.

Проба херметичности помоћу пенетраната или капиларне дефектоскопије, тј. обојене течности за откривање грешака, обавља се после пажљивог чишћења испитиване површине. Пенетрант се састоји од две течности - црвене и беле. Најпре се очишћена површина кваси црвеном течношћу, а после 5 min она се уклања ватом, а затим се испитивана површина кваси белом течношћу (изазивачем).

На местима прслина појављују се на белој основи изразито црвени зарези, чија ширина указује на облик дубину прслине.



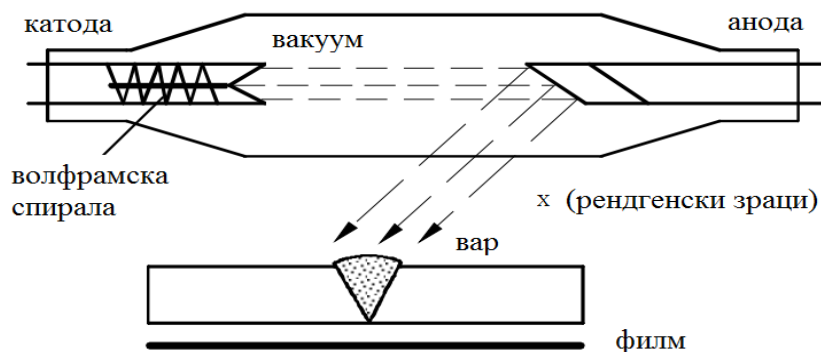
Слика 4.2 Шематски приказ процедуре спровођења испитивања пенетрантима

Проба херметичности помоћу компримованог ваздуха изводи се под притиском ваздуха вишим 1.5-2.5 пута од радног притиска. Заварени спојеви се после детаљног чишћења премазују сапуницом и затим, кад се уведе ваздух под притиском, визуелно прати да ли ће се појавити мехурови сапунице. Мали резервоари подвргнути притиску ваздуха могу се потопити у каду са водом, слично као што се контролише унутрашња аутомобилска гума после крпљења.

Пробе херметичности помоћу воденог притиска обављају се пуњењем посуде водом и посматрањем са спољашње стране. Цурење или влажење сведоче о нехерметичности завареног споја.

4.2.3 Радиографска проба

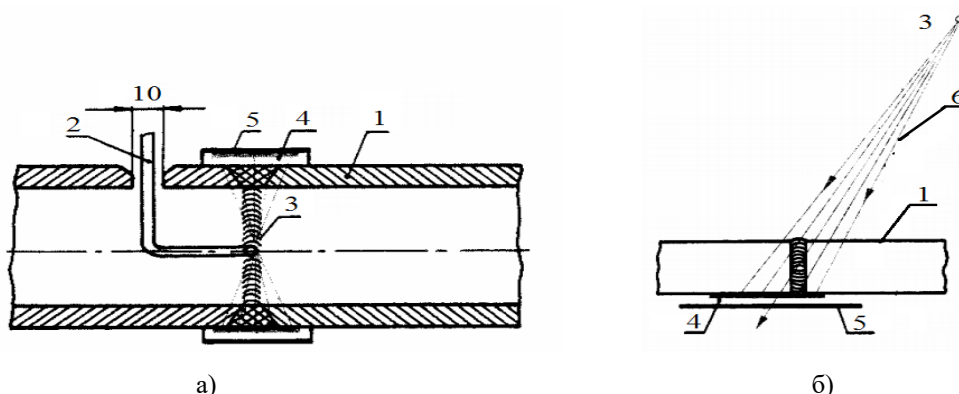
Рендгенско испитивање заснива се на продирању x- зракова створених у рендгенској лампи (слика 4.3) изложеној високом напону. Електрони емитовани из катодe (спиралне волфрамске жице) ударају о аноду и ту се емитују x- зраци који се усмеравају на шав (вар). Места грешки у завареним спојевима, нпр. непровар, неметални укључци и поре, лакше пропуштају x-зраке и фотографска плоча - филм (на супротној страни споја) постаје више осветљена. Неке грешке, нпр. надвишење шаван, доводе до слабијег осветљавања плоче. После развијања плоче добија се радиограм (снимак) на коме се могу уочити грешке на основу тамнијих и светлијих места.



Слика 4.3 Шема испитивања завареног споја рендгенским зрацима

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

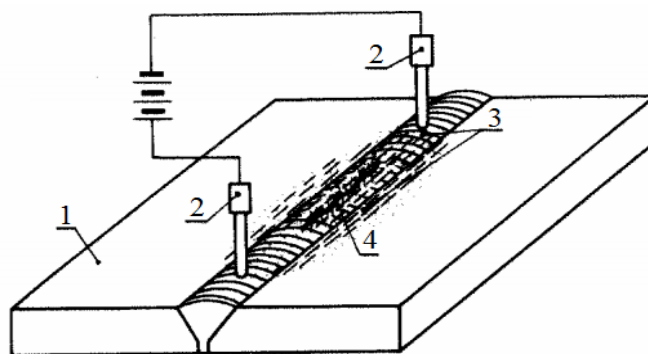
Ампуле са радиоактивним изотопом постављају се на испитивано место са једне стране споја, а са друге стране ставља се најпре плоча, а преко ње заштитна оловна фолија. Гама зраци пролазе кроз метал шав и осветљавају плочу на којој се могу уочити места грешки. За цеви или резервоаре већег пречника испитивање се изводи по кругу (слика 4.4а), а за мање пречнике по елипси (слика 4.4б).



Слика 4.4 Шема испитивања заварених цеви γ -зрацима: а) просветљавање по кругу; б) просветљавање по елипси: 1- цев, 2- довођење изотопа, 3- изотоп, 4- фотографска плоча, 5- оловна заштита, 6- γ -зраци

4.2.3 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 (слика 4.5).

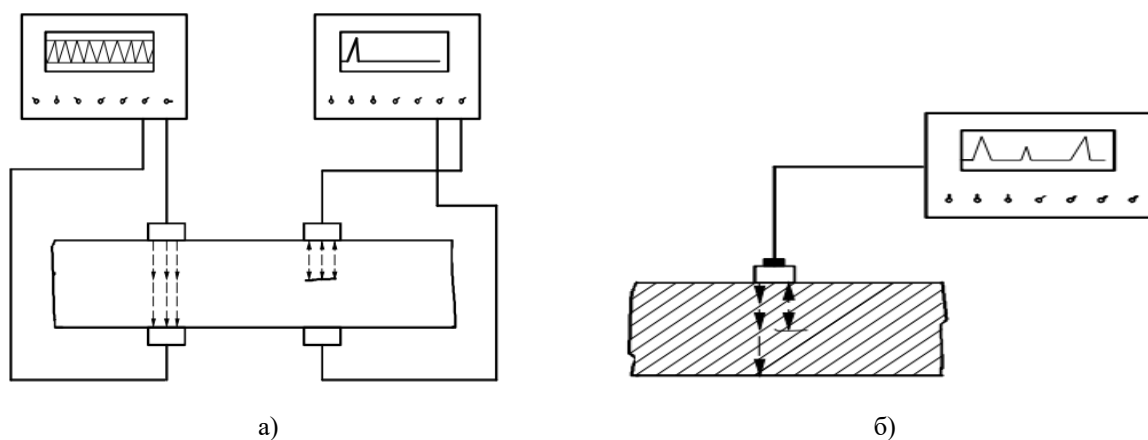


Слика 4.5 Шема магнетног испитивања: 1- заварена плоча, 2- електроде за довођење електричне струје, 3- гвоздени прах, 4- прслина у шаву

Ова метода је најшире примењивана у практичној употреби јер има релативно ниску цену и једноставна је за примену. Помоћу ове методе се најчешће откривају грешке типа пукотина, зареза и већих укључака нарочито оних уз или близу површине шавова. Недостатак ове методе јесте тај што не одређује димензије грешке и не може се примењивати грешке веће дубине ($> 6 \text{ mm}$).

4.2.4 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 кваси 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 (слика 4.6б). 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 (слика 4.6).



Слика 4.6 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.

4.3 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:

- испитивање затезањем;
- испитивање савијањем и
- испитивање ударне жилавости.

Од металографских проба у примени су:

- макроскопско и
- микроскопско испитивање.

4.3.1 Испитивање затезањем

Овим се испитивањем одређује отпорност завареног споја на дејство спољних затезућих сила. Уопште се пробом на затезање одређује јачина на кидање ($R_{p0.2}$, МПа), издужење (A_5 , A_{11} , %) и сужење (Z , %).

Приликом овог испитивања, најпре се одређују механичке особине основног материјала (слика 4.7а), а затим завареног споја: на пробама са паралелним (слика 4.7б) и удубљеним боковима (слика 4.7в).

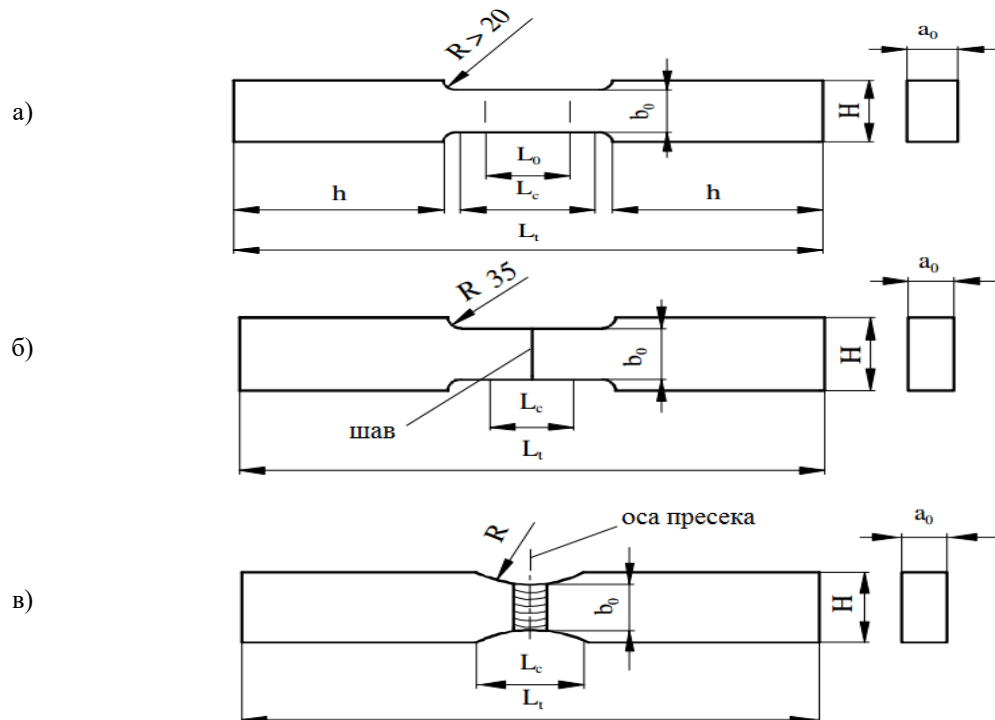
Радна или мерна дужина незаварене пробе треба да буде $L_0 = 5 \cdot d_0$, где је:

$$d_0 = 11.3 \cdot \sqrt{S_0}$$

Остале димензије пробе, у *mm*, дате су у таблици 4.1.

Таблица 4.1

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



Слика 4.7 Прообе испитивања затезањем: а) основног материјала, б, в) заварених спојева

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

- **Затезна чврстоћа (јачина на кидање):**

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ MPa.}$$

- **Релативно процентуално издужење:**

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100, \%$$

- **Напон течења или технички напон течења:**

$$R_{p0.2} = \frac{F_p}{S_0} \text{ или } \left(R_{p0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \right), \text{ MPa,}$$

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:**

$$E = \frac{F \cdot L_e}{\Delta L \cdot S_0}, \text{ MPa,}$$

где је:

F - сила затезања, N ,

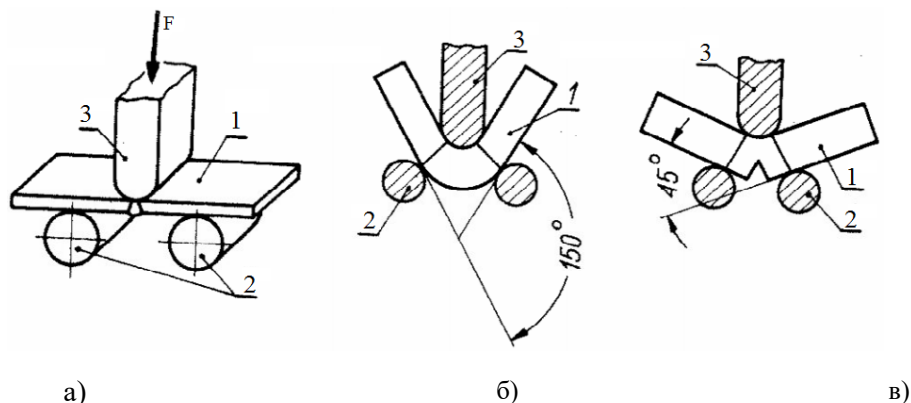
L_e - усвојена мерна дужина екстензометра, mm ,

S_0 - попречни пресек пробе, mm ,

ΔL - издужење (еластично), mm .

4.3.2 Испитивање савијањем

Резултати добијени при испитивању савијањем служе за процену пластичности завареног споја. Заварени узорци се после одговарајуће припреме подвргавају дејству силе савијања (слика 4.8). Ако се за време савијања пробе постигне најмања тражена вредност угла савијања без појаве прслине, то је резултат испитивања позитиван (слика 4.8б). Ако се у току испитивања уоче у шаву мале прслине (слика 4.8в) резултат је негативан под условом да је угао савијања мањи од траженог.

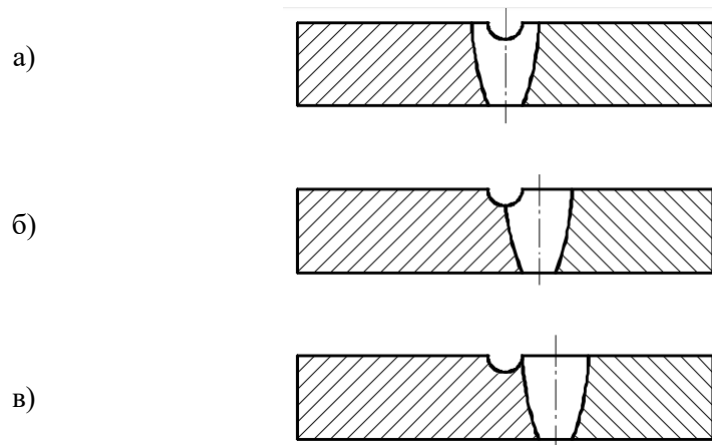


Слика 4.8 Испитивање савијањем: а) почетни положај, б) проба без грешки у шаву, в) прскање шаву при малом углу савијања; 1- заварена проба, 2- ваљци за ослањање, 3- притискивач

4.3.3 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 шави, зоне стапања и зоне утицаја топлоте (слика 4.9а,б,в).



Слика 4.9 *Пробе (Mespager) за испитивање жилавости: а) проба за жилавост шави, 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):

$$A_0 = A_1 - A_2, J$$

Као мерило жилавости по Шарпију узима се утрошени рад за лом епрувете (A_0) у Џулима ($1J = 1 Nm$).

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.

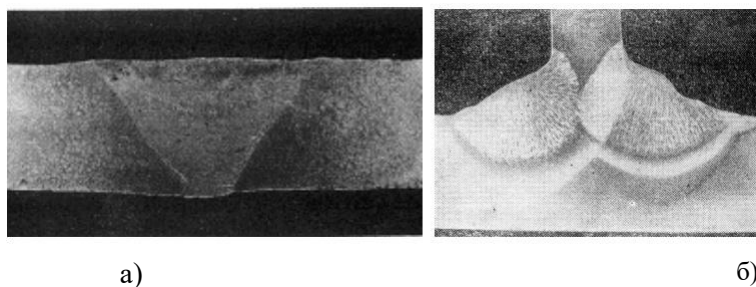
4.3.4 Металографска испитивања

Разликују се *макроскопска* и *микроскопска* испитивања.

Макроскопска испитивања се заснивају на посматрању, голим оком или са лупом повећања до 20× 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 шави, ЗУТ и основни метал (слика 4.10). На основу макроскопских испитивања утврђује се линија стапања, регуларност зоне утицаја топлоте, као и грешке облика шави и спољни мехурови, налепине, укључци треске и тсл.

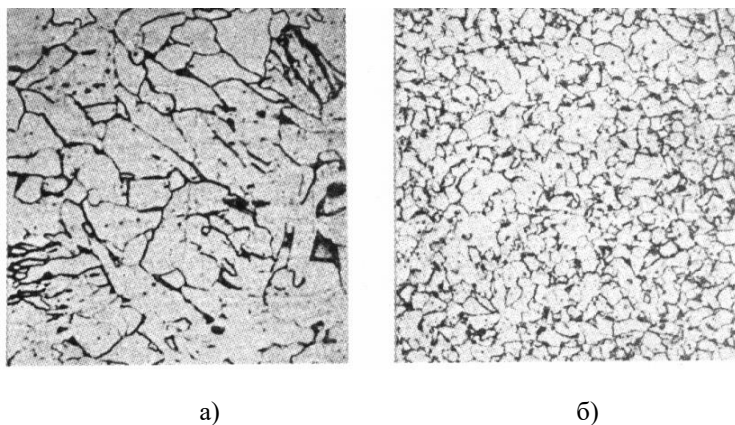
При макроскопском утврђује се дубина уваривања, надвишење шави и остале грешке облика и грешке као што су: зарези, гасни мехурови, укључци у тврдом стању, налепљивање и евентуалне прслине.

При микроскопском утврђују се врсте структура метала шави 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 4.10 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 шави и завареног метала. Груби кристали у шаву или зони утицаја топлоте указују на прегревање шави (слика 4.11а). Овакви спојеви су обично крти што се може поправити ако се заварени део нормализационо жари чиме се добија уједначена и ситнозрнаста структура (слика 4.11б).



Слика 4.11 Структура шави: а) прегрејаног и б) нормализационо жареног

5. ПРИМЕРИ ИЗВЕДЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТА

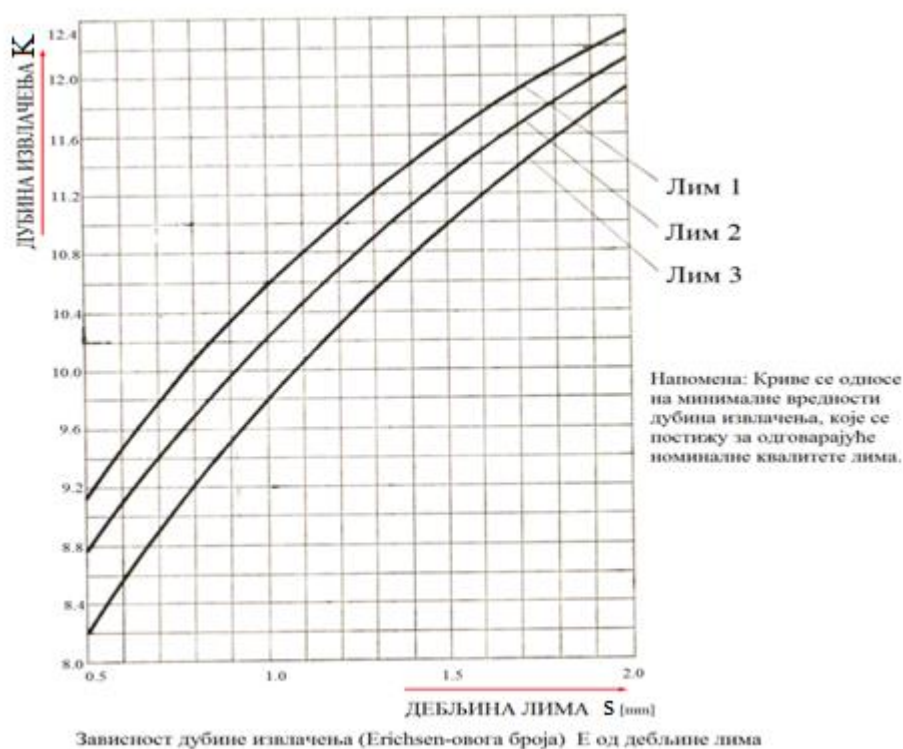
5.1 Основне карактеристике и намена испитиваних материјала

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 школки аутомобила има посебан значај.

Преглед нискоугљеничних челика за танке лимове намењених за пластичну деформацију са стањима површине дати су у табlici 5.1. 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 најмање дубине извлачења дате су на слици 5.1.

Таблица 5.1 Хемијски састав и механичке особине нискоугљеничних челика за лимове

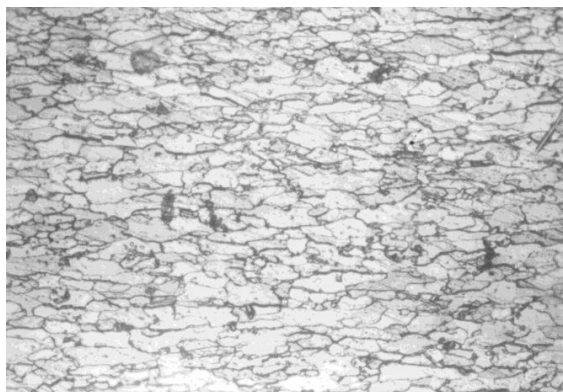
Ознака	Дезоксидација	Хемијски састав, %			Затезна јачина, МПа	Напон течења, МПа
		C	P	S		
Č0145	неумирен	0.15	0.060	0.060	280-500	-
Č0146	неумирен	0.10	0.050	0.050	280-420	-
Č0147	умирен	0.10	0.045	0.045	280-400	270
Č0148	умирен	0.10	0.030	0.035	280-380	240



Слика 5.1 Способност извлачења по Eriksenу

Заварљивост ових лимова топљењем, с обзиром на мали садржај угљеника је веома добра, а лимови са стањем површина Р3, Р4 и Р5 су подесни за тачкасто заваривање (Р3-површина лима без коварине, Р4-површина лима без коварине али са дозвољеним ситним огреботинама, Р5- 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 5.2а,б. Структура лимова састоји се од светлих жилавих зрна ферита између којих су смештена острвца перлита (слика 5.2а).



а)



б)

Слика 5.2 Микроструктура лима дебљине $s=0.8\text{mm}$ (а) и $s=1.2 \text{ mm}$ (б)

5.2 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.

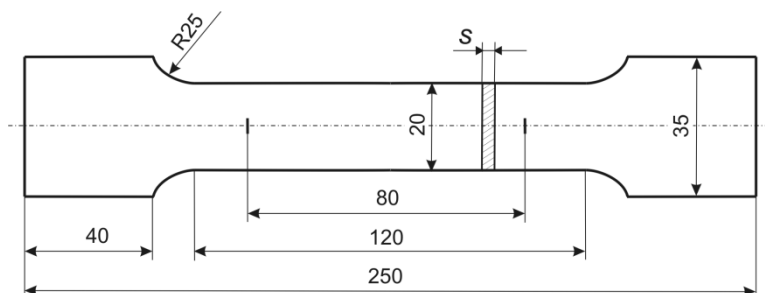
Стандардна испитивања лимова при производњи и преради углавном се заснивају на испитивању затезањем, одређивању хемијског састава, металографском испитивању микроструктуре, контроли тврдоће, провери дубоког извлачења и стања површине. Поред наведених карактеристика, за дефинисање квалитета лима, у новије 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.

5.2.1 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°).



Слика 5.3 Изглед и димензије узорка за одређивање механичких карактеристика материјала

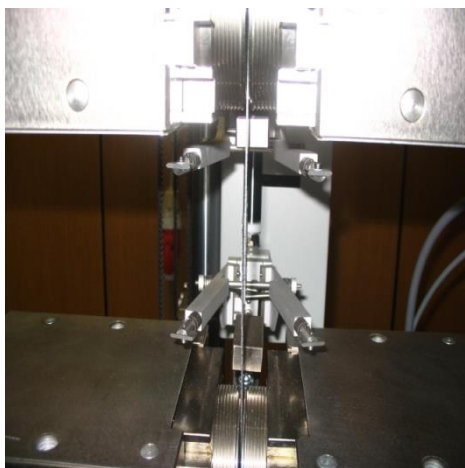
Циљ овог испитивања јесте провера неуједначености особина (анизотропије) материјала у различитим правцима, до које код лимова долази првенствено под утицајем њихове производње (ваљања). Анизотропија у равни лима најчешће се узима у обзир на тај начин што се по одређивању дате карактеристике у правцу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

$$X = (X_{0^\circ} + 2X_{45^\circ} + X_{90^\circ}) / 4.$$

При чему се индекси односе на правце сечења у односу на правац ваљања. Испитивања затезањем изведена су на механичкој кидалици (WPM, слика 5.4) и на савременој машини за испитивање на собној и повишеним температурама (Zwick/Roell Z100, слика 5.5).



Слика 5.4 Изглед механичке кидалице (WPM)



а)



б)

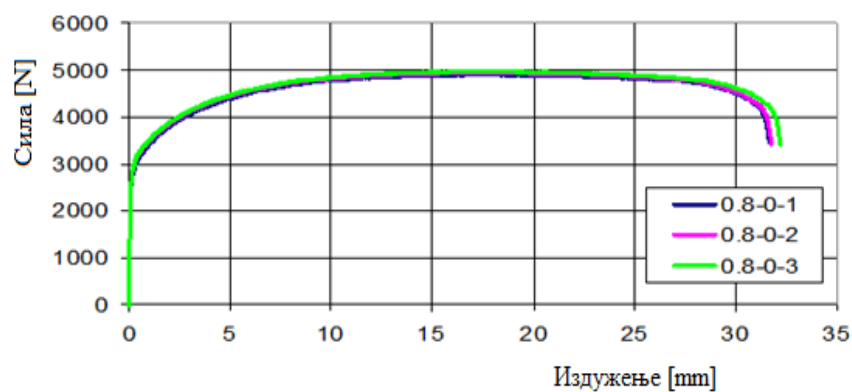
Слика 5.5 Изглед савременог мерног система (Zwick/Roell Z100): а) изглед екстензометра и детаљ стезних чељусту и

Добијени резултати испитивања се налазе у таблицама од 5.2 до 5.7 као и на сликама од 5.6 до 5.11, за различите правце и дебљине лимова.

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

Таблица 5.2 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 %	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

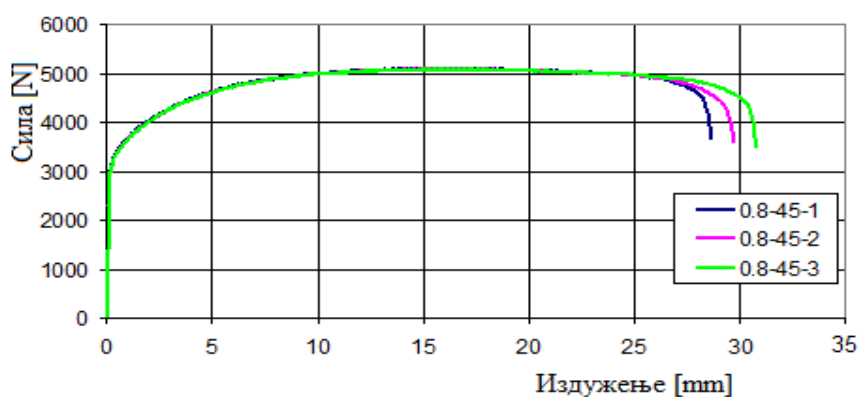


Слика 5.6 Дијаграм сила – издужење

- Испитивани узорак дебљине **$s = 0.8 \text{ mm}$** сечен под углом 45° у односу на правац ваљања

Таблица 5.3 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

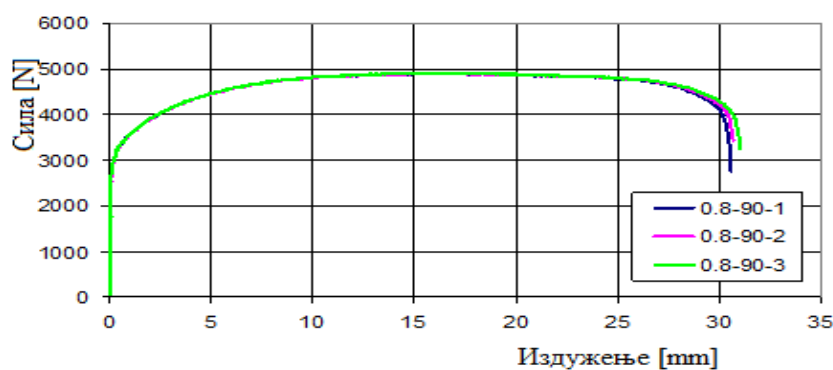


Слика 5.7 Дијаграм сила – издужење

- Испитивани узорак дебљине **$s = 0.8 \text{ mm}$** сечен под углом од 90° у односу на правац ваљања

Таблица 5.4 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 %	n	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

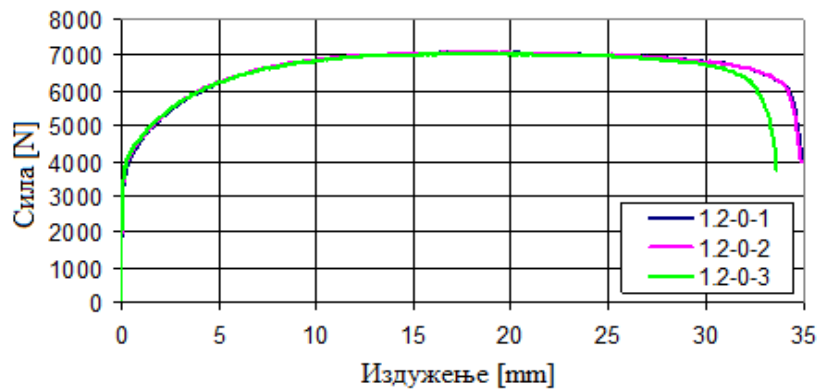


Слика 5.8 Дијаграм сила – издужење

0° - s= 1.2 mm

Таблица 5.5 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

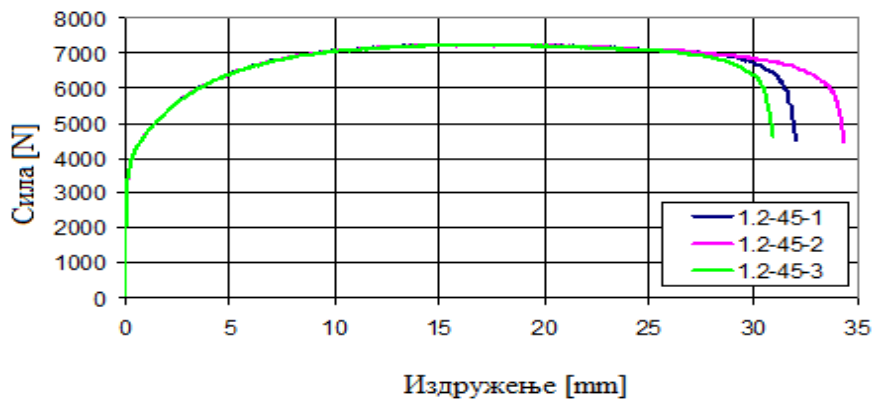


Слика 5.9 Дијаграм сила – издужење

45° - s= 1.2 mm

Таблица 5.6 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

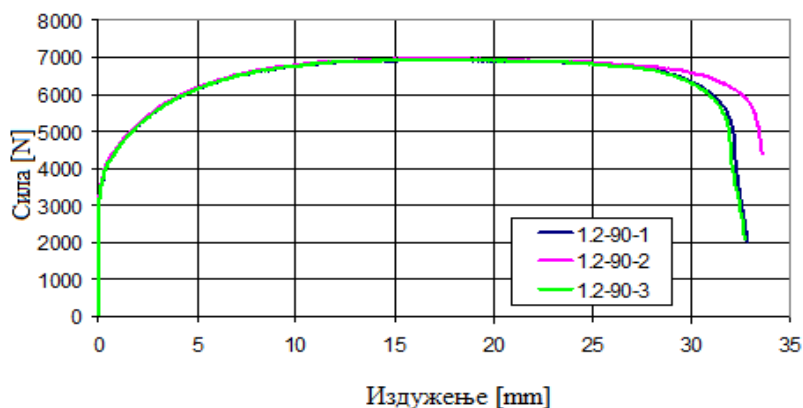


Слика 5.10 дијаграм сила – издужење

90° - s = 1.2 mm

Таблица 5.7 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 5.11 Дијаграм сила – издужење

Стање вредности добијених резултата лимова дебљина $s = 0.8 \text{ mm}$ и $s = 1.2 \text{ mm}$, за наведене правце дати су у табелици 5.8.

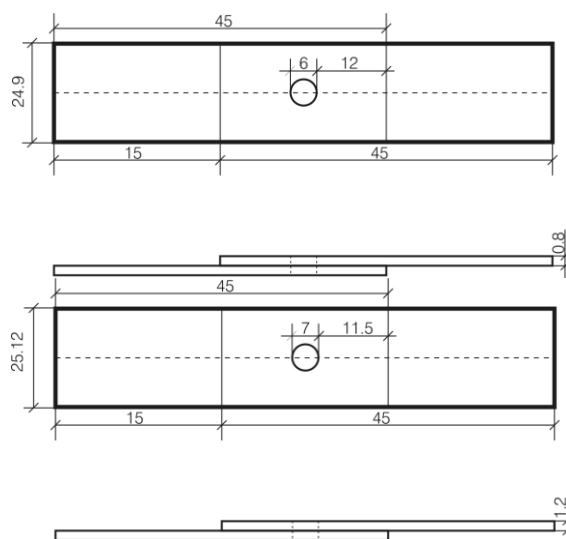
Таблица 5.8 Најважније механичке карактеристике испитиваних материјала (средње вредности)

Материјал	$\gamma_{\text{гао}}, ^\circ$	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_{sr}	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_{sr}	155.33750	292.77167	0.53067	41.25084	0.22050	1.90958	180.95834

5.3 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 (наведена на крају рада). После преклопног тачкастог заваривања епрувета-узорака, (слика 5.12), $20 \times 100 \text{ mm}$ за $s = 0.8 \text{ mm}$ и $25 \times 100 \text{ mm}$ за $s = 1.2 \text{ mm}$), исти су затезани 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 5.12 Изглед преклопно тачкасто завареног споја

Усвојени параметри заваривања дати су у табlici 5.9.

Таблица 5.9 Параметри тачкастог заваривања ("средњи" режим)

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

- d_e - пречник врха електроде у mm ;
- I_z - јачина струје, A ;
- t_z - време заваривања;
- F_z - сила притиска на електроде, daN ;
- F_r - минимална сила разарања завареног споја, daN .

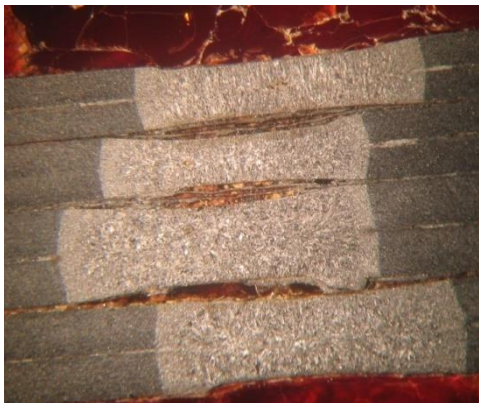
При извођењу затезања заварених спојева силе разарања биле су знатно веће од препоручених. У случају спојева остварених од лимова дебљине $s = 0.8 \text{ mm}$ вредности силе разарања биле су: 450 daN , 452, 463, 433, 461, 454, 469, 470, 476 и 480 (10 узорака). У случају спојева остварених од лимова дебљине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

5.4 Металографска испитивања завареног споја

Хемијски састав са описом микроструктуре, испитиваних лимова, дат је у табlici 5.1. Челични лим спада у групу квалитетних лимова предвиђених за обраду деформисањем и има особине предвиђене стандардом SRPS С.В4.016 за ову групу материјала. Структура испитиваног материјала одређивана је на металографским шлифовима (металним избрусцима) заварених спојева (слика 5.13), посматрањем на универзалном металографском микроскопу типа MeF2 фирме REICHERT. Изглед макро и микроструктура, појединих зона завареног споја, дат је сликама од 5.14 до 5.20.



Слика 5.13 Изглед затопљених металографских избрусака

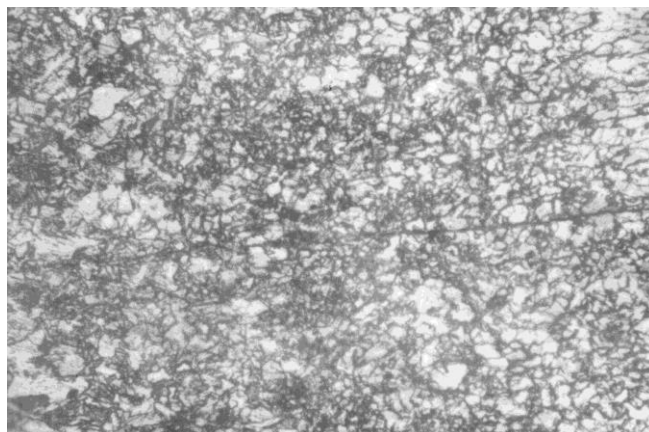


Слика 5.14 Макро изглед металографских избрусака ($s = 0.8 \text{ mm}$ -2 ком и $s = 1.2 \text{ mm}$ -2 ком)

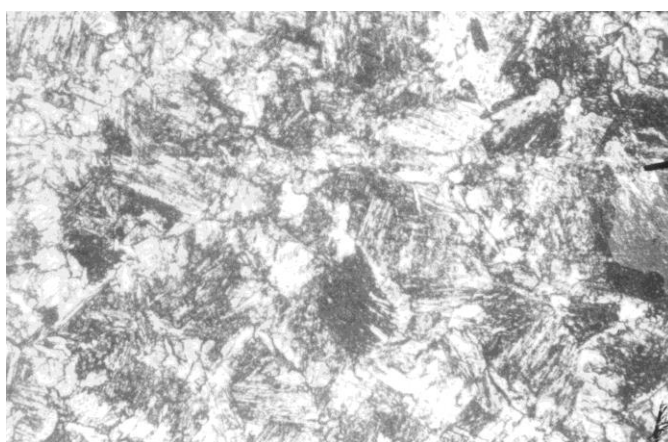


(Ситнозрна, претежно феритна структура са незнатним учешћем ферита)

Слика 5.15 Микроструктура OM – $s = 0.8 \text{ mm}$ (200×)



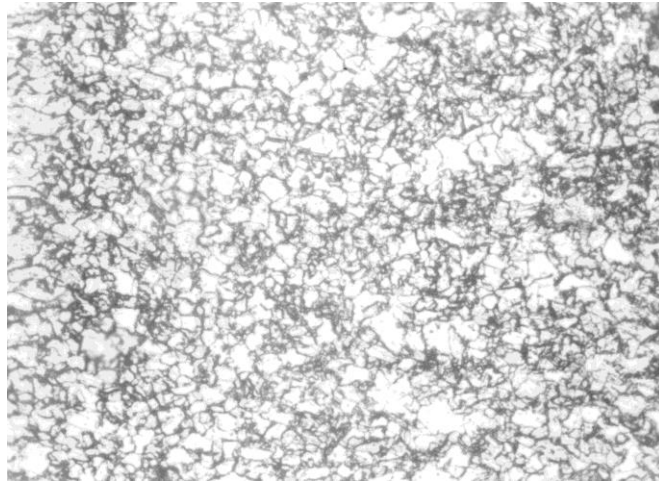
(Уситњена, нормализована феритна структура са незнатним ућешћем перлита)
Слика 5.16 Микроструктура ЗУТ-а – $s = 0.8 \text{ mm}$ (200 $\times$)



(Видманштетенова структура)
Слика 5.17 Микроструктура метала шави – $s = 0.8 \text{ mm}$ (200 $\times$)



(Ситнозрна, претежно феритна структура са незнатним учешћем перлита)
Слика 5.18 Микроструктура ОМ – $s = 1.2 \text{ mm}$ (200 $\times$)



(Уситњена, нормализована феритна структура са незнатним ућешћем перлита)

Слика 5.19 Микроструктура ЗУТ-а – $s = 1.2 \text{ mm}$ (200×)



(Видманштетенова структура)

Слика 5.20 Микроструктура метала шава – $s = 1.2 \text{ mm}$ (200×)

После изведених испитивања затезањем, визуелне контроле, макрографских и металографских испитивања, 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 С.В4.016).

При "освајању" заварених подсклопова и склопова неопходно је спровести предложену процедуру. Дакле осим радионичких проба, неопходно је спровести и одговарајућа механичка и металографска 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.

Закључак

Тачкасто заваривање је водећа технологија спајања танких лимова у аутомобилској индустрији.

Принцип тачкастог заваривања заснива се на електричном отпору који се јавља проласком струје кроз предмете који се заварују што проузрокује загревање тих предмета. Загрејани материјал се притиска електродама одговарајућом силом притиска и на тај начин се остварује заварени спој. Основни параметри, поред пречника врха електроде који утичу на квалитет завареног споја су: време заваривања, струја заваривања и сила притиска између електрода. Ови параметри се морају опрезно бирати како би квалитет завареног споја био што бољи.

Могућност аутоматизације и роботизације тачкастог заваривања чини овај поступак погодним за масовну и великосеријску производњу. Применом овог поступка могуће је остварити велике брзине заваривања, продуктивност и рентабилност производних система.

После изведених метода контроле без разарања и са разарањем на експерименталним узорцима израђених од лимова дебљина: $s = 0.8 \text{ mm}$ и $s = 1.2 \text{ mm}$, који су најчешће примењивани лимови у изради каросерије аутомобила и позитивно добијених резултата испитивања, долази се до закључка да ови лимови задовољавају технолошке и функционалне захтеве и прописе, те да могу бити коришћени у серијској производњи.

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. О. Поповић, Р. Прокић Цветковић: *Поступци заваривања*, Машински факултет у Београду, Београд, 2016.
4. В. Лазић: *Испитивање тачкасто заварених спојева и оцена заварљивости површински заштићених лимова*, магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, јесен 1991.
5. Марина Вуковић: *Експериментална испитивања и нумеричка анализа тачкасто заварених спојева и конструкција*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
6. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, Н. Ратковић: *Машински материјали*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
7. http://www.motorauthority.com/news/1079397_new-welding-technique-should-lead-to-more-aluminum-in-gm-cars (приступљено: октобар, 2016.).
8. <http://www.spotweldingconsultants.com/unitrol-softtouch.html> (приступљено: октобар, 2016.).
9. <http://www.welding.com/articles/waarticle19.asp> (приступљено: октобар, 2016.).
10. http://www.robot-welding.com/spot_welding.htm (приступљено: октобар, 2016.).