

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Наука о заваривању

Број индекса: 443/2018

Маријана Њ. Ђурић

**Оцена квалитета лемљених спојева остварених
меким, тврдим и заваривачким лемљењем**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Вукић Лазих, ред. проф. – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

1. Објасни суштину лемљења и укаже на технолошки појам лемљивости,
2. Детаљније објасни поступке меког, тврдог и заваривачког лемљења,
3. Наведе и опише најважнија средства за лемљење,
4. Наведе најважније методе испитивања квалитета залемљених спојева,
5. Наведе најважније врсте залемљених спојева и
6. Експериментално, на примеру нискоугљеничног челика, упореди најважнија механичка својства лемљених спојева остварених различитим врстама лемова и топитеља са завареним спојем и основним материјалом.

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
2. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: *Технологија заваривања - приручник*, помоћни универзитетски уџбеник, друго допуњено и проширено издање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
3. М. Јовановић, В. Лазић: *Практикум гасног (ГПЗ) и аргонског (ТИГ) заваривања*, помоћни универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
4. А. Мајсторовић, М. Јовановић: *Основи заваривања, лемљења и лепљења*, Научна књига, Београд, 1991.
5. А. Седмак, В. Шијачки-Жеравчић, А. Милосављевић, В. Ђорђевић, М. Вукићевић: *Машински материјали – други део*, Машински факултет, Београд, 2000.

У Крагујевцу, 2021. године

Ментор:

Проф. др Вукић Лазић

Резиме

Лемљење спада у методе спајања металних и неметалних материјала у чврстом стању помоћу истопљеног додатног материјала-лема, чија је температура топљења знатно нижа од основног материјала. Чврст спој се остварује, пре свега, узајамном дифузијом између састојака истопљеног лема и чврстих загрејаних страница и у мањој мери адхезијом. Реч је о сложену начину спајања различитих материјала. Лемљењем је могуће спајати готово све врсте челика, сиви и темпер лив, обојене метале и њихове легуре, као и племените метале. Дели се на меко, тврдо и заваривачко лемљење. У зависности од врсте лемљења примењују се различити извори топлоте, додатни материјали и топителџи. После лемљења неопходна је контрола изведених спојева. У раду су изведена и експериментална испитивања затезањем специјално припремљених узорак из основног материјала, као и заварених и залемљених узорак. Све у циљу упоређивања најважнијих својстава отпорности и способности деформације материјала.

Кључне речи: лемљење, меко лемљење, тврдо лемљење, заваривачко лемљење, начини лемљења, контрола залемљених спојева.

Abstract

Brazing or soldering is one of the mostly used techniques for joining of metals and non-metals in solid conditions using molted filler metal-solder which melting temperature is significantly lower than melting temperature of base metal. Joint is made based on mutual difusion between particles of molten solder and solid but heated base material edges and also by adhesion. Soldering is one very complex process. By brazing it is possible to join almost all types of steel, gray and tempered cast iron, colored metals and its alloys, as well as noble metals. Brazing can be divided at: soft, hard and welding brazing. Depending of the type of solder the different heat sources and filler metals are used. After brazing inspection of brazed joints need to be done. The paper also performs experimental tensile tests of specially prepared samples from the base material, as well as welded and soldered samples. All in order to compare the most important properties of resistance and deformation ability of the material.

Key words: brazing, soft brazing, hard brazing, welding brazing, brazing methods, brazed joints inspection.

САДРЖАЈ:

1. Уводне напомене о лемљењу	1
1.1 Предности и мане лемљења	1
1.2 Основи лемљења	1
2. Меко лемљење	9
3. Тврдо лемљење	12
4. Начини лемљења и лемљење различитих метала и легура	14
4.1 Лемљење лемилицом	14
4.2 Гасно лемљење	15
4.3 Електроотпорско лемљење	17
4.4 Лемљење у пећима	19
4.5 Индукционо лемљење	20
4.6 Лемљење потапањем (лемљење у растопима)	21
4.7 Електролучно лемљење у заштити инертног гаса – МИГ лемљење	23
4.8 Лемљење различитих метала и легура	23
5. Заваривачко лемљење челика и ливеног гвожђа	27
6. Врсте лемљених спојева	29
7. Испитивање квалитета залемљених спојева	31
7.1 Грешке залемљених делова	31
7.2 Методе испитивања залемљених спојева	32
7.3 Преглед стандарда	35
7.4 Заштита на раду при лемљењу	36
8. Експериментална испитивања	37
8.1 Испитивање најважнијих механичких карактеристика	37
8.1.1 Основни материјал – нискоугљенични челик	37
8.1.2 Заварени спој - нискоугљенични челик	40
8.1.3 Лемљени спој - нискоугљенични челик/месинг	43
8.1.4 Лемљени спој - нискоугљенични челик/лем 1	46
8.1.5 Лемљени спој - нискоугљенични челик/лем 2	49
8.1.6 Коментар добијених експерименталних резултата	52

9. Закључак	55
10. Литература	57

1. Уводне напомене о лемљењу

1.1 Предности и мане лемљења

Лемљење је настарији начин спајања материјала у чврстом стању. Бронза и бакар су спајани лемљењем још 2500. година пре Христа. Примена започиње у индустријској производњи од половине двадесетог века, а посебан раст бележи са општим индустријским развојем, посебно електротехнике, електронике и рачунарске опреме.

Тако је данас лемљење широко примењено у космичкој и авионској техници, прецизној механици, електроници, производњи расхладних уређаја и климатизације, у индустрији широке потрошње, изради накита и тсл. Због економичности и погодности за аутоматизацију и механизацију, значајно је примењено у великосеријској и масовној производњи.

Уопштено узевши, предности лемљења као савременог техничко-технолошког поступка спајања материјала су:

1. Мала потрошња топлотне енергије;
2. Велика радна брзина, односно висока економичност и продуктивност производње;
3. Могућност аутоматизације и механизације;
4. Могућност спајања великог броја метала и њихових легура, у различитим међусобним комбинацијама метала, неметала, једноставних и сложених, танкозидних, као и дебелозидних радних предмета (делова);
5. Тачност и велика прецизност спајања;
6. Могућност истовременог лемљења и термичке обраде;
7. Ниски заостали унутрашњи напони и деформације, због релативно малог уноса топлоте и незнатних структурних промена основног материјала;
8. Лако попуњавање веома уских зазора у споју, посебно коришћењем ефекта капиларности;
9. Висока репродуктивност резултата лемљења и добре могућности контролисања квалитета споја;
10. Леп површински изглед споја.

Поред предности, лемљење има и одређене мане које ограничавају употребу. То се првенствено односи на механичке особине споја, које су обично знатно ниже од оних које се постижу спајањем заваривањем.

1.2 Основи лемљења

Лемљење је процес спајања метала у чврстом стању помоћу истопљеног додатног материјала-лема, чија је температура топљења знатно нижа него основног материјала. Чврст спој се остварује, пре свега, *узајамном дифузијом* између састојака истопљеног лема и чврстих загрејаних страница радних предмета, и у мањој мери *адхезијом*.

Лемљењем је могуће спајати све врсте угљеничних и легираних челика, сиви лив, темпер лив, нежелезне метале и њихове легуре као и племените метале¹.

У односу на заваривање, лемљење је јефтинији начин спајања, лакше га је изводити и може се применити за спајање веома танких лимова и жица. Структура и механичке особине основног метала се при лемљењу готово не мењају, јер је температура загревања релативно ниска. Из тог се разлога термички напони и деформације елемената могу занемарити.

Мана лемљења, у односу на заваривање, јесте мања чврстина лемљеног споја. Она у великој мери зависи од врсте лема, дифузионих процеса и температуре лемљења. И поред тога се лемљењем спаја велики број делова у аутомобилској и прехранбеној индустрији, термотехници, у електроници и електротехници, радио и телевизијској техници.

Суштина процеса лемљења објашњава се:

1. Квашењем метала истопљеним лемом; "квашење" наступа ако се танак слој течног лема не прекида, већ се равномерно разлива по површинама припремљеним за лемљење. Разливање настаје деловањем привлачних сила између течног лема и загрејаног основног материјала;
2. Капиларним силама које истопљени лем подижу, па он испуњава сваки зазор и прсину реда величине 0.012 до 0.05 mm;
3. Дифузијом растопљеног лема у основни материјал и делимичном ерозијом основног материјала.

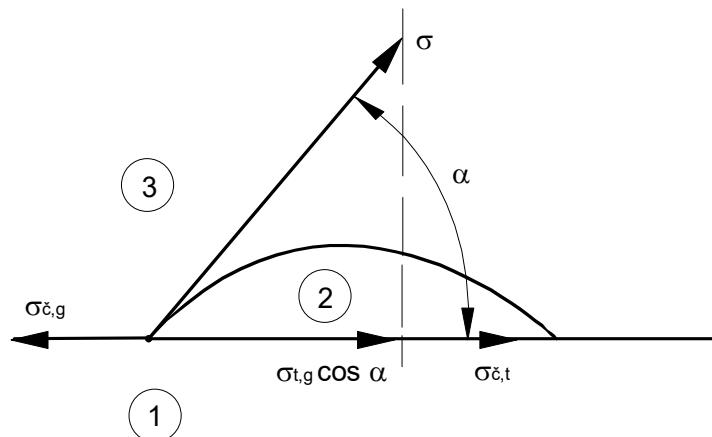
Укратко ћемо се осврнути на разлике при формирању заварених и лемљених спојева. Ако се при заваривању бокови жлеба не претопе настаје најопаснија грешка-непровар. С друге стране, код лемљених спојева поставља се само захтев да температура на спајаним површинама буде нешто виша од растопљеног лема; у противном добија се "сув спој". На образовање лемљених спојева пресудан утицај имају површинске силе које делују између граничних површина чврстих тела, растопа, лема и топитеља. У те силе спадају: *површинска енергија чврстих тела* и *површински напон течности*. Површинска енергија представља рад извршен за раздвајање две кристалографске равни. Тај напон је бројчано једнак површинској енергији, с тим што се изражава у јединицама - сила по јединици дужине (N/m). Површинска енергија метала у чврстом стању је релативно велика, а опада са порастом температуре. На пример, ако је површина течности конвексна на њу делује унутрашњи напон који слободној капљици даје облик куглице. На чврстој равној површини између "седеће капљице" и подлоге (сл. 1.1) делују следећи површински напони:

$\sigma_{\zeta,t}$ - напон на граници чврстог метала и течности;

$\sigma_{t,g}$ - напон на граници течног лема и гасова;

$\sigma_{\zeta,g}$ - напон на граници оквашене подлоге и гасова.

¹ Племенити метали - збирно име за сребро, злато и платину.



1- Радни предмет, 2- Капљица лема, 3- Топитељ

Слика 1.1 Расподела граничних површинских напона лема

Без обзира на то што је поједине компоненте површинског напона тешко рачунски одредити, нарочито $\sigma_{\check{t},t}$ и $\sigma_{\check{t},g}$, ипак се може поћи од равнотежних услова:

$$\sigma_{\check{t},g} = \sigma_{\check{t},t} + \sigma_{t,g} \cdot \cos \alpha \text{ и}$$

$$\sigma_{t,g} \cdot \cos \alpha = \sigma_{\check{t},g} - \sigma_{\check{t},t},$$

одакле произлазе: (1)- идеално квашење и (2)- задовољавајуће квашење.

Идеално квашење настаје за $\alpha = 0$, тј. за:

$$\sigma_{\check{t},g} = \sigma_{\check{t},t} + \sigma_{t,g},$$

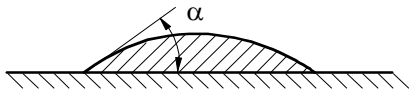
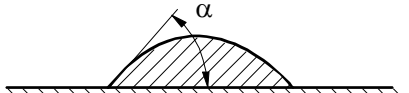
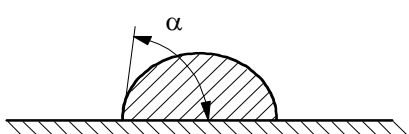
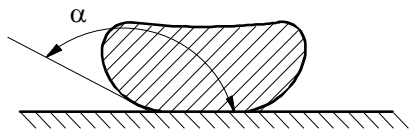
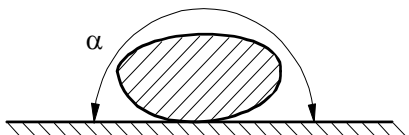
при чему се лем потпуно разлива по површини лемљених предмета.

Практичним условима квашење се оцењује као задовољавајуће ако је:

$$\frac{\sigma_{\check{t},g} - \sigma_{\check{t},t}}{\sigma_{t,g}} > 0.766,,$$

што одговара углу квашења $\alpha < 40^\circ$. Даљом анализом може се закључити да квашење потпуно изостаје када је $\alpha = \pi/2$ или $\sigma_{\check{t},g} = \sigma_{\check{t},t}$, а за $\alpha = 2\pi$ растопљени лем се нагомилава на подлози у облику куглице. Углови квашења и схематски приказ квашења дати су у табели 1.1.

Таблица 1.1 Квашење основног материјала растопљеним лемом

Квашење	Додирни угао, α , °	Схема квашења
Потпуно	0-15	
Добро	15-75	
Делимично	75-90	
Рђаво	91-179	
Нема квашења	180	

4. Висина подизања у капиларној цевчици при лемљењу потапањем (сл. 1.2b), дата је изразом:

$$h = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{d \cdot \rho \cdot g},$$

а висина капиларног подизања између два паралелне и блиске плоче (сл. 1.2c):

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{l \cdot \rho \cdot g},$$

где су: σ - површински напон течног лема, α - угао квашења, d - пречник капиларне цевчице, ρ - густина течног лема, g - убрзање силе земљине теже и l - капиларни зазор између плоча.

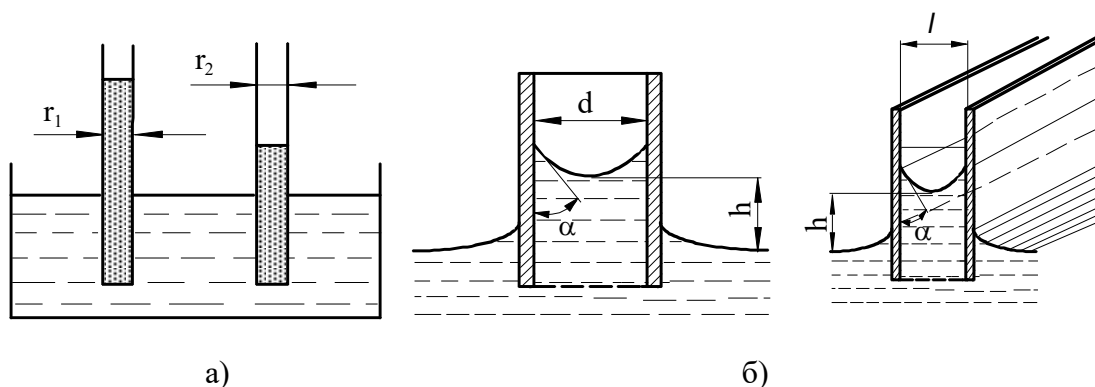
Површински напон зависи одврсте лема и температуре према формули:

$$\sigma = a + b(T - T_t), N/m,$$

где је T - температура лема, а T_t - тачка топљења основног метала.

Наводимо као пример потребне податке за прорачун σ неколико техничких метала:

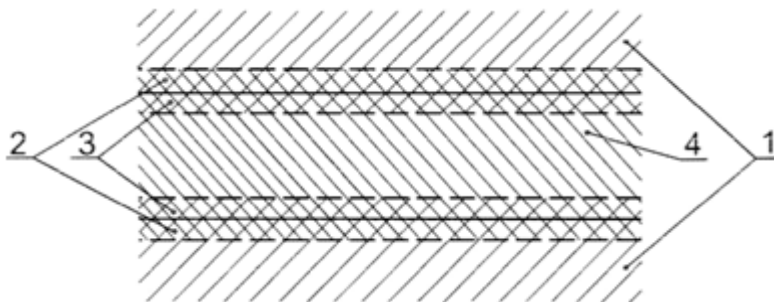
Метал	$a, N/m$	$b \cdot (T - T_1)$
Алуминијум	0.890	$-1.82 \cdot 10^{-4}(T - 660)$
Бакар	1.374	$-2.60 \cdot 10^{-4}(T - 1085)$
Злато	1.162	$-1.80 \cdot 10^{-4}(T - 1065)$
Индијум	0.561	$-9.50 \cdot 10^{-4}(T - 157)$
Гвожђе	1.909	$-5.20 \cdot 10^{-4}(T - 1530)$
Олово	0.471	$-1.56 \cdot 10^{-4}(T - 327)$
Сребро	0.955	$-3.10 \cdot 10^{-4}(T - 660)$
Калај	0.586	$-1.82 \cdot 10^{-4}(T - 900)$



Слика 1.2 Појава капиларности у цевима и зазорима

- Брзина и дубина дифузије растопљеног лема у основни метал зависе од температуре лемљења, времена трајања процеса, металне чистоће површина, термичке проводности основног материјала и разлике у величинама атома основног метала и компонената лема.

Кинетику дифузионих процеса описују Фикови закони, а захваљујући дифузији образују се чврсти раствори или интерметална једињења која повезују основни метал и лем; јачина везе зависи од хемијских елемената система основни материјал-лем и њихове међусобне растворљивости. На слици 1.3 схематски је приказан лемљен спој који се састоји из основног материјала (1), зоне дифузије састојака лема у основни метал (2), зоне лема и измешаних састојака основног метала (3) и чистог лема (4).

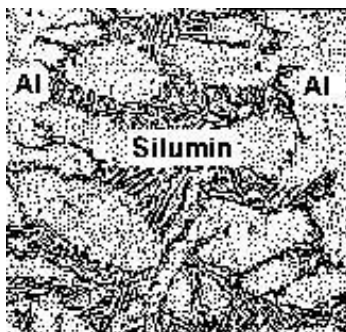


Слика 1.3 Грађа лемљеног споја

У зависности од врсте грејања, течни лем и основни материјал су одређено време (неколико секунди до неколико минута) у контакту, у коме су испуњени услови за настанак металуршких процеса између течне и чврсте фазе, преко којих се остварује веза између лема и основног материјала. Кинетика ових процеса је одређена саставом лема и основног материјала, разликом у њиховој температури топљења, дужином процеса лемљења, и као најважније, карактером дијаграма стања система елемената који улазе у састав лема и основног материјала. Углавном преовладава један од четири процеса:

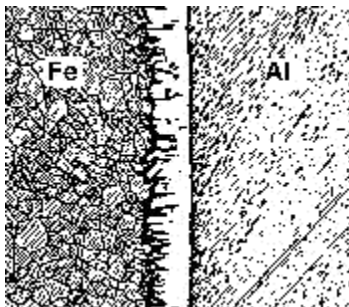
1. Растварање основног материјала у растопљеном лему са образовањем течног растопа;
2. Дифузија елемената из лема у основни материјал и обратно, са образовањем чврстих раствора;
3. Хемијске реакције на граници између лема и основног материјала и образовањем интерметалних једињења;
4. Формирање адхезионих веза.

Ако се процес растварања основног материјала у растопљеном лему одвија брзо, лем се постепено засићује елементима из основног материјала. Као резултат хемијске реакције са елементима који улазе у састав лема може да се образује чврста фаза тешко топљивих једињења, која се при хлађењу споја издвајају на граници лема и основног материјала (сл. 1.4). Састав ове фазе је одређен врстом дијаграма стања, а зависи од температуре лемљења и степена засићења лема металима из основног материјала. Ако се познаје одговарајући дијаграм стања узајамно утицајних метала и температура на којој је настало засићење лема, онда је могуће предвидети састав фаза (правилном полуге) које ће се издвојити при кристализацији.



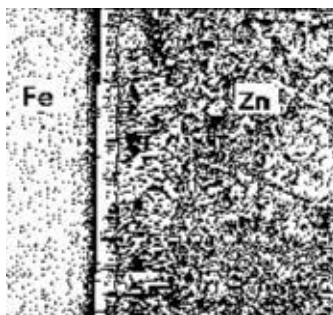
Слика 1.4 Чврст раствор основног материјала у лему

Када су неки елементи који улазе у састав лема добро растворљиви у основном материјалу, тада при лемљењу обично преовладава процес дифузије тих састојака, који из лема дифундују у основни материјал. Непосредно испод контактне површине са лемом у основном материјалу настаје зона њиховог чврстог раствора са основним материјалом (сл. 1.5). Дебљина зоне чврстог раствора лема и основног материјала одређена је Фиковим законом дифузије. Састав тог чврстог раствора ће бити најприближнији дијаграму стања основног материјала.



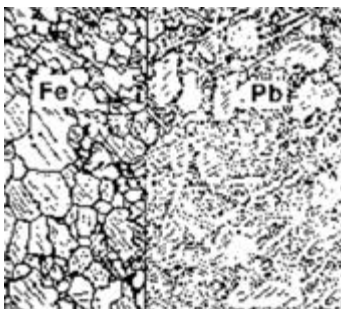
Слика 1.5 Дифузија састојака лема у основни материјал

Ако елементи који улазе у састав лема и основног материјала могу међусобно да образују интерметална једињења, на граници раздвајања лем - основни материјал настаће хемијске реакције и издвајање интерметалних једињења (сл. 1.6). Према карактеру дијаграма стања ових елемената могуће је одредити састав фазе која се прво образује. Образована интерметална једињења су веома крта и при одређеним условима напрезања могу да изазову разарање образоване везе.



Слика 1.6 Хемијска једињења на граници лема

Чврста веза основног материјала и лема је могућа и без образовања било каквих прелазних зона. На граници раздвајања лем - основни материјал нема ни дифузије ни раствора (сл. 1.7), а ипак је чврстоћа везе довољно висока. У том случају веза се обезбеђује узајамним деловањем атома и исте је природе, као и веза на граници између кристала у додиру поликристалног метала. Настанак овакве везе је код тзв. адхезионог лемљења, код којег избором компоненти система не долази до узајамне растворљивости лема и основног материјала (нпр. Pb-Fe, Pb-Cu, Ag-Cr), а у примени је када се захтева непромењен хемијски састав елемената споја, због одређених особина, као што је нпр. електрична проводљивост, док је чврстоћа на смицање споја мање значајна.



Слика 1.7 Лемљени спој без прелазне дифузионе зоне

Квалитет, односно чврстоћа везе између лема и основног материјала увелико зависи од металуршког карактера образоване везе.

Технолошки редослед операција при лемљењу је следећи:

1. Чишћење и одмашћивање радних површина,
2. Постављање радних предмета у крајњи положај и њихово фиксирање и
3. Наношење топителја и загревање основног материјала до изнад температуре топљења лема, а затим следи уношење лема.

Разликују се три врсте лемљења:

1. Меко, $T_{t,lema} < 450^{\circ}C$,
2. Тврдо, $T_{t,lema} > 450^{\circ}C$ и
3. Заваривачко, $T_{t,lema} \approx 900^{\circ}C$.

2. Меко лемљење

Меко лемљење се првенствено користи за спојеве од којих се захтева херметичност, као и добра електрична и термичка проводљивост. Ако се захтева и јачина споја (нпр.цевни проводници), онда се она обезбеђује одговарајућим конструкционим решењем самог споја.

Код монтажних спојева од којих се захтева само електрична проводљивост, користи се лемљење лемилицом и другим алатима. Загревање места спајања је путем контакта загрејаног радног дела алата и места спајања. У ту сврху, зависно од врсте производа који се леме, постоји низ конструкција средстава за загревање, прилагођених месту лемљења и енергетском извору за загревање. Најшире је заступљено ручно лемљење лемилицом код којег се радним делом (врхом) преноси не само топлота, већ и растопљен лем. Најчешће загревање је електричном струјом, са радним делом од бакра. Величина, односно тежина лемилице зависи од масе места лемљења. За електромонтажне радове израђују се мале електричне лемилице величине оловке.

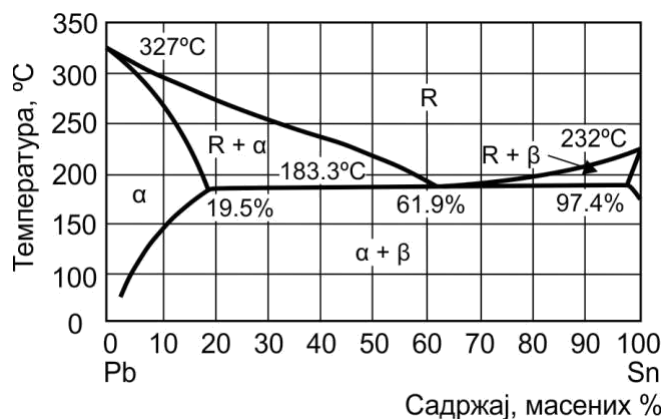
Поред већ поменутог назива *меки* и *тврди* лемови, често се каже и *лакотопљиви* лемови ($T_t < 450^\circ\text{C}$) и *тешкотопљиви* лемови ($T_t > 450^\circ\text{C}$).

Меки лемови су легуре метала ниске тачке топљења, најчешће калаја (Sn) (231.9°C)² и олова (Pb) (327.4°C) са малим додатком антимона (Sb) (630.7°C). У пракси се највише користе лемови односа Sn/Pb=35/65, 40/60 и 50/50, јер имају најбоље квашење и механичке особине. Олово-калајни лемови се још користе, али мање него раније, јер су веома токсични па не долазе у обзир за водоводне цеви и судове за храну. За водоводне цеви пијаће воде, за хладњаке аутомобила и кућне расхладне уређаје показао се као најбољи меки лем Sn-Sb; садржај антимона износи 0.50-2.0% што спречава нагли пад јачине лема при хлађењу кад настаје крта фаза β -Sn. Уопштено узев, легуре за меко лемљење могу бити: Sn-Pb-Sb, Sn-Ag, Sn-Ag-Pb, Sn-Zn, Cd-Ag, Cd-Zn, Zn-Al и Sn-Pb-In. Већина од ових лемова садржи елементе чија су испарења штетна по здравље, па је неопходно интензивно проветравање радног места и мере личне заштите.

Од горе наведених лемова, карактеристичан је индијумски лем (50% Sn-50% In) по томе што се адхезионо везује за стакло, те се користи за лемљење стакла са стаклом или стакла са металима, по уобичајеној процедури.

Ипак се и данас за меко лемљење највише користе калајнооловне легуре чији је фазни дијаграм приказан на слици 2.1.

² У загради је дата температура топљења.



Слика 2.1 Фазни дијаграм калај-олово

Легуре за меко лемљење могу да садрже још бизмут (Bi) (271°C), кадмијум (Cd) (321°C), цинк (Zn) (420°C). Код меких нискотопљивих лемова, бизмут је главна компонента која доприноси снижавању температуре топљења. На пример, легура позната као Вудов-метал, састоји се од бизмута (Bi) (50%), олова (Pb) (25%), калаја (Sn) (12.5%) и кадмијума (Cd) (12.5%), и има температуру топљења свега 60.5°C. Ови лемови користе се за израду аутоматских противпожарних уређаја, који се сами активирају топљењем лема кад год спољашња температура надмаши критичну вредност.

Легуре за меко лемљење испоручују се у облику пуних и пуњених жица, трака и фолија, као и ливених шипки и паста према ознакама у стандардима SRPS C.E1.041:1988 и SRPS C.L9.030:1986.

Што се тиче топитеља, основна им је улога да растворе оксидне скраме и контаминате са радних површина и да те површине заштити од поновне оксидације у току лемљења. Неки топитељи снижавају површински напон лема и тиме побољшавају квашење и капиларно подизање лема у зазорима.

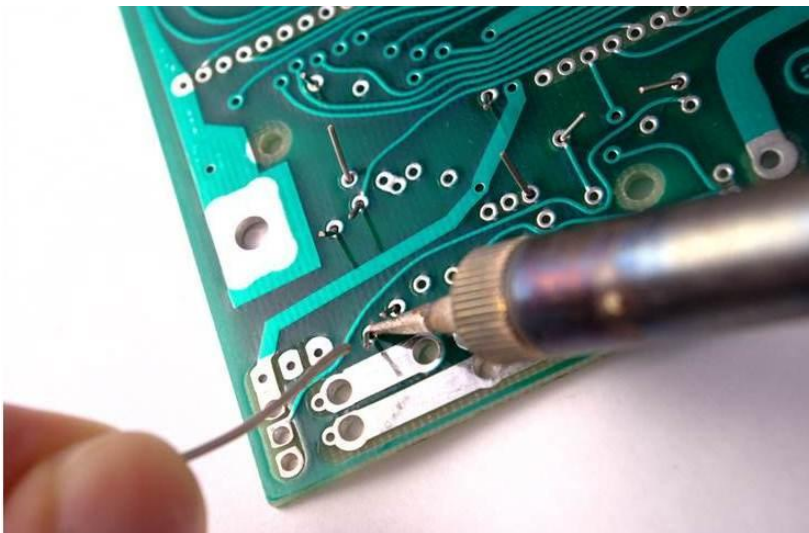
Топитељи се на тржишту продају у чврстом, течном или гасовитом стању; у току лемљења, кад ступе у активно деловање они прелазе у гасовито стање. Сви топитељи имају мању густину од течног лема што омогућава да испливавају на површину растопа да му повећају течљивост. Будући да се топитељи топе пре лема (за 20-40°C), они чисте радне површине непосредно пре лемљења.

Према пореклу топитељи могу бити: органски, неоргански и биљне смоле.

За меко лемљење се углавном употребљавају следећи топитељи: сона киселина - HCl, цинкхлорид-ZnCl₂, или мешавина цинкхлорида са амонијумхлоридом (нишадором) - NH₄Cl. Примењује се и течност позната под називом "вода за лемљење", што је у ствари раствор цинкхлорида у води. Практично се добија растварањем опиљака цинка у соној киселини са малим додацима воде. Употребљава се и топитељ у виду пасте састављене од ZnCl₂ (14%), NH₄Cl (1%), H₂O (8%) и вазелина (77%).

Одмах после лемљења одстрањују се остаци топитеља, сем ако се не користи органски топитељ-колофонијум³.

На слици 2.2 дат пример примене меког лемљења при изради електронских компоненти, а на слици 2.3 изглед меког лемљења различитих позиција.



Слика 2.2 Фотографски приказ меког лемљења



Слика 2.3 Меко лемљење различитих позиција

³ Колофонијум – хемијски реактивна биљна смола која се добија приликом прераде четинарских терпентина, издвојених при дестилацији четинара.

3. Тврдо лемљење

Тврдо лемљење или понекад названо и високотемпературско лемљење (температура топљења већа од 450°C) се примењује за спојеве од којих се превасходно захтева повећана јачина, која је у већини случајева блиска јачини (чврстоћи) основног материјала. Постизање захтеване јачине зависи од конструкције споја, примењеног метода лемљења и врсте лема.

Пре тврдог лемљења, металне површине треба очистити механички или хемијским средствима. Долазе у обзир машинска обрада, пескарење или жичане четке од нерђајућих челика, а хемијска средства бирају се према основном материјалу: за бакар и његове легуре – трихлоретилен; за Al – механичко стругање или одмашћивачи – алкални раствори за уклањање масти и уља; за нерђајуће челике препоручује се механичко чишћење. После третмана хемикалијама, потребно је опрати радне предмете.

За *тврдо лемљење* као додатни материјали (лемови) употребљавају се чист бакар (Cu), легуре бакра и цинка (Cu-Zn), бакра и никла (Cu-Ni) и бакра са сребром (Cu-Ag). Чист бакар Cu (1083°C) користи се највише при лемљењу челичних делова у пећима са заштитном атмосфером. Легуре бакар-цинк (месинг) највише се употребљавају за тврдо лемљење и тзв. заваривачко лемљење. Најнижу температуру топљења ($850\text{--}900^{\circ}\text{C}$) имају легуре са 36-54% Cu , које су веома крте, јер садрже велики проценат цинка; стога се оне не употребљавају за спојеве изложене ударима, савијању и вибрацији. Кад се од лемљеног споја тражи велика чврстина, препоручује се лем од легура бакра и цинка са додацима калаја (Sn), силицијума (Si), никла (Ni) и мангана (Mn).

Од сребрних лемова највише је у употреби еутектичка легура са 28.5% Cu и остатком сребра. Понекад се израђују сребрни лемови са додацима Ni , Mn , Cd и Sn који му снижавају температуру топљења.

У тврде лемове убраја се и мешавина праха: феро-легура, челика, сивог лива и бакра са топитељима. Употребљавају се за спајање резних плочица од брзорезног челика или тврдих метала на радне делове алата за обраду резањем (стругарских ножева, глодала).

Легуре за тврдо лемљење имају затезну јачину блиску јачини основног материјала, а температура топљења им је $600\text{--}1000^{\circ}\text{C}$. Према стандардима SRPS C.D2.306:1994 и SRPS C.D2.307:1958 израђују се у облику гранула, трака и жица.

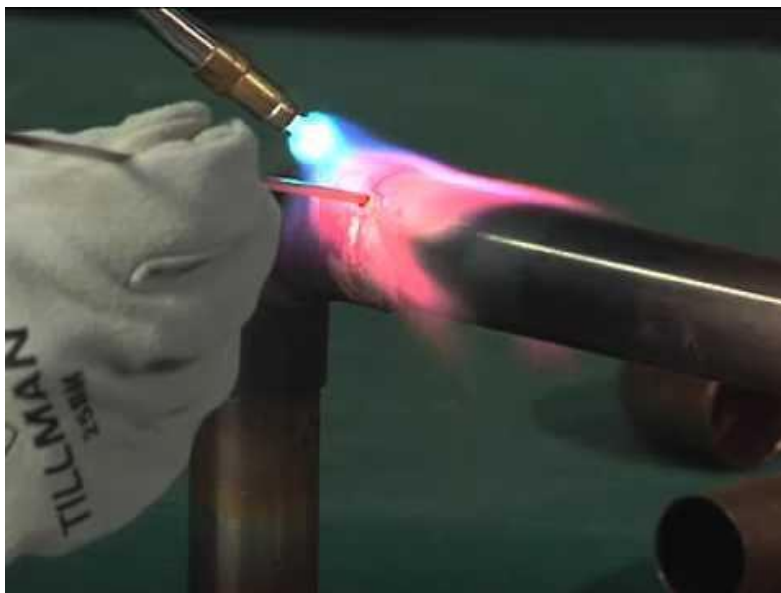
Као што је напред споменуто, и код тврдог лемљења основа улога топитеља је да растворе оксидне скраме и контаминате са радних површина и да те површине заштити од поновне оксидације у току лемљења. Топитељи снижавају површински напон лема и тиме побољшавају квашење и капиларно подизање лема у зазорима. Тешко топљиве оксиде растварају и преводе на површину лемљеног споја, који се затим механички уклањају.

Топитељи се и за тврдо лемљење на тржишту испоручују у чврстом, течном или гасовитом стању; у току лемљења, кад ступе у активно деловање они прелазе у гасовито стање. Сви топитељи имају мању густину од течног лема што омогућава да испливавају на површину растопа да му повећају течљивост. Будући да се топитељи топе пре лема (за $20\text{--}40^{\circ}\text{C}$), они чисте радне површине непосредно пре лемљења.

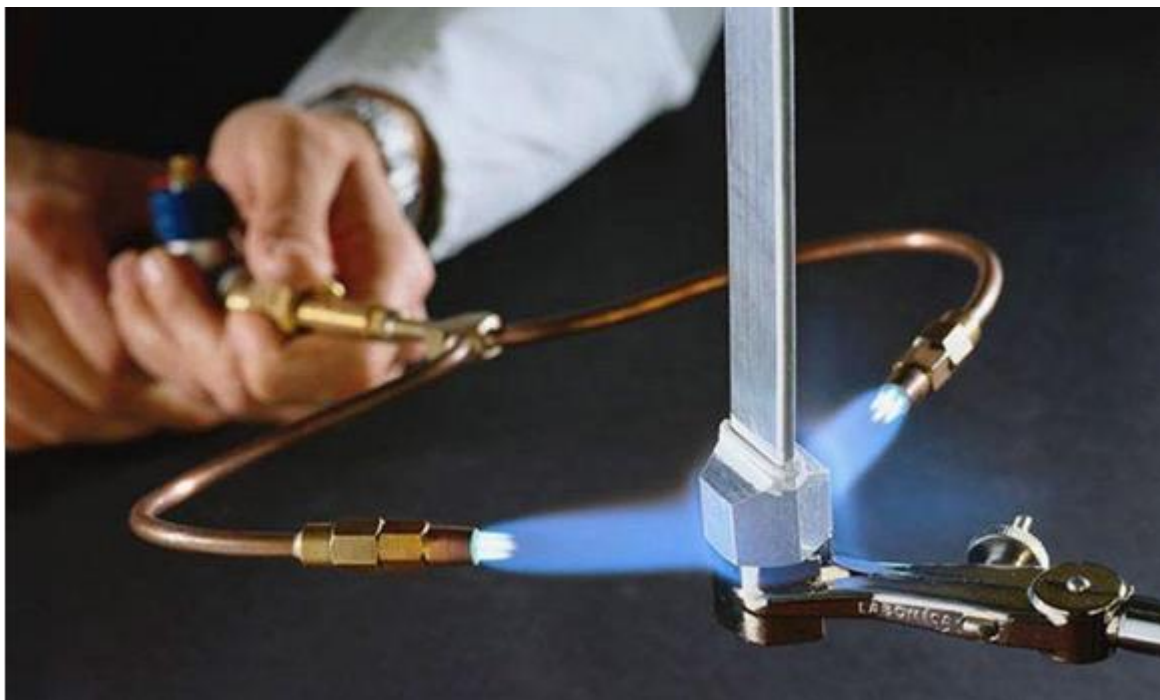
За тврдо лемљење топителѝ су углавном *неорганског* порекла.

Топителѝ за тврдо лемљење углавном су натријумтетраборат (боракс) - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, борна киселина - H_3BO_3 или њихова мешавина. Примењују се при лемљењу бакра и његове легуре или нискоугљеничних челика месинганим жицама. За лемљење сивог лива, топителѝ је Na_2CO_3 , а за Al и легуре Al смеша KCl , LiCl и ZnCl .

На сликама 3.1 и 3.2 приказани су примери тврдог лемљења.



Слика 3.1 Тврдо лемљење бакарних цеви



Слика 3.2 Тврдо лемљење различитих делова

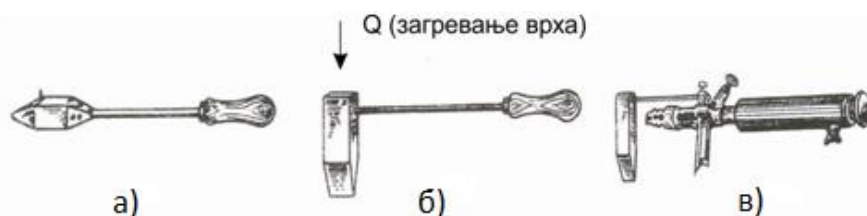
4. Начини лемљења и лемљење различитих метала и легура

У зависности од облика и величине радних предмета, начина производње (појединачна, серијска, масовна), врсте основног материјала и других захтева, разликују се следећи начини лемљења:

1. Лемљење лемилицом;
2. Гасно-пламено (заваривачко) лемљење;
3. Електроотпорско лемљење;
4. Лемљење у пећима;
5. Индукционо лемљење;
6. Лемљење потапањем;
7. МИГ лемљење и др.

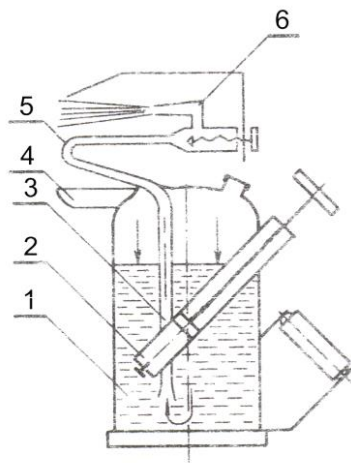
4.1 Лемљење лемилицом

Најстарији и најједноставнији начин лемљења је помоћу лемилице уз примену додатног материјала и топитеља. Лемилице (сл. 4.1) се састоје из врха (радног дела), челичне шипке и дрвене дршке. На радном врху лемилице, израђеном од кованог бакра или шиљате бакарне шипке, акумулира се довољна количина топлоте за загревање основног материјала и топљење лема. Маса радног дела може бити од 0.1-1 kg, што зависи од намене лемилице, тј. величине делова које треба лемити и основног материјала. Радни врх се може загревати на више начина: течним горивом, гасним пламеном и ужареним ћумуром. Топлота за загревање врха лемилице доводи се са супротне стране од клинасте радне површине (сл. 4.1б).



Слика 4.1 Лемилице: обичне (а, б) и бензинске (в)

Лампа за лемљење (сл. 4.2) је направа подобна за сагоревање више течних горива као што су нафта, бензин, шпиритус. Главни делови ове лампе су: резервоар (1) и млазница (6). Под дејством ваздушног натпритиска, оствареног ручном ваздушном пумпом (2), течено гориво се потискује кроз испаривач (5) до млазнице (6). Пре употребе лампе, испаривач треба загрејати шпиритусом из кадице (4). У испаривачу (5), загрејано течено гориво прелази у гасовито стање, истиче кроз млазницу (6) и сагорева на мирном ваздуху стварајући пламен велике топлотне моћи.



Слика 4.2 Лампа за лемљење



Слика 4.3 Електрична лемилица

За лемљење ситнијих делова меких лемовима примењују се лемилице са сопственим извором топлоте, познате под називом електричне лемилице (сл. 4.3). Услов да лем добро кваси врх лемилице и да се на њему задржи, јесте да се врх, пре сваке употребе, очисти до металног сјаја. Пре и повремено у току лемљења, пожељно је да се врх лемилице повлачи преко тзв. камена за лемљење (нишадор- NH_4Cl), ради чишћења и заштите од оксидације. После употребе нишадора капице лема се лакше задржавају на врху лемилице. Загрејан и калајем премазан врх лемилице води се дуж линије спајања, при чему се топи врх додатне жице која се повремено умаче у топитељ. Топитељ чисти радне површине, што поспешује разливање течног лема које се побољшава ако се радне површине претходно загреју нешто изнад тачке топљења лема.

4.2 Гасно лемљење

Код поступака гасног лемљења додатни материјал се топи пламеном усмереним на спој и његову околину. Гасно се леме: угљенични, нисколегирани и нерђајући челици, сиви лив, легуре алуминијума, бакар и његове легуре и легуре магнезијума. Гасно лемљење може бити ручно, делимично механизовано или потпуно механизовано.

Ручно гасно лемљење се примењује при појединачној изради разних склопова и кад су величина, положај и облик споја такви да је немогуће лемљење другим методима.

Гориви гасови за гасно лемљење углавном су ацетилен, природан гас и пропан, а само изузетно водоник, бутан и градски гас. Ови гасови могу сагоревати у технички чистом кисеонику, или у компримованом ваздуху ако то потребна температура и брзина сагоревања допуштају.

Техника гасног лемљења не разликује се битније од окси-ацетиленског заваривања. Као додатни материјал за лемљење челика употребљава се легура бакра и цинка (месинг), а ређе сребрни лем. Затезна јачина лемљених спојева изведених месинганим додатним материјалима достиже јачину нискоугљеничног челика. Међусобно растојање (ззор) делова који се леме, при температури лемљења, подешава се на 0.05-0.15 *mm*, што произлази из услова за капиларно течење лема. Овај ззор је мањи од онога који се припрема на собној температури, будући да се радни предмети шире при загревању па се

ззор повећава. Истопљени лем не може да "кваси" нечисте површине, нити ће се за њих везивати. Због тога би требало површине очистити од прашине, уља, масти, рђе и боје и потом премазати топитељем, који се може нанети у виду праха, пасте или течности, а понекад и у облику мешавине сачињене од лема и топитеља. Поред површина основног материјала, неопходно је од оксидације заштитити и додатни материјал. То се постиже његовим повременим умакањем у топитељ или претходним наношењем топитеља на додатни материјал. На додатном материјалу мора се пре лемљења загрејати топитељ да би се омогућило правилно течење лема. У супротном, неке површине ће се оксидисати, па се не добија правилна лемљена веза, иако визуелно изгледа као да је спој успешно изведен. По правилу, истопљени лем обилази око површина незаштићених топитељем, па се на крају појављују порозна места у споју.

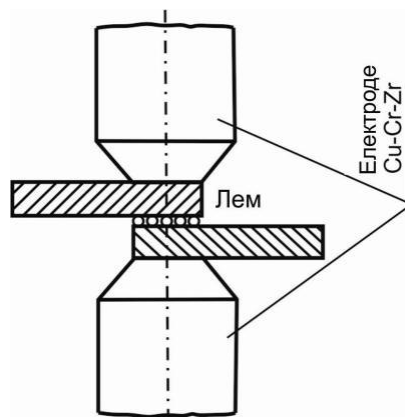
Пламен за загревање челичних делова до температуре лемљења подешава се на благо редукујући или неутралан. Да се спречи прегревање и делимично топљење страница основног материјала, врх пламеника се не сме сувише приближити радној површини. Другим речима, зона лемљења се загрева спољашњим омотачем пламена. Локално прегревање се може избећи равномерним загревањем обе странице радног предмета. У неким случајевима, када је маса једног дела споја знатно већа од масе од другог, пожељно је загревати само масивнији део, а други део споја се загрева кондукцијом. Слично се поступа и при лемљењу челичног предмета са металом који има већу топлотну проводљивост, с тим што се пламеном загрева само метал веће топлотне проводљивости, а челик само кондукцијом.

Будући да сви топитељи имају нижу температуру топљења него додатни материјал, то њихово топљење указује на то да ће температура лемљења ускоро бити достигнута. Капиларно разливање и лемљење биће непотпуно, ако се само истопи лем, а зона споја не достигне температуру лемљења. У том случају, уместо разливања, додатни материјал се у виду капљица нагомилава на радним површинама. Погрешно је у том случају даље загревати лем, јер ће се изменити његов хемијски састав. Овај неправилан поступак један је од најчешћих узрока грешака при лемљењу. Осим тога, прекомерно загревање додатног материјала на бази легура бакар-цинк штетно је за здравље због појачаних цинканих испарења. Стога је једино исправно пламеном загревати основни материјал, а помоћу топлоте у њему акумулиране, топити додатни материјал.

Додатни материјал за гасно лемљење може бити у облику шипки, жица, трака или у виду праха. Веома се често бркају гасно и заваривачко лемљење. Истина, опрема и неки додатни материјали су исти, а у неким случајевима чак и горионик, што при непознавању суштине процеса наводи на грешку. Суштинска разлика између ових поступака је у припреми места спајања; код лемљења се радне површине чисте и остављају мали зазори да би настало капиларно подизање; код заваривачког лемљења израђују се В или Х-жлебови, локално се загревају испод солидуса, па се жлебови попуњавају месинганим додатним материјалом претопљеним у пламену.

4.3 Електроотпорско лемљење

При електроотпорском лемљењу, основни материјал се локално загрева, а претходно је између преклопљених лимова уметнут лем који се топи захваљујући Џуловом ефекту ($R \cdot I^2$) (сл. 4.4). Уређаји за лемљење исти су као и за електроотпорско тачкасто заваривање, тим што је струја знатно мање јачине, с обзиром на то да се лем топи при око 50% нижој температури него челични лимови. Слично као и при тачкастом заваривању, радни предмети се преклапају и притискају између електрода, а затим се пропушта електрична струја, па долази до топљења лема, који се дејством капиларних сила распоређује у споју. Ако се користе ручна покретна клешта, могуће је лемити и масивне делове, као и елементе склопова који су неприступачни за непокретне заваривачке апарате. Примењује се најчешће додатни материјал, тј. лем температуре топљења 600-815°C.



Слика 4.4 Електроотпорско лемљење

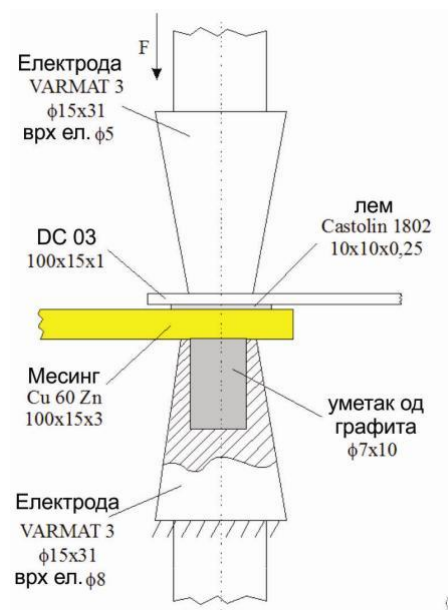
Основни материјал који се најчешће спаја отпорским лемљењем је бакар. Примењују се бакарне електроде са молибденским уметком на врху, или пак угљене електроде, јер се тиме добија већи електрични отпор него код чисто бакарних електрода, па се спречава топљење основног материјала. На овај начин се бакар може лемити без топитеља; други начин је употреба лема бакар-фосфор (4-9% P, остало Cu). Основни материјали погодни за отпорско лемљење су легуре бакра: бакар-хром, бронзе и оловне бронзе. Електроотпорским лемљењем могу се успешно спајати и предмети од нискоугљеничног челика, док се само изузетно спајају делови од нерђајућег челика, легура никла и легура алуминијума. За лемљење челика користи се сребрни лем у виду фолија. При лемљењу су неопходни топитељи који разлажу створене оксиде, спречавају даљу оксидацију, потпомажу квашење и тиме поспешују деловање капиларних сила. Поред већ познате улоге топитеља, они при отпорском лемљењу још имају и задатак да затворе струјно коло између доње и горње електроде; већина сувих топитеља нису електрични проводници, па је неопходно да се пре лемљења растворе у води да то постану.

На слици 4.5 приказана је тачкасти апарат за заваривање на коме је изведено електроотпорско лемљење, а на слици 4.6 принципска схема електроотпорског тачкастог лемљења применом различитих електрода. Реч је о спајању нискоугљеничног челика и месинга применом специјалног додатног материјала ("сребрног" лема) у облику фолије премазаног одговарајућим топитељом. На слици 4.7 приказани су различити облици

коришћених електрода, а на слици 4.8 металографски избрусак припремљен за металографска испитивања.



Слика 4.5 Уређај за тачкасто заваривање ТА-60



Слика 4.6 Принциуска шема лемљења



Слика 4.7 Различити облици коришћених електрода: 1 - бакарна електрода са графитним уметком, 2 - електрода од челика Š6880, 3 и 4 - бакарне електроде са уметцима од волфрама, 5 - бакарни носач доње електроде



Слика 4.8 Избрусци за металографска испитивања – остварени различитим режимима лемљења

4.4 Лемљење у пећима

У масовној производњи ситних склопова користи се лемљење у пећима. Практично се изводи тако што се чврсти лем поставља на место спајања пре лемљења и задржава тај положај у току процеса. За лемљење предмета од угљеничних челика употребљавају се лемови на бази бакра, и ређе, сребрни лем. Пећи имају заштитну атмосферу која челичне предмете штити од оксидације и разугљеничења у току лемљења и хлађења. Одговарајућа заштитна атмосфера омогућава добро "квашење" радних површина па нису потребни топитељи.

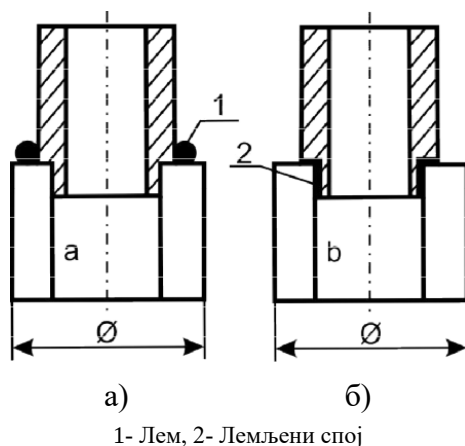
Челични предмети за лемљење у стандардним пећима морају бити лакши од 2 kg; за делове веће масе су неопходне посебне пећи што би било прескупо. Већина челичних склопова леми се при температури 1100-1150°C што је нешто изнад температуре топљења бакарних лемова. Међу челичним деловима који се најчешће спајају лемљењем у пећима, углавном су предмети добијени дубоким извлачењем, ковањем или ливењем.

Технологија лемљења у пећима обухвата: чишћење делова, позиционирање и учвршћивање, лемљење и хлађење. Чишћењем се одстрањује уље употребљено при претходној машинској обради; најефикасније се то постиже ацетоном, бензином или трихлоретиленом. Сам процес лемљења започиње у тренутку кад температура у пећи надвиси температуру топљења лема. Истопљени лем почиње да "кваси" површине припремљене за спајање и да се разлива продирући у спој дејством капиларних сила.

Истопљени лем продире у загрејани основни материјал па се образује легура типа чврстог раствора и тако формира лемљени спој. Време загревања потребно за остваривање чврстог споја износи 10-15 мин. После тога се склоп пребацује у комору за хлађење која има исту заштитну атмосферу као и комора за загревање. Делови се хладе у пећи до температуре од приближно 150°C, а потом се ваде и даље хладе на ваздуху.

Заштитни гас у пећи мора бити незапаљив, а то је смеша: метана (CH_4), водоника (H_2), угљен-монооксида (CO), угљен-диоксида (CO_2) и азота (N_2). Пећи се могу загревати гасним пламеном или електричним грејачима.

На слици 4.9 приказан је пример цеви које се леме у пећи уз помоћ прстенастог бакарног лема. У идеалним условима лем (1) се топи и под дејством капиларних сила кваси површине које се леме и (2) потпуно испуњава кружни зазор. Практично се може догодити да се растопљени лем слива и низ унутрашње зидове веће цеви (види слику 4.9). Оне морају остати чисте па се зато премазују магнезијумовим млеком или воденим раствором хромне киселине ($\text{H}_2[\text{CrO}_4]$).



Слика 4.9 Склон пре лемљења (а) и после лемљења (б)

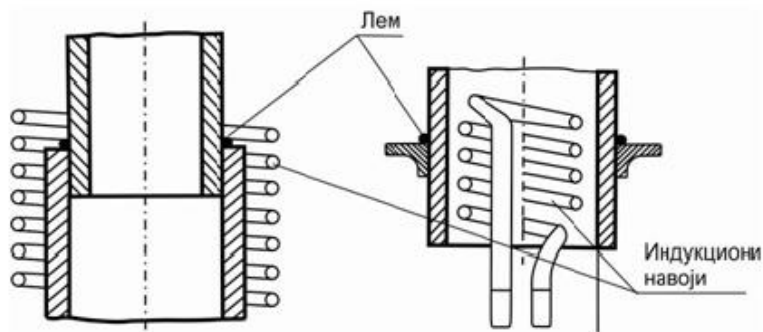
4.5 Индукционно лемљење

Индукционо лемљење (сл. 4.10) изводи се локалним индукционим загревањем страница спајаних предмета. Индуктор се састоји из једног или више радних намотаја кроз које протиче наизменична струја, па се у радним предметима индукују вртложне струје које загревају плитке слојеве. Расподела температура у дубљим деловима радних предмета зависи од његове топлотне проводљивости. За дати материјал, дубина слоја загрејаног индукцијом зависи од фреквенције наизменичне струје. Повећањем фреквенције, смањује се дубина до које се преноси индукована струја па, према томе, и дубина загревања. За лемљење се користи струја мрежне фреквенције ($f = 50 \text{ Hz}$), или пак струја повишене фреквенције ($f = 450 \text{ Hz}$). Виша фреквенција, која се остварује помоћу групе мотор-генератор, примењује се, кад је неопходно загревање веома плитких површинских слојева.

Главна предност индукционог лемљења, у односу на друге начине, јесте брзо и локализовано уношење топлоте, што своди оксидацију на најмању меру и смањује строге услове за чистоћу радних површина. Овај вид лемљења налази највећу примену у електроници и електротехници.

Изузев алуминијума и магнезијума, већина магнетних метала и легура, који се могу спајати другим начинима лемљења, успешно се леме и индукционо. Ако се индукционо леме један магнетни и немагнетни материјал потребна је специјална опрема, којом се превазилазе разлике у магнетним особинама и термичкој експанзији.

Додатни материјал за индукционо лемљење углавном је сребрни лем у облику прстенова, жица, трака или праха.



Слика 4.10 Индукционо лемљење

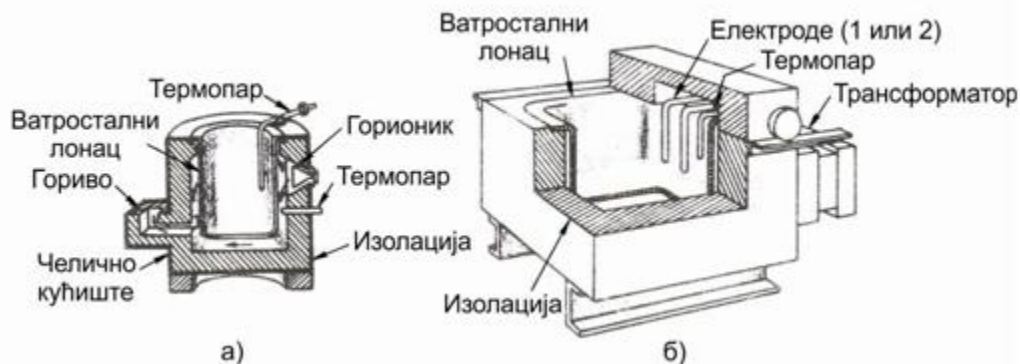
Топитељи су најчешће водени или алкохолни раствори борне киселине (H_3BO_3), борати (соли борне киселине), флуориди (соли флуороводоничне киселине - HF) и флуороборати (соли борофлуороводоничне киселине - HBF_4).

4.6 Лемљење потапањем (лемљење у растопима)

Лемљење потапањем радних предмета у растоп легура или истопљених соли, или како се још назива "лемљење у растопима", остварује се загњуривањем склопова за лемљење у каде са растопом. Температура у растопу мора бити изнад ликвидуса лема, и увек испод тачке топљења основног материјала.

Сона купатила садрже метални или керамички ватростални лонац у коме се налази неутрална со. Лонац се може загревати спољашњим извором топлоте (гасом или мазутом (сл. 4.11а)) и унутрашњим извором топлоте (сл. 4.11б). Унутрашњи извор топлоте (само при масовној производњи) је индуктор који се напаја помоћу трансформатора секундарног напона 10-15 V. Истопљене соли су електропроводљиве, па између електрода протиче електрична струја (сл. 4.11б), те се ослобађа топлота сходно Џуловом ефекту (RI^2).

Код пламених пећи лонци су од нискоугљеничних челика или од високолегираних хром-никл челика, а код електричних пећи лонци су од керамичких материјала. У соним купатилима могу се лемити делови од угљеничних и нисколегираних челика, ливеног гвожђа, нерђајућег челика, легура алуминијума и легура бакра.



Слика 4.11 Пећи за лемљење потапањем: а) пламене и б) електричне

За лемљење угљеничних и нисколегираних челика употребљавају се неутралне соли (NaCl) са додатком топитеља, као што су боракс ($\text{Na}_2\text{B}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) или криолит (минерал алуминијума $\text{AlF}_3\cdot 3\text{NaF}$), соли угљене киселине (карбонати Na_2CO_3 , K_2CO_3) и натријум-цијанид (NaCN). Карбонатима и натријум-цијаниду не додају се топитељи, јер сами делују као топитељи.

Неутралне соли штите површине челичних предмета од оксидације из ваздуха, али не разлажу раније створене оксиде, па су стога неопходни топитељи. Они се претходно наносе на радне површине и загревају тако да при потапању топитељ буде сув. Кад се радни предмети потопе, топитељ се раствара у неутралној соли, или у облику сланих испарења или гасова напушта купатило. Због тога, при лемљењу потапањем нема потребе да се одстрањује вишак топитеља као код других начина лемљења.

Додатни материјал при лемљењу челичних делова може бити сребрни лем или легуре бакра и цинка. Лем, у облику жице, траке, праха или пасте поставља се директно на место спајања непосредно пре потапања. Зазори између радних предмета су реда величине $0.025\text{--}0.75\text{ mm}$, што је услов за капиларно подизање лема.

Време држања радних предмета у соним купатилима зависи од њихових димензија, тражене јачине споја и других фактора. За предмете малих димензија време држања може бити краће и од једног минута. Код склопова где је потребно да лем продре дубље, сходно захтеваној моћи ношења споја, неопходно је дуже време. После одређеног времена држања, залемљени делови се ваде равномерним кретањем, јер би при наглим покретима лем могао да испури из споја.

При лемљењу потапањем морају се строго поштовати прописи о хигијенско-техничкој заштити (ХТЗ). За време наношења топитеља, и у процесу лемљења, могу настати испарења и гасови штетни по здравље. Због тога, у радионици мора да буде инсталиран систем принудног проветравања. На пример, неки сребрни лемови садрже кадмијум; испарења оксида кадмијума су отровна и њихово удисање је опасно по здравље. Такође су неки састојци у топитељима и солима, мање или више штетни по здравље. Флуориди у пастама су двоструко опасни: паре ових соли су отровне, а при додиру са кожом, а нарочито ноктима, настају болне опекотине које тешко зарастају. Код соли које садрже NaCN , при лемљењу се ствара веома отровно једињење C_2N_2 (цијан), па се при лемљењу мора користити заштитна опрема и поштовати све мере ХТЗ-а.

4.7 Електролучно лемљење у заштити инертног гаса – МИГ лемљење

Разликује се од МИГ заваривања по облику импулсне струје којом се постиже количина уноса топлоте 5 до 10× мања у односу на МИГ заваривање, и примени додатног материјала, који је по хемијском саставу у ствари тврди лем на бази легура бакра. Користи се за лемљење свих врста нерђајућих челика, и посебно за лемљење танких лимова од нискоугљеничних челика заштићених превлаком Zn, а у циљу очувања корозивне заштитне превлаке. Посебно велику примену налази у аутомобилској индустрији (сл. 4.12), при чему се лемљење изводи роботизованим методима.



Слика 4.12 Примена МИГ лемљења у аутомобилској индустрији

4.8 Лемљење различитих метала и легура

Лемљење сивог лива, нодуларног и темпер лива разликује се од лемљења челика из два разлога: а) морају се применити специјални начини чишћења да се одстрани графит са површина које се леме и б) температура лемљења мора да буде што је могуће нижа да би се спречило погоршање особина основног материјала (тврдоће и јачине). Ливено гвожђе се леми на исти начин као и челик: у пећима, гасним пламеном, индукционим намотајима и у соним купатилима. С обзиром на нижу температуру лемљења ливеног гвожђа него челика, додатни материјали су искључиво сребрни лемови.

Висок садржај силицијума у ливеном гвожђу и песак запечен на површинама одливака у извесној мери отежавају лемљење, али највећу тешкоћу изазива графит који је у слободном стању издвојен у сивом, нодуларном и темпер ливу. Од наведених врста ливених гвожђа најтеже је лемити сиви лив, јер се ламеларни графит тешко одстрањује са површина за лемљење. Без специјалних електролитичких купатила за чишћење површина, сиви лив се практично не може лемити. Најлакше се леми црни темпер лив, код којег је графит у виду пахуљица, па се оне лако одстрањују сачмарењем или пескарењем. Уз сребрни лем примењују се топитељи на бази флуорита.

Заваривачким лемљењем се понекад поправљају одливци изливени са грешкама или састављају поломљени делови одливака; при томе се употребљава месинг као додатни материјал.

Лемљење алуминијума могуће је са топитељима (KCl , $LiCl$, $ZnCl_2$) који скидају оксидну скраму, а не оштећују основни материјал. Овде постоје и посебне тешкоће везане за додатни материјал, јер је ликвидус температура лема веома блиска солидус температури основног материјала. Отуда произлази да је при лемљењу легура алуминијума потребна веома прецизна контрола температуре да се спречи топљење основног материјала. Температура лемљења обично је $40^\circ C$ испод солидуса основног материјала; ако је температуру могуће контролисати и ако је време лемљења кратко, могу се легуре алуминијума лемити и при температури само $6^\circ C$ испод солидуса. У зависности од хемијског састава, легуре Al могу се лемити при $T = 550-640^\circ C$, мада су најчешће радне температуре $560-615^\circ C$. Опрема, техника као и припрема за лемљење легура Al исти су као и за друге метале и легуре. Додатни материјал су углавном легуре алуминијум-силицијум које садрже 7-12% Si . Лемови су у облику жица или трака, чија је израда тежа што је већи садржај силицијума у лему.

Кад се легуре алуминијума леме на ваздуху неопходно је применити топитељ. Он постаје активан пре него што се достигне температура лемљења, продире кроз оксидну скраму, заштићује метал од даље оксидације и поспешују квашење. Топитељи за Al , су најчешће смеша алкалних хлорида, хлорида алкалних земаља и флуорита; понекад садрже алуминијумфлуорид или криолит ($AlF_3 \cdot NaF$). Испоручују се у облику сувог праха који дуже траје ако се правилно чува. Кутије за чување праха морају бити од чистог алуминијума, никако челичне. При самом лемљењу спој се засипа топитељем или се загрејана додатна жица умаче у прах; друга је могућност да се прах раствори у води или алкохолу, па се том пастом премазују зоне спајања. Пасте се тако припремају да оквасе све површине предвиђене за лемљење, а да вишак истекне после лемљења. Остаци топитеља су корозиона жаришта на лемљеном споју. Површине радних предмета припремају се за лемљење механички или хемијским чишћењем. За механичко чишћење користи се абразивна сачма или четке са челичним жицама. Хемијско чишћење изводи се потапањем алуминијумских делова у 50%-ни раствор азотне киселине ($1/2H_2O$ $1/2HNO_3$); задржавају се око 30 s, а затим испирају у топлој води и суше загрејаним ваздухом.

За најпознатије ливачке легуре - силуминске ($AlSi12$) - неопходна су посебна средства за чишћење површина, јер ове легуре не реагују на већину алкалних или киселих раствора. Најбоља је чиста смеша од 3 дела концентроване флуороводоничне и једног дела азотне киселине. Лемљење треба извршити одмах после чишћења површина, или најкасније у току 48 часова. Од познатих метода лемљења, за легуре алуминијума најпогодније је потапање у соно купатило, мада се добри резултати постижу и окси-ацетиленским пламеном. Најчешће се гасно леме цеви хладњака, рамови прозора и спојеви електричних грејних елемената.

Поред окси-ацетиленског пламена, за лемљење легура алуминијума може се користити пламен водоника или природног гаса. Величина горионика и облик пламена при лемљењу ацетиленом слични су као и за гасно заваривање. Додатна тешкоћа јавља се зато што легуре алуминијума при загревању не мењају боју, па може чак почети и топљење, а да се то по боји не запази. Зато је потребан индикатор које ће променом неких својих особина на температури лемљења показати да је она достигнута. У том смислу се користи топитељ који почиње да се топи нешто испод солидуса основног материјала. У

зависности од врсте споја, додатни материјал се може претходно поставити или директно уносити и топити у току самог процеса. После лемљења преостали део топитеља, мора се одстранити, јер делује корозионо.

Алуминијум се може залемити и за друге метале. Нарочито се лако могу гасно лемити алитирани⁴ челични предмети помоћу алуминијума као додатног материјала и одговарајућих топитеља. Поступак је исти као кад се леми алуминијум за алуминијум, изузев што се предгревање и лемљење изводи што брже да би се спречило дифузионо образовање кртих интерметалних фаза алуминијум-гвожђе (Al-Fe).

Веома је тешко лемити *алуминијум за бакар*, јер ова два елемента граде крту еутектику ниске температуре топљења (548°C).

Бакар и његове легуре могу се успешно лемити свим начинима лемљења. Теже се леме легуре бакра са примесама олова и калаја.

Електролитички бакар је склон ка прслинама ако се леми у атмосфери која садржи водоник. Он дифундује великом брзином у загрејани бакар (на око 480°C), па чак и мале количине водоника редукују оксид бакра и образују водену пару превисоког притиска; последице су унутрашње прслине и порозност. Отуда произлази закључак да се неке врсте бакра, које садрже површинске оксиде, не смеју лемити у пећима са заштитном атмосфером која садржи водоник, нити отвореним пламеном.

Месинг, са садржајем цинка до 20%, лако се леми помоћу разних додатних материјала и уз примену одговарајућих топитеља. Може се лемити и месинг са садржајем и до 40% цинка, али коришћењем лема ниже температуре топљења да би се спречило испаравање цинка из основног материјала.

Калајне бронзе, које садрже до 1% калаја (Sn) и друге легирајуће елементе као олово (Pb), манган (Mn), никл (Ni) и алуминијум (Al), теже се леме.

Фосфорне бронзе садрже мале количине фосфора ($P < 0.25\%$) који делује као дезоксидатор; могу се лемити разним врстама лемова температуре топљења ниже од солидуса основног материјала. Препоручује се употреба топитеља. Пре лемљења, предмети од фосфорне бронзе се жаре при 190°C чиме се отпуштају унутрашњи напони и умањује опасност од појаве прслина.

Силицијумске бронзе које садрже 3.25% Si, склоне су напонским прслинама. Зато се пре лемљења радни предмети жаре при 250°C. За најбоље резултате, радне површине пре лемљења се чисте механички, а при спајању обавезна је примена топитеља.

Алуминијумске бронзе се тешко леме због особине алуминијума да ствара тешко топљиве површинске оксиде, који отежавају разливање течног лема. Легуре са мање од 8% алуминијума могу се лемити применом специјалног топитеља који раствара оксид алуминијума. За Al-бронзе препоручује се сребрни лем са високим садржајем сребра и ниском температуром топљења.

⁴ Алитирање је наношење заштитних алумијумских превлака на предмете од челика, тако што се они потапају у топло алуминијумско купатило.

Чист бакар може се спајати лемљењем са легурама бакра. При томе, ако се нпр. лемим чист бакар и алуминијумска бронза, процесни параметри се одређују према материјалу који се теже лемим, тј. према алуминијумској бронзи. У овом случају то значи да се температура лемљења подешава према солидус температури алуминијумске бронзе, тј. да буде нижа од ње. Исто тако се обавезно мора употребити топитељ за алуминијумску бронзу, без обзира на то што се чист бакар може лемити и без топитеља.

Додатни материјал за лемљење бакра и његових легура су легуре Cu-Zn, Cu-P, Cu-P-Ag. Топитељи могу бити борна киселина, боракс, борати, флуорити и флуороборати; примењују се у виду праха, паста или у течном стању.

Иако се бакар и његове легуре могу лемити у пећима, индукционо, електроотпорски, потапањем и гасно, овде се посебно говори само о гасном лемљењу, будући да је оно најдоступније већини заваривача.

Гасно лемљење бакра и његових легура заснива се на истим принципима и изводи се истом опремом као и гасно лемљење челика. Лемљење се највише примењује за израду тзв. измењивача топлоте, где спадају испаривачи, расхладни уређаји, радијатори, хладњаци и други уређаји, чија је ефикасност повезана са високом топлотном проводљивошћу бакра. Поред тога се гасно леме и делови у којима је бакар употребљен због своје високе електричне проводљивости; то су нпр. везе намотаја електромотора са ламелама колектора, прекидача са кабловима, термичких осигурача са грејачима, итд.

Највише се спаја чист бакар (претходно очишћен од површинских оксида) са месингом (Cu-Zn). У случајевима кад је потребно лемити бакар који садржи оксиде, никако се не сме применити редукујући пламен, јер тада може настати "водонична болест бакра", тј. кртост коју изазива водоник из пламена. За такве случајеве препоручује се неутралан или благо оксидишући пламен.

Кад год се лемим месинг, треба се заштитити од цинканих пара изнад зоне лемљења, па се стога мора пазити да се радни предмет не прегрева и не задржава дуго на температури лемљења.

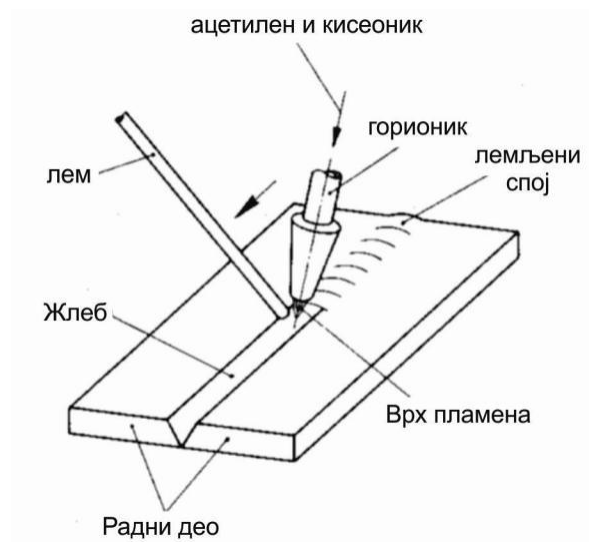
При лемљењу легура чије компоненте граде тешко топлјиве оксиде (Al, Be, Cr и Si), обавезно је применити топитеље и избегавати оксидишући пламен.

Једна од битних разлика између лемљења челика и легура бакра, јесте брзина загревања; челичним предметима не смета велика брзина загревања, док код фосфорне бронзе велика брзина уноса топлоте може довести до појаве прслина.

5. Заваривачко лемљење челика и ливеног гвожђа

Заваривачко лемљење се сврстава у поступке лемљења из два разлога:

1. Користе се нежелезни додатни материјал и Спој се остварује без топљења страница жлеба основног материјала (сл. 5.1). С друге стране, одредница *заваривачко* потиче отуда што се спој добија попуњавањем жлеба као код заваривања. Главна предност заваривачког лемљења у односу на гасно или електролучно заваривање је што се лемљење изводи при знатно нижој температури основног материјала, па се тиме умањују термички напони и деформације; осим тога, материјал лемљеног шава је знатно мекши и истегљивији него шав добијен заваривањем, што олакшава машинску обраду и повећава отпорност према кртом лому. Поред наведених предности, заваривачко лемљење има и мана у односу на заваривање, а то су: 1) различита боја основног и додатног материјала; 2) јачина шава је условљена јачином месинганог додатног материјала која је постојана само до 260°C и
2. Спојеви су подложни галванској тј. електрохемијској корозији због различитих електродних потенцијала основног и додатног материјала.



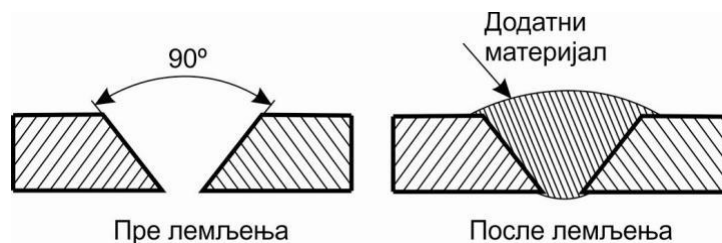
Слика 5.1 Схема заваривачког лемљења

Заваривачким лемљењем се најчешће поправљају поломљени или репарирају оштећени челични одливци или одливци од сивог лива. Исто тако се на овај начин репарирају оштећени алати, зупчасти венци, рамови преса и делови пољопривредних машина који се морају поправити на терену. При заваривачком лемљењу угљеничних челика користи се благо оксидишући пламен, техника "улево" и проток ацетилена око 50 l/mmh; за лемљење ливеног гвожђа пламен мора да буде оксидишући са протоком ацетилена око 30 l/mmh, а техника заваривања - "улево"; благо оксидишућем пламеном се одстрањује графит са површина жлеба и тиме елиминише највећа тешкоћа при лемљењу графитних ливених гвожђа.

Додатни материјал, за заваривачко лемљење углавном је месинг (састава 60% Cu, око 40% Zn и са незнатним додатком силицијума до 0.15%, који спречава испаравање цинка).

Лем се топи при $T \approx 800^{\circ}\text{C}$, а испоручује се у облику жица пречника 3.6 mm и дужине око 1 m . Поред ове легуре примењује се и лем састава бакар-цинк-никл (Cu-Zn-Ni) намењен за ливено гвожђе и нерђајуће челике. Јачина на кидање спојева изведених заваривачким лемљењем је у границама $350\text{--}500\text{ MPa}$.

Топитељ за заваривачко лемљење техничких легура гвожђа најчешће је мешавина боракса, борне киселине и натријумхлорида. Примењују се у виду праха, пасте или помешани са лемом.



Слика 5.2 Жлеб и шав израђен заваривачким лемљењем

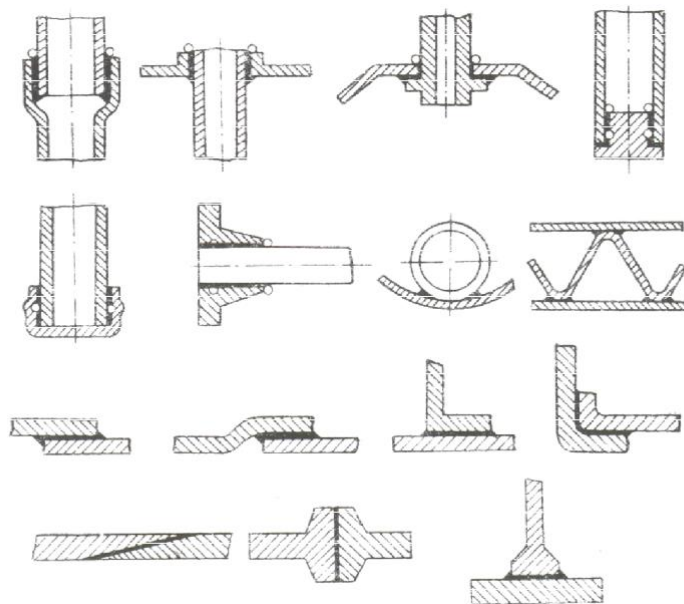
Ако је радни предмет дебљи од 2.5 mm , ивице се припремају у облику V-жлеба под углом од 90° (сл. 5.2) или 120° ако се захтева већа везивна површина. Непосредно пре спајања, странице споја се чисте механички или хемијски. Највећа јачина споја добија се ако се од стране све стране материје, тако да жлеб добије метални сјај. Поред тога, треба очистити површине које се граниче са жлебом, како са горње тако и са доње стране споја. Редослед даљих радова је наношење топителја и загревање зоне споја до температуре не више од 730°C . Ако се заваривачки лем челик, предгрева се до тамно црвене боје или боје труле вишње.

Пре заваривачког лемљења ливеног гвожђа, понекад је потребно извршити предгревање, локално или опште, што зависи од облика и димензија одливка. Обично су то температуре око 500°C , што одговара бледо-црвеној боји; више температуре предгревања се не препоручују због интензивирања оксидације која погоршава квашење.

6. Врсте лемљених спојева

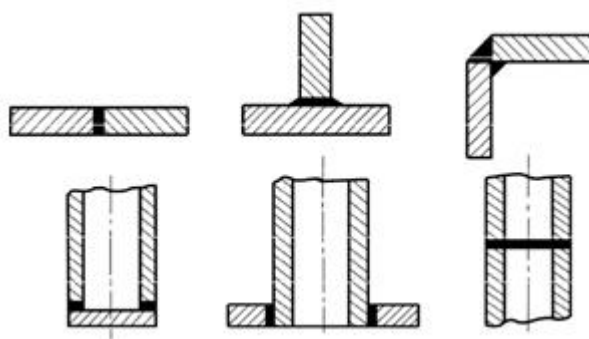
На јачину лемљених спојева утиче више фактора као што су врста лема, тип споја, величина зазора и унутрашње грешке (прслине, поре, прекид лемљења).

Меки лемови (Sn, Pb, Zn, Cd, Bi) имају знатно ниже механичке особине (напон течења и затезну јачину) од основног материјала, па се моћ ношења лемљеног споја може приближити основном материјалу само повећањем површина лемљења (сл. 6.1).



Слика 6.1 Меко лемљени спојеви са повећаним радним површинама

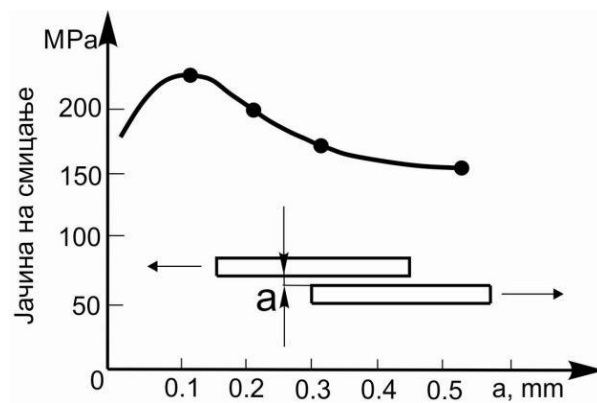
При лемљењу Cu, Al и Ni тврдим лемовима, јачина лема превазилази јачину ових метала, па није потребно повећавати радне површине (сл. 6.2).



Слика 6.2 Врсте спојева за тврдо лемљење

Код већине лемљених спојева њихова јачина увелико зависи од зазора између предмета који се леме. Зазор директно утиче на хемијски састав споја због узајамне дифузије и растворљивости компонената и састојака основног материјала и лема. На основу опита је установљено да за сваку комбинацију основног материјала и лема постоје зазори које дају максималну јачину на смицање. За предмете од угљеничних челика

оптимални зазор износи 0.05-0.12 mm , ако се примени сребрни или месингани лем, и око 0.07 mm за бакарни лем. Сличним испитивањима може се одредити и оптимални зазор при лемљењу легура Al-Mg (сл. 6.3). Овако мали зазори између лемљених површина могу се остварити фином механичком обрадом и одмашћивањем хемијским средствима.



Слика 6.3 Утицај зазора на смицајну јачину лемљеног споја легура Al-Mg

7. Испитивање квалитета залемљених спојева

7.1 Грешке залемљених делова

Грешке настале у процесу израде залемљених конструкционих делова могу се поделити на три групе:

1. Грешке настале при изради и припреми за лемљење;
2. Грешке лемљеног шави и
3. Грешке делова као целине.

Квалитет залемљених делова зависи првенствено од квалитета израде елемената споја и припреме за лемљење. Елементи споја треба да су израђени сагласно конструкционој документацији. У процесу припреме лемљења успостављају се неопходни најповољнији зазори између елемената споја и осигурава се непроменљивост величине зазора. Карактеристичне грешке припреме за лемљење су неусаглашеност равномерности зазора и померање елемената споја. Узрок ових грешака је одступање мера обраде, померање у току процесу учвршћивања и недовољно учвршћивање. Контрола израде и припреме делова за лемљење обухвата визуелну контролу и димензионалну контролу помоћу одговарајућих мерних алата и прибора.

Захтеване особине лемљеног споја могу се добити само ако је примењена проверена технологија лемљења. Недовољно брижљиво чишћење делова пре лемљења, неодговарајући температурски режим и друга одступања од утврђених технолошких параметара неминовно доводе до појаве различитих врста грешака у лемљеном споју. Лемљени спој је место материјализоване везе залемљених делова. Његов облик и мере не зависе само од врсте и облика места спајања, него и од примењеног метода лемљења и врсте основног и додатног материјала. Ширина лемљеног шави је растојање између граница неизмењеног основног материјала. Прелазна зона је део шави у којем су настале металуршке реакције између лема и основног материјала. Типичне грешке лемљених шавова су: поре, шупљине, прслине, укључци троске и топитеља, дисконтинуитети испуне зазора лемом и грешке спајања лема и основног материјала.

Гасне поре су заробљени гасови у лему, настали испаравањем компоненти лема или топитеља услед високе температуре лемљења или недовољног времена држања на температури лемљења да би се извршила рафинација (пречишћавање) растопљеног лема.

Прслине - уздужне и попречне, могу бити у споју, прелазној зони споја и понекад у основном материјалу. Узрок настанка прслина у споју може да буде померање делова пре завршетка кристализације (очвршћивања), брзо хлађење после лемљења, велика разлика у коефицијентима топлотног ширења лема и основног материјала или образовање кртих дифузионих зона. Узрок прслина у основном материјалу може да буде интензивна дифузија лема у основни метал.

Укључци троске (продукти растварања оксида) и топитеља настају када је температура лемљења нижа од температуре топљења топитеља и немогућности њиховог истискивања услед неповољне конструкције или места постављања лема.

Грешке спајања и дисконтинуитет попуне лема уочавају се прекидима везе са основним металом и непопуњеношћу зазора. Узрок је недовољно чишћење, недовољна активност топитеља или активног гаса, недовољна количина лема. Остале грешке су заједи, истицање лема, налепнине лема, истискивање (шприцање) лема.

Грешке лемљених делова као целине односе се на деформације и витоперење, као резултат неравномерног загревања и хлађења у процесу лемљења или недовољног осигурања положаја делова у процесу лемљења, оксидације површине, остаци соли и топитеља.

Велики број операција у изради залемљених делова и утицај квалитета њиховог извођења на крајњи квалитет производа захтева међуоперацијску контролу, која се у серијској производњи већином остварује применом статистичке контроле. Све операције процеса са хемијским средствима обраде (декапирање, раствори и растопи топитеља, растопи соли и лема) захтевају периодичну контролу састава и чистоће, а термички процеси и континуалну контролу термичког циклуса.

7.2 Методе испитивања залемљених спојева

Као што је напред наведено, до појаве грешака у залемљеном споју може доћи из више разлога: слабо очишћених површина, рђавог конструкционог решења споја, погрешног избора лема, топитеља, температуре и времена лемљења. Свака грешка, мање или више умањује јачину споја, термичку и електричну проводност и друге корисне особине лемљеног споја (херметичност, на пример).

За контролу залемљених спојева стандардизована су *испитивања без разарања и испитивања са разарањем*.

Испитивања без разарања обухватају:

1. Визуелну (очну) контролу,
2. Луминисцентна (пенетрантна), магнетна, радиографска (рендгенским – R₀ или γ-зрацима) и ултразвучна испитивања,
3. Контролу херметичности притиском воде или ваздуха и
4. Контролу електричне отпорности.

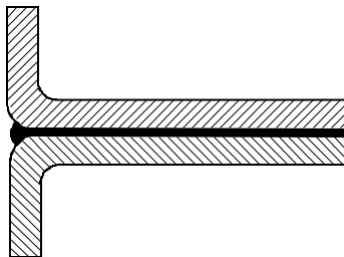
Сва наведена испитивања без разарања слична су као код заварених спојева, те се овде неће посебно разматрати.

Испитивања са разарањем обављају се у циљу провере механичких особина, структуре и корозионе отпорности лемљеног споја. Користе се у циљу квалификације технологије лемљења или код посебно одговорних конструкционих делова.

Механичке особине се могу испитивати било на узорцима исеченим из лемљеног споја или на посебним узорцима изведеним од истог материјала и истом технологијом као и оригинални лемљени спој. Према уобичајеној пракси, лемљени спојеви се могу испитивати *раздвајањем, затезањем и смицањем*.

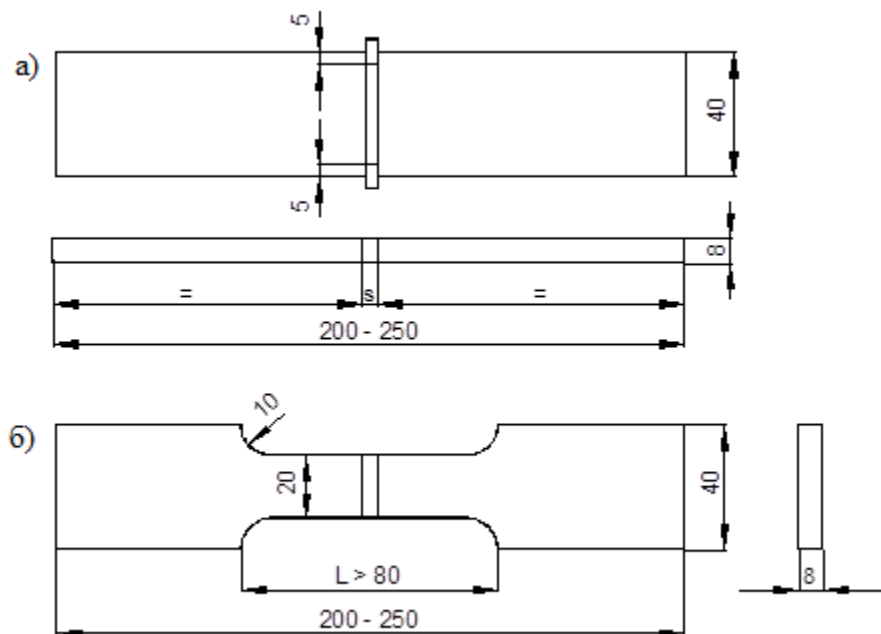
На основу *испитивања раздвајањем* (сл. 7.1) може се установити степен попуњености зазора лемом. Потребно је да тај степен износи најмање 75%, што значи да

површина непокривена лемом не сме да пређе 25% од укупне површине преклопа. Код одговорних спојева захтев је строжији па попуњеност мора да буде бар 85%.

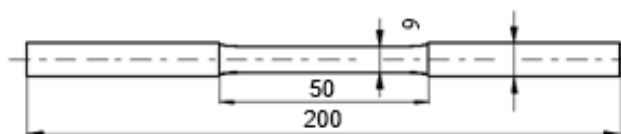


Слика 7.1 Проба за испитивање раздвајањем лемљеног споја

Испитивање затезањем лемљених спојева изводи се на правоугаоним или округлим пробама залемљеним сучеоно (слике 7.2 и 7.3). Најпре се израђује сучеоно лемљени спој са зазором "s" који се добија уметањем дистантних "плочица" исечених из лимова (фолија) одговарајућих дебљина (сл. 7.2а). После лемљења, припрема се узорак за испитивање (епрувета) за испитивање затезањем према SRPS C.T3.059:1989, облика и димензија, према слици 7.2а. На сличан начин, према стандарду DIN 8525-1977, припрема се и округла епрувета за испитивање јачине на кидање (сл. 7.3).



Слика 7.2 Залемљени спој (а) и проба (б) за испитивање затезањем



Слика 7.3 Округла проба за испитивање затезањем лемљеног споја

Испитивање јачине на смицање, изводи се на преклопном споју, приказаном на слици 7.4.

Јачина на смицање лемљеног шаву рачуна се по изразу:

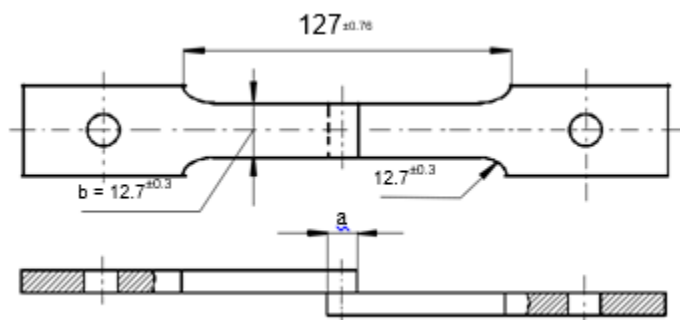
$$R_t = \frac{F_m}{a \cdot b}, \text{ МПа},$$

где су:

F_m - највећа сила регистрована при испитивању затезањем, N ,

a - величина преклопа, mm и

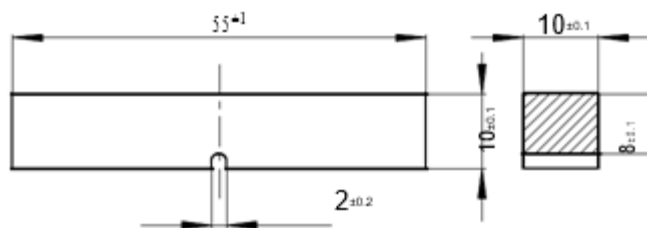
b - ширина радног дела пробе, mm .



Слика 7.4 Проба за испитивање јачине на смицање лемљеног споја

Препоручује се да се испитивања јачине лемљеног споја изведу најмање на два идентична узорка.

Понекад се лемљени спојеви испитују и ударним савијањем ради одређивања жилавости споја. Проба је стандардна, по Шарпију (сл. 7.5), а испитивање се изводи на собној температури, ако се друкчије не пропише техничким условима.



Слика 7.5 Проба за испитивање жилавости лемљеног споја

Металографска испитивања су слична као и код заварених спојева, с тим што већу пажњу треба посветити припреми лемљеног споја ("шлифа") за металографске пробе. Наиме, у току брушења и полирања може доћи до прегревања па и делимичног топљења лема, посебно код меких лемова.

7.3 Преглед стандарда

Као и у свим другим производним технологијама, тако и при примени ове технологије морамо се придржавати одговарајућих прописа који регулишу ову област. Овде се наводе само неки најважији стандарди везани за ову производну технологију.

Спојеве изведени тврдим и меким лемљењем – испитивање спојева – квалификовање технологије:

1. SRPS EN ISO 18279:2009 - Грешке у залемљеним спојевима;
2. SRPSC.T3.059:1989 - Заваривање и сродни поступци - Спојеве изведени меким и тврдим лемљењем - Поступци испитивања механичких особина;
3. SRPS EN 12797:2008 - Тврдо лемљење - Испитивање разарањем залемљених спојева;
4. SRPS EN ISO 10564:2008 - Материјали за меко и тврдо лемљење - Методе за узорковање меких лемова за анализу;
5. SRPS EN 12799:2009 - Тврдо лемљење - Испитивање без разарања залемљених спојева;
6. SRPS EN 13134:2008 - Тврдо лемљење - Квалификација технологије;
7. SRPS EN ISO 13585:2013 - Тврдо лемљење - Квалификациони испит лемиоца и оператора лемљења;
8. SRPS EN ISO 3677:2008 - Додатни материјали за меко, тврдо и заваривачко лемљење - Означивање.

Тврдо лемљење:

1. SRPS EN 14324:2008 - Тврдо лемљење - Упутство за примену тврдо залемљених спојева;
2. SRPS EN1044:2008 - Додатни материјали;
3. SRPS EN1045:2008 - Тврдо лемљење - Топитељи за тврдо лемљење; Класификација и технички услови испоруке;
4. SRPS EN 13347:2008 - Бакар и легуре бакра - Шипке и жица за заваривање и заваривачко лемљење.

Меко лемљење:

1. SRPS EN ISO9454-део:2008 - Топитељи за меко лемљење - Класификација и захтеви - Захтеви за извођење;
2. SRPS EN ISO 10564:2008 - Материјали за меко и тврдо лемљење - Методе за узорковање меких лемова за анализу;
3. SRPS EN 29454-1:2009 - Топитељи за меко лемљење-Класификација и захтеви - Класификација, обележавање и паковање;
4. SRPS EN 29455 - део 1; 5; 8; 11; 14:2011 - Топитељи за меко лемљење - Методе испитивања;
5. SRPS EN ISO 12224 – део 1:2012 - Жице за меко лемљење пуне и обложене топитељем - Спецификације и методе испитивања - Класификација и захтеви особина;

6. SRPS EN ISO 12224 – део 2:2012 - Жице пуњене топитељем за меко лемљење - Спецификације и методе испитивања - Одређивање садржаја топитеља;
7. SRPS EN ISO9455, део 2; 3; 6; 9; 10; 12; 13; 15; 16; 17:2012 - Топитељи за меко лемљење - Методе испитивања.
8. SRPS EN ISO12224, део 3:2012 - Жице за меко лемљење пуне и обложене топитељем - Спецификације и методе испитивања - Метода испитивања равнотежног квашења за одређивање ефикасности топитељем пуњене жице за меко лемљење.

Опрема:

1. SRPS EN 1326:2012 - Опрема за гасно заваривање - Мали комплекти за гасно тврдо лемљење и заваривање.

7.4 Заштита на раду при лемљењу

При припреми делова за лемљење користе се методи механичког и хемијског чишћења који загађују радионички простор прашином и испарењима штетним по дисајне органе опслуживоца процеса. Осим тога и површине већ очишћених делова се контаминирају или кородирају. Из тих разлога, опрема за обраду треба да буде затвореног типа (нпр. машине за одмашћивање трихлоретиленом, бубњеви за пескарање ил исачмарење) и са уређајима за локално усисавање прашине или пара, а радионички простор мора да буде опремљен обавезном вентилацијом.

При лемљењу са топитељима, за наношење топитеља на место лемљења треба користити заштитна средства за заштиту руку и лица од додира са топитељем. Топитеље у облику прашка, у циљу смањења њиховог распршивања, треба помешати са одговарајућим растварачима и примењивати их у облику пасте.

При лемљењу са калајно оловним лемовима прети опасност од контаминације оловом коже руку и одеће опслуживоца. Концентрација олова у простору и на самом радном месту може да буде веома висока те је неопходна вентилација са великим бројем измена ваздуха (и до 90%), а радне површине морају да буду од материјала које су погодне за лако прање. Опасност по здравље опслуживоца је и при лемљењу са лемовима који садрже кадмијум, због чега треба користити доње температуре подручја лемљења и обавезну вентилацију радног простора. Код ручних поступака лемљења са овим лемовима неопходна је и примена маски са филтерима. Код метода лемљења у растопу соли опасност је од испаравања компоненти соли, а код лемљења у растопљеном лему од испаравања лакше испарљивих компоненти лема, због чега је обавезна вентилација радионичког простора.

8. Експериментална испитивања

8.1 Испитивање најважнијих механичких карактеристика

8.1.1 Основни материјал – нискоугљенични челик

Најпре су изведена испитивања затезањем на меком нискоугљеничном челику припремом стандарних плочастих узорака (спрувета) различите ширине. У таблицама 8.1 до 8.4 наведени су основни подаци о припремљеним узорцима и добијена најважнија својства отпорности и способности деформације при затезању тако припремљених узорака. На сликама 8.1 до 8.4 дати су фотографски прикази припремљених узорака пре и после кидања, као и карактеристични дијаграми затезања (сила-издужење).

1. Узорак ширине – 20 mm

Таблица 8.1 Основни подаци испитиваних узорака (спрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
ОМ ₁	100	20	5	100	30200	39300	129.9	13.2	3.1	40.92
ОМ ₂	100	20	5	100	29800	39300	130.4	13.2	2.9	38.28
ОМ ₃	100	20	5	100	30600	39500	132	13.3	2.7	35.91

Таблица 8.2 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , MPa	Горња граница течења R_{eH} , MPa	Издужење A, %	Сужење Z, %
ОМ ₁	393	302	29.9	59.08
ОМ ₂	393	298	30.4	61.72
ОМ ₃	395	306	32.0	64.09



а)



б)

Слика 8.1 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања

2. Узорак ширине – 10 mm**Таблица 8.3** Основни подаци испитиваних узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
ОМ ₄	60	10	5	50	16600	19100	78.3	5.9	2.9	17.11
ОМ ₅	60	10	5	50	15700	19000	78.6	5.6	2.8	15.68
ОМ ₆	60	10	5	50	15400	19800	79.7	5.9	3.4	20.06

Таблица 8.4 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , MPa	Горња граница течења R_{eH} , MPa	Издужење A, %	Сужење Z, %
ОМ ₄	382	332	30.5	65.78
ОМ ₅	380	314	31	68.64
ОМ ₆	396	308	31.17	59.88



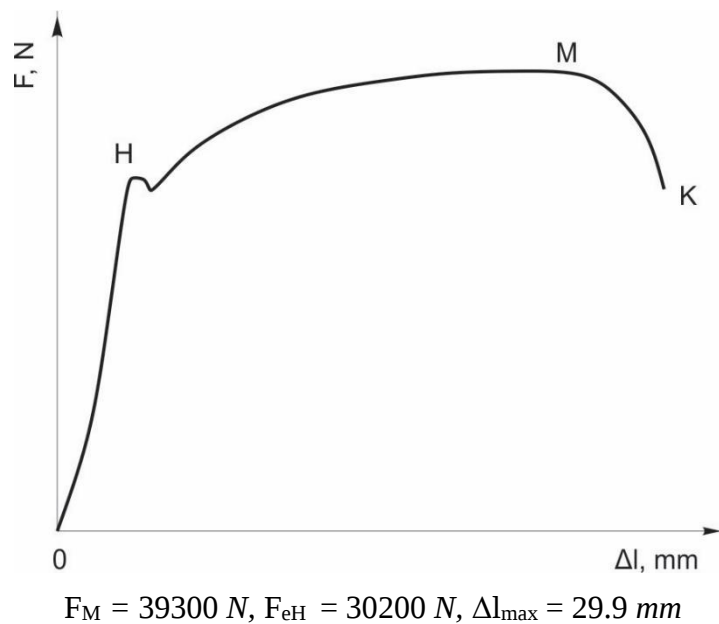
а)



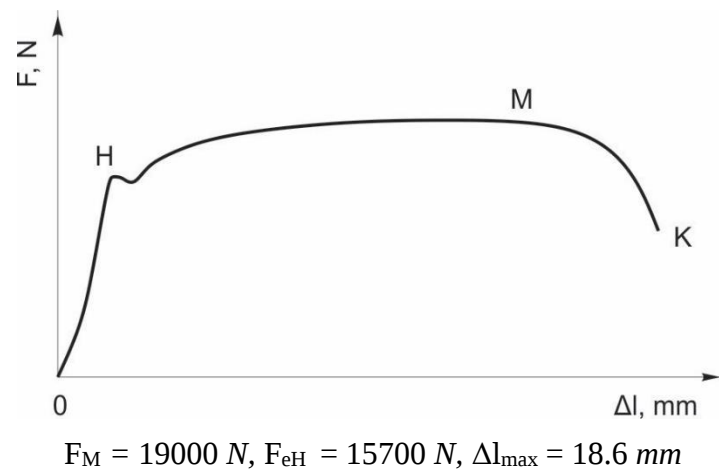
б)

Слика 8.2 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања

На сликама 8.3 и 8.4 приказани су карактеристични дијаграмски записи F-Δl за испитиване материјале – шири и ужи узорак.



Слика 8.3 Дијаграм испитивања затезањем основног материјала – шири узорак



Слика 8.4 Дијаграм испитивања затезањем основног материјала – ужи узорак

8.1.2 Заварени спој - нискоугљенични челик

Напред наведени узорци из основног материјала су затим пресечени по средини, припремљен је жлеб и спојени су заваривањем МАГ поступком додатним материјалом сличних особина као и основни материјал (VAC 60 – SŽ Jesenice). Затим су изведена испитивања затезањем тако заварених узорака (епрувета) различите ширине. У таблицама 8.5 до 8.8 наведени су основни подаци о припремљеним узорцима и добијена најважнија својства отпорности и способности деформације. На сликама 8.5 до 8.8 дати су фотографски прикази припремљених узорака пре и после кидања, као и карактеристични дијаграми сила-издужење.

1. Узорак ширине – 20 mm

Таблица 8.5 Основни подаци испитиваних заварених узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
3C ₁	100	20	5	100	30200	37900	123.3	14.8	3.0	44.4
3C ₂	100	20	5	100	31400	34700	106.8	18.3	4.2	76.86
3C ₃	100	20	5	100	30700	37900	128.8	13.6	3.0	40.8

Таблица 8.6 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , MPa	Горња граница течења R_{eH} , MPa	Издужење A, %	Сужење Z, %
3C ₁	379	302	23.3	55.6
3C ₂	347	314	6.8	23.14
3C ₃	379	307	28.8	59.2



а)



б)

Слика 8.5 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања

2. Узорак ширине – 10 mm**Таблица 8.7** Основни подаци испитиваних заварених узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
3C ₄	60	10	5	50	12500	12500	61.8	9.4	4.9	46.06
3C ₅	60	10	5	50	15500	18800	71.4	7.4	3.5	25.9
3C ₆	60	10	5	50	16000	19800	67.3	9.4	4.8	45.12

Таблица 8.8 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , MPa	Горња граница течења R_{eH} , MPa	Издужење A, %	Сужење Z, %
3C ₄	250	250	3	7.88
3C ₅	376	310	19	48.2
3C ₆	396	320	12.17	9.76



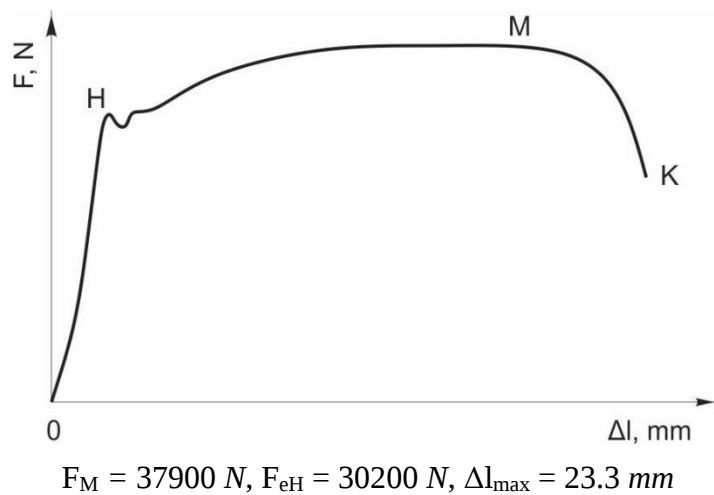
а)



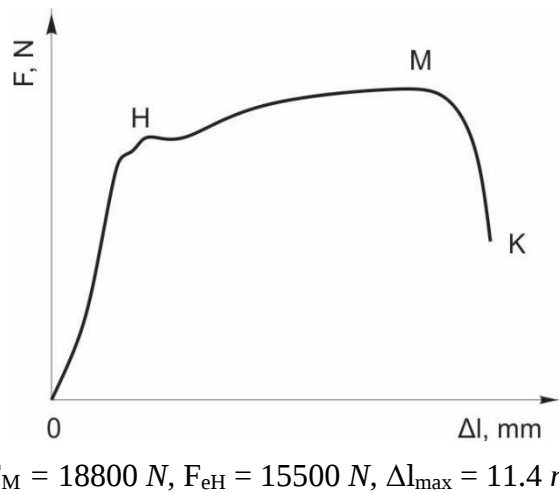
б)

Слика 8.6 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања

* Резултати у затамњеним редовима драстично одступају од очекиваних. Узрок – највероватнија грешка при изради узорка или при заваривању.



Слика 8.7 Дијаграм испитивања затезањем завареног споја – шири узорак



Слика 8.8 Дијаграм испитивања затезањем завареног споја – ужи узорак

8.1.3 Лемљени спој - нискоугљенични челик/месинг

Напред наведени узорци су затим пресечени по средини, слично као при заваривању, припремљен је жлеб и спојени су заваривачким лемљењем додатним материјалом (лемом) потпуно различитих особина од основног материјала (месинганом жицом – CuZn – 54/46). Затим су изведена испитивања затезањем тако залемљених узорака (епрувета) различите ширине. У таблицама 8.9 до 8.12 наведени су основни подаци о припремљеним узорцима и добијена најважнија својства отпорности и способности деформације. На сликама 8.9 до 8.12 дати су фотографски прикази припремљених узорака пре и после кидања, као и карактеристични дијаграми затезања.

1. Узорак ширине – 20 mm

Таблица 8.9 Основни подаци испитиваних залемљених узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
ЛС ₁	100	20	5	100	-	16600	101.2	20	4.5	90
ЛС ₂	100	20	5	100	31600	31600	105.2	19.4	4.9	95.06
ЛС ₃	100	20	5	100	-	28500	101	19.9	4.9	97.51

Таблица 8.10 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , МПа	Горња граница течења R_{eH} , МПа	Издужење A, %	Сужење Z, %
ЛС ₁	160	-	1.2	10
ЛС ₂	316	-	5.2	4.94
ЛС ₃	285	-	1.0	2.49



а)



б)

Слика 8.9 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања

2. Узорак ширине – 10 mm**Таблица 8.11** Основни подаци испитиваних заземљених узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
ЛС ₄	60	10	5	50	-	13000	61.2	9.9	4.9	47.51
ЛС ₅	60	10	5	50	-	8500	61.1	9.9	4.8	47.52
ЛС ₆	60	10	5	50	-	14000	61.2	9.9	4.9	48.51

Таблица 8.12 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , MPa	Горња граница течења R_{eH} , MPa	Издужење A, %	Сужење Z, %
ЛС ₄	260	-	2.0	2.98
ЛС ₅	170	-	1.83	4.96
ЛС ₆	280	-	2.0	2.98

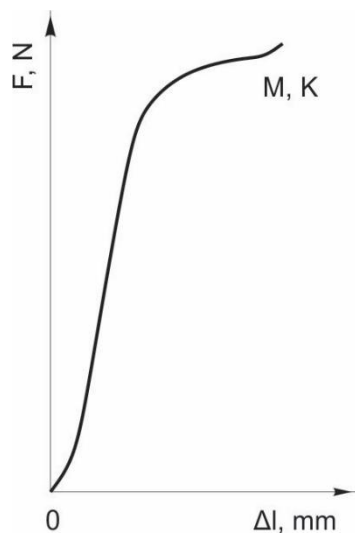


а)



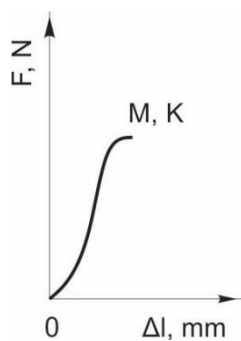
б)

Слика 8.10 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после киданја



$$F_M = 16600 \text{ N}, \Delta l_{\max} = 1.2 \text{ mm}$$

Слика 8.11 Дијаграм испитивања затезањем залемљеног споја – шири узорак



$$F_M = 13000 \text{ N}, \Delta l_{\max} = 1.2 \text{ mm}$$

Слика 8.12 Дијаграм испитивања затезањем залемљеног споја – ужи узорак

8.1.4 Лемљени спој - нискоугљенични челик/лем 1

Напред наведени узорци су затим пресечени по средини, слично као при заваривању, припремљен је жлеб и спојени су заваривачким лемљењем додатним материјалом (лемом) потпуно различитих особина од основног материјала (лемом 1 – тзв. "сребрним лотом" – AgCuZn – 20/44/36). Затим су изведена испитивања затезањем тако залемљених узорака (епрувета) различите ширине. У таблицама 8.13 до 8.16 наведени су основни подаци о припремљеним узорцима и добијена најважнија својства отпорности и способности деформације залемљених узорака затезањем. На сликама 8.13 до 8.16 дати су фотографски прикази припремљених узорака пре и после кидања, као и карактеристични дијаграми затезања.

1. Узорак ширине – 20 mm

Таблица 8.13 Основни подаци испитиваних залемљених узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
ЛС ₁	100	20	5	100	-	26700	100.5	19.8	4.8	95.04
ЛС ₂	100	20	5	100	-	23500	100.8	19.9	4.8	95.52
ЛС ₃	100	20	5	100	-	26500	101.1	19.9	4.9	97.51

Таблица 8.14 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , МПа	Горња граница течења R_{eH} , МПа	Издужење A, %	Суужење Z, %
ЛС ₁	267	-	0.5	4.96
ЛС ₂	235	-	0.8	4.48
ЛС ₃	265	-	1.1	2.49



а)



б)

Слика 8.13 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања

2. Узорак ширине – 10 mm**Таблица 8.15** Основни подаци испитиваних заземљених узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
ЛС ₄	60	10	5	50	-	11600	60.3	9.9	4.8	47.52
ЛС ₅	60	10	5	50	-	12200	60.5	9.8	4.9	48.02
ЛС ₆	60	10	5	50	-	12500	60.4	9.9	4.9	48.51

Таблица 8.16 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , МПа	Горња граница течења R_{eH} , МПа	Издужење А, %	Сужење Z, %
ЛС ₄	232	-	0.5	4.96
ЛС ₅	244	-	0.83	3.96
ЛС ₆	250	-	0.67	2.98

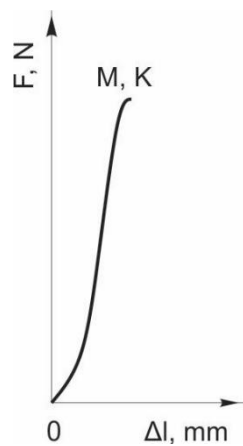


а)



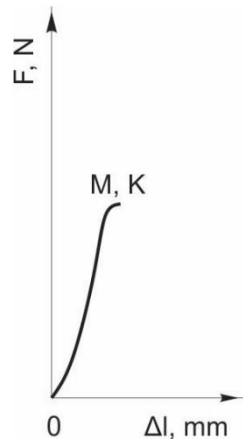
б)

Слика 8.14 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања



$$F_M = 26700 \text{ N}, \Delta l_{\max} = 0.5 \text{ mm}$$

Слика 8.15 Дијаграм испитивања затезањем залемљеног споја – шири узорак



$$F_M = 12200 \text{ N}, \Delta l_{\max} = 0.5 \text{ mm}$$

Слика 8.16 Дијаграм испитивања затезањем залемљеног споја – ужи узорак

8.1.5 Лемљени спој - нискоугљенични челик/лем 2

Напред наведени узорци су затим пресечени по средини, слично као при заваривању, припремљен је жлеб и спојени су заваривачким лемљењем додатним материјалом (лемом) потпуно различитих особина од основног материјала (лемом 2 – тзв. "сребрним лотом" – AgCuZn – 30/44/36). Затим су изведена испитивања затезањем тако залемљених узорака (епрувета) различите ширине. У таблицама 8.17 до 8.20 наведени су основни подаци о припремљеним узорцима и добијена најважнија својства отпорности и способности деформације. На сликама 8.17 до 8.26 дати су фотографски прикази припремљених узорака пре и после кидања.

1. Узорак ширине – 20 mm

Таблица 8.17 Основни подаци испитиваних залемљених узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
ЛС ₁	100	20	5	100	-	26000	100.5	19.9	4.9	97.51
ЛС ₂	100	20	5	100	-	30400	101.5	19.9	4.8	95.52

Таблица 8.18 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , МПа	Горња граница течења R_{eH} , МПа	Издужење A, %	Сужење Z, %
ЛС ₁	260	-	0.5	2.49
ЛС ₂	304	-	1.5	4.48



а)



б)

Слика 8.17 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања

2. Узорак ширине – 10 mm**Таблица 8.19** Основни подаци испитиваних заземљених узорака (епрувета)

Узорак	l_0 , mm	b_0 , mm	s_0 , mm	S_0 , mm ²	F_{eH} , N	F_M , N	l_k , mm	b_k , mm	s_k , mm	S_k , mm ²
ЛС ₄	60	10	5	50	-	12500	60.3	9.9	4.9	48.51
ЛС ₅	60	10	5	50	-	13400	60.3	9.8	4.9	48.02

Таблица 8.20 Најважнија својства отпорности и способности деформације

Узорак	Затезна јачина R_m , МПа	Горња граница течења R_{eH} , МПа	Издужење A, %	Сужење Z, %
ЛС ₄	250	-	0.5	2.98
ЛС ₅	268	-	0.5	3.96



а)

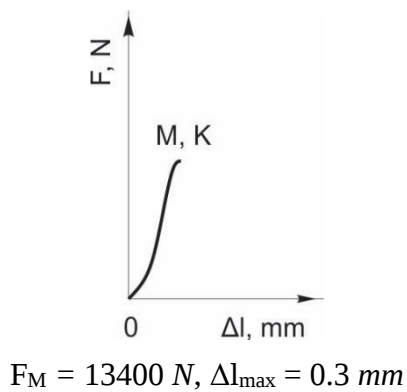


б)

Слика 8.18 Фотографски приказ испитиваних узорака а) пре и б) после кидања



Слика 8.19 Дијаграм испитивања затезањем залемљеног споја – шири узорак

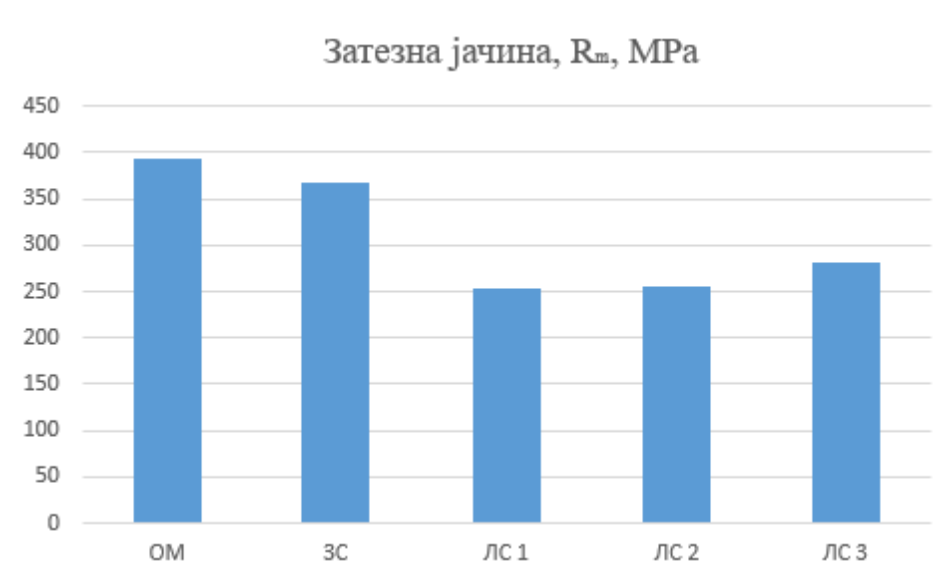


Слика 8.20 Дијаграм испитивања затезањем залемљеног споја – ужи узорак

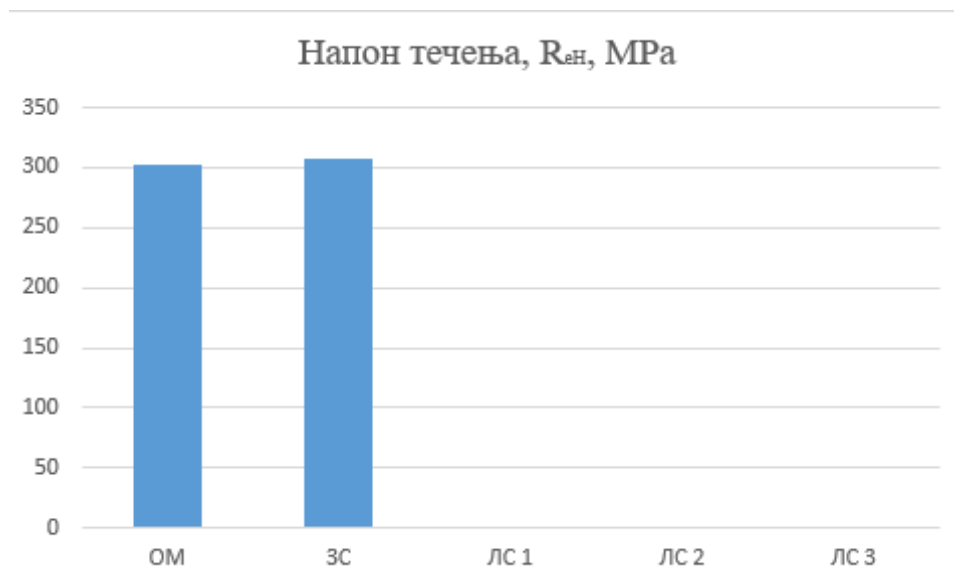
8.1.6 Коментар добијених експерименталних резултата

На основу резултата добијених експеримената могу се дати следићи коментари:

1. Резултати добијени затезањем специјално припремљеног узорка из основног материјала су очекивани и у границама су за нискоугљенични меки челик, осим неких незнатних одступања који се могу приписати и субјективним разлозима. Напомињемо да су узорци/епрувете припремани ласерским сечењем.
2. Резултати добијени затезањем заварених узорака од наведеног челика су такође очекивани и у границама су за дати нискоугљенични меки челик, одабрани метод заваривања и додатни материјал, осим у једном случају где узрок може бити и лоша припрема узорака/епрувета али и лоше изведен спој.
3. Кад су у питању лемљени спојеви, остварени са три додатна материјала/лема, меродавна је била само затезна јачина споја, граница течења није била изражена, али су добијене доста неповољне вредности издужења и сужења. То се може тумачити врстом изведеног споја (сучеони) где је попречни пресек споја био релативно мали. Затезна јачина лемљених спојева је нешто мања у односу на затезну јачину заварених спојева.
4. На основу наведеног, јасно се може донети очекивани закључак да залемљени спојеви нису упоредиви са завареним спојевима, али се овај вид спајања итекао користи у техници, посебно код тешко или условно заварљивих материјала (нпр. конструкционог челика и тврдог метала и тсл.), где је примена заваривања отежана или чак неприменљива.
5. На сликама (8.21-8.24) дат је хистограмски приказ средњих вредности затезне јачине (чврстоће), напона течења, издужења и сужења за основни материјал (ОМ), заварени спој (ЗС) и три залемљена споја различитим додатним материјалима (ЛС₁, ЛС₂, ЛС₃).



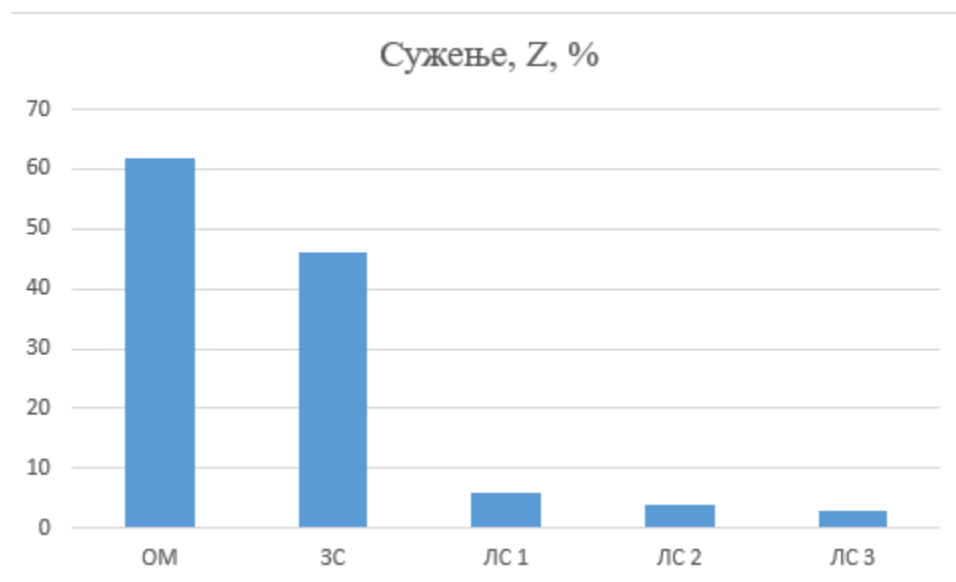
Слика 8.21 Хистограмски приказ средње вредности затезне јачине



Слика 8.22 Хистограмски приказ средње вредности напона течења



Слика 8.23 Хистограмски приказ средње вредности издужења



Слика 8.24 Хистограмски приказ средње вредности сужења

9. Закључак

Лемљење је настарији начин спајања материјала у чврстом стању. То је процес стварања нераздвојиве везе спајањем основних материјала у чврстом стању, при чему спој настаје попуном зазора између основних материјала растопљеним додатним материјалом – лемом и његовим очвршћивачем, по правилу уз присуство топителја.

Бронза и бакар су спајани лемљењем још 2500. година пре Христа. Примена започиње у индустријској производњи од половине двадесетог века, а посебан раст бележи са општим индустријским развојем, посебно електротехнике, електронике и рачунарске опреме.

Тако је данас лемљење широко примењено у космичкој и авионској техници, прецизној механици, електроници, производњи расхладних уређаја и климатизације, у индустрији широке потрошње, изради накита и тсл. Због економичности и погодности за аутоматизацију и механизацију, значајно је примењено у великосеријској и масовној производњи.

Уопштено узевши, предности лемљења као савременог техничко-технолошког поступка спајања материјала су:

- релативно мала потрошња енергије;
- велика брзина, односно висока економичност и продуктивност; могућност аутоматизације и механизације;
- могућност спајања великог броја метала и њихових легура, у различитим међусобним комбинацијама метала, неметала, једноставних и сложених, танкозидних, као и дебелозидних радних предмета;
- тачност и велика прецизност спајања;
- могућност истовременог лемљења и прописане термичке обраде;
- ниски заостали унутрашњи напони и деформације, због релативно малог уноса топлоте и незнатних структурних промена основног материјала;
- лако попуњавање веома уских зазора у споју, посебно коришћењем ефекта капиларности;

Поред наведених предности, лемљење има и бројне мане које ограничавају његову употребу. То се првенствено односи на механичке особине споја, које су обично знатно ниже од оних које се постижу спајањем заваривањем, склоност ка електрохемијској корозији због различитих електродних потенцијала основног материјала и лема, различита боја основног материјала и споје и др.

У осмом поглављу изведена су обимна експериментална испитивања специјално припремљених узорка/епрувета из основног материјала-нискоугљеничног челика, као и заварених и залемљених спојева. Добијени су очекивани резултати при испитивању затезањем. Основни материјал и заварени спој имају предност над залемљеним спојевима за дати конструкциони челик, али је и установљено/доказано да није препоручљиво користи лемљење за спајање добро заварљивих челика, већ напротив за спајање условно и

тешко заварљивих челика и у ширем смислу материјала, где је примена заваривања отежана или чак немогућа.

10. 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*, помоћни универзитетски уџбеник, друго допуњено и проширено издање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
3. М. Јовановић, В. Лазић: *Практикум гасног (ГПЗ) и аргонског (ТИГ) заваривања*, помоћни универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
4. А. Мајсторовић, М. Јовановић: *Основи заваривања, лемљења и лепљења*, Научна књига, Београд, 1991.
5. А. Седмак, В. Шијачки-Жеравчић, А. Милосављевић, В. Ђорђевић, М. Вукићевић: *Машински материјали – други део*, Машински факултет, Београд, 2000.
6. *Меко и тврдо лемљење*, Завод за заваривање Београд, радни материјал, број документа 1.16, Београд, 2017.
7. О. Поповић, Р. Прокић Цветковић: *Поступци заваривања*, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2016.
8. О. Поповић, Р. Прокић Цветковић: *Металургија заваривања*, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2019.
9. Р. Вуловић, В. Лазић, М. Јовановић, Д. Адамовић: *Електроотпорско лемљење месинганих и нискоугљеничних челичних лимова*, Застава-часопис за науку и праксу, Vol. 18, No. 41, pp. 51-57, ISSN 0352292, 2006.
10. V. Lazić, D. Arsić, M. Đordjević, R. R. Nikolić, B. Hadzima: *Joining of copper alloys and low-carbon steels by electrical resistance spot brazing*, International Conference on Engineering Sciences and Technologies - ESaT2015, Tatranska Štrba, Slovakia, 2015, 27-29 May, pp. 137-140, ISBN 978-80-553-2042-7.
11. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
12. https://www.google.rs/search?q=soft+brazing&safe=active&rlz=1C1GGRV_srRS751RS751&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiJhqqq25TeAhWKjqQKHVomAJEQ_AUIDigB&biw=1920&bih=969#imgsrc=MoXe8Ypwib3uuM: приступљено 12.12.2020. године.