

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**

**Милош А. Данас**

**Поређење технологија наваривања делова  
машинских конструкција**

**мастер рад**

**Крагујевац, 2013.**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Мастер академске студије**

**Модул: Машинске конструкције и механизација**

**Предмет: Заварене и ливене конструкције**

**Број индекса: 364/2011**

**Милош А. Данас**

**Поређење технологија наваривања делова  
машинских конструкција**

**мастер рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

**1. Др Ружица Николић, редовни  
професор - ментор**

**2. \_\_\_\_\_**

**3. \_\_\_\_\_**

**Датум одбране: \_\_\_\_\_**

**Оцена: \_\_\_\_\_**

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да обради следеће теме:

1. Теоретска основа процеса заваривања и наваривања конструкцијских делова
2. Различите методе наваривања конструкцијских делова
3. Поређење метода наваривања са аспекта основног материјала
4. Поређење метода наваривања са аспекта примењеног додатног материјала
5. Поређење метода наваривања са аспекта примењеног поступка заваривања
6. Поређење метода наваривања са техно-економског аспекта
7. Могућност развијања оптималних метода наваривања конструкција

Препоручена литература:

- [1] Перовић З., *Заварене конструкције*, Универзитет Црне Горе, Подгорица, 2002.
- [2] Милосављевић М., М. Радојковић и Б. Кузмановић, *Основи челичних конструкција*, грађевинска књига, Београд, 1986.
- [3] Мајсторовић А. и М. Јовановић, *Основи заваривања, лемљења и лепљења*, Научна књига, Београд, 1991.
- [4] Јовановић М., В. Лазић, Д. Адамовић и Н. Ратковић, *Машински материјали*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у крагујевцу, Крагујевац, 2003.

ментор:

Др Ружица Николић, редовни професор

---

## РЕЗИМЕ

*Приликом експлоатације машинских конструкција долази до губитака радне способности одређених делова, који могу бити изазвани разним факторима. Како би делови машинских конструкција поново били радно способни, приступа се технологији наваривања. Применом наваривања, оштећени делови се брзо оспособљавају, а добијене карактеристике навареног дела су исте, па чак и неколико пута боље од карактеристика новог дела. У раду су описани начини губитка радне способности делова машинских конструкција и наведене су различите методе наваривања. Такође, у раду су извршена поређења метода наваривања са аспекта: основног материјала, примењеног додатног материјала, примењеног поступка заваривања и са техно-економског аспекта.*

**Кључне речи:** *заваривање, наваривање, поређење, основни материјал, додатни материјал, техно-економска анализа.*

## ABSTRACT

*During the exploitation of machine constructions, working capabilities of certain parts are lost, what could be caused by different factors. In order to make those parts of machine constructions capable to work again, technology of surfacing is applied. Applying of surfacing enables damaged parts to work and acquired characteristics of the surfaced part are the same, or even few times better than characteristics of the new part. The ways of losing the working capability of the parts of machine constructions and different methods of surfacing are described in this thesis. Also, the comparison of different surfacing methods is conducted, from different aspects: base metal, applied filler metal, applied surfacing procedure as well as from the techno economic aspect.*

**Key words:** *welding, surfacing, comparison, base metal, filler metal, techno-economic analysis.*

## Садржај:

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.0 Увод .....                                                                   | 1  |
| 1.1 Предности и недостаци заваривања .....                                       | 1  |
| 1.1.1 Предности заваривања .....                                                 | 1  |
| 1.1.2 Недостаци заваривања .....                                                 | 2  |
| 1.2 Историјски развој поступака заваривања .....                                 | 2  |
| 2.0 Теоретска основа процеса заваривања и наваривања конструкцијских делова..... | 5  |
| 2.1 Класификација начина заваривања .....                                        | 9  |
| 3.0 Губитак радне способности делова машинских конструкција .....                | 11 |
| 3.1 Узроци оштећења конструкцијских делова.....                                  | 11 |
| 3.2 Губитак радне способности настале услед лома .....                           | 12 |
| 3.3 Губитак радне способности настале услед дејства процеса корозије.....        | 14 |
| 3.4 Губитак радне способности услед триболошких процеса .....                    | 16 |
| 4.0 Различите методе наваривања конструкцијских делова .....                     | 19 |
| 4.1 Гасно наваривање.....                                                        | 19 |
| 4.2 Ручно електролучно наваривање .....                                          | 20 |
| 4.3 Наваривање у атмосфери заштитних гасова .....                                | 20 |
| 4.4 Наваривање плазмом .....                                                     | 22 |
| 4.4.1 Плазмено ТИГ-наваривање прашком .....                                      | 23 |
| 4.4.2 Плазмено ТИГ-наваривање жицом.....                                         | 23 |
| 4.4.3 Плазмено МИГ-наваривање .....                                              | 24 |
| 4.5 Наваривање под прашком и троском .....                                       | 24 |
| 4.5.1 Наваривање под прашком.....                                                | 24 |
| 4.5.2 Наваривање под троском .....                                               | 25 |
| 4.6 Напредне технологије наваривања трењем .....                                 | 26 |
| 4.6.1 Савремени поступци наваривања трењем.....                                  | 26 |
| 4.6.2 Наваривање трењем са нагнутом подлогом.....                                | 26 |
| 4.6.3 Наваривање трењем процесним ковањем .....                                  | 27 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.6.4 Наваривање трењем композитно - металних матрица.....                         | 27 |
| 4.6.5 Наваривање електронским снопом .....                                         | 27 |
| 4.6.6 Наваривање ласером.....                                                      | 28 |
| 4.6.7 Наваривање експлозијом .....                                                 | 28 |
| 5.0 Поређење метода наваривања са аспекта основног материјала .....                | 30 |
| 5.1 Избор основног материјала за спајање заваривањем .....                         | 30 |
| 5.2 Основни материјали за заваривање / наваривање и оцена њихове заварљивости .... | 31 |
| 5.3 Оцена заварљивости метала према примењеном поступку наваривања.....            | 36 |
| 6.0 Поређење метода наваривања са аспекта додатног материјала .....                | 40 |
| 6.1 Класификација додатних материјала .....                                        | 40 |
| 6.1.1 Додатни материјали на бази железа.....                                       | 41 |
| 6.1.2 Додатни материјали на бази никла .....                                       | 44 |
| 6.1.3 Додатни материјали на бази кобалта .....                                     | 44 |
| 6.1.4 Додатни материјали на бази бакра.....                                        | 45 |
| 6.1.5 Додатни материјали на бази алуминијума .....                                 | 45 |
| 6.1.6 Додатни материјали на бази хрома .....                                       | 45 |
| 6.2 Додатни материјали у зависности од поступка наваривања .....                   | 47 |
| 7.0 Поређење метода наваривања са аспекта примењеног поступка заваривања .....     | 53 |
| 8.0 Поређење метода наваривања са техно-економског аспекта.....                    | 71 |
| 9.0 Закључак.....                                                                  | 75 |
| 9.1 Питања која мастер рад отвара .....                                            | 76 |
| Литература .....                                                                   | 77 |

## 1.0 Увод

Заваривање је процес израде нераздвојивог споја успостављањем међуатомских веза између делова који се заварују, при коме се појединачно или комбиновано користи топлотна и механичка енергија, а по потреби и додатни материјал. Поступци заваривања, који се најчешће користе у пракси, засновани су на локалном загревању материјала изнад температуре топљења, када заварени спој настаје очвршћавањем (електролучно), или на локалном загревању материјала до температуре топљења, када заварени спој настаје уз додатно деловање притиска (електроотпорно). Заваривањем је могуће спајање метала са металом, неметала са неметалом и метала са неметалом, али се у практичном смислу подразумева спајање метала са металом.

Заваривање је један од најважнијих технолошких процеса у савременој индустрији, посебно у машиноградњи, грађевинарству, бродоградњи и процесној индустрији. Најчешћа примена заваривања је за израду носећих металних конструкција спајањем појединих делова – лимова и профила, за израду процесне опреме – посуда и цевовода под притиском, и за поправку поломљених или истрошених металних делова. Израда одговорних конструкција сложенијег облика је могућа и закивањем и ливењем, али се применом заваривања остварују вишеструке предности.

### 1.1 Предности и недостаци заваривања

Заваривање има широку и веома разнородну примену у машинству и другим индустријским гранама. Омогућује израду машинских делова и целе конструкције спајањем делова једноставног облика. Даља је примена при репаратури или регенерацији похабаних делова и целе опреме.

На поступке спајања заваривањем отпада 40-50% светске производње челика (преко милијарду тона челика у 2005. години), а од тога 70% конструкција израђује се електролучним поступцима, 25% електроотпорским поступцима и 5% отпада на остале поступке.

#### 1.1.1 Предности заваривања

У односу на заковане конструкције, заваривањем се постиже уштеда у материјалу око 20%, а у односу на одливке 20–50%, при чему се скраћује време израде. С обзиром на то да се код закованог споја сила која делује у једном лиму преко закивака преноси на други лим, јасно је да је код носећих спојева потребан већи број одговарајуће распоређених закивака, што компликује њихову израду. Осим тога, да би се остварила квалитетна закована веза потребан је релативно велики преклоп, што повећава масу конструкције. Заварени спој је стога боље техничко решење, под условом да је добро изведен, што није увек једноставно постићи.

Предности заваривања спојева јесу једноставније конструкције, могућност примене нових, економски оправданих концепата конструкције, замењују одливке и откивке уз одређене економске предности. Применом аутоматизације и механизације могуће је повећати продуктивност поступака заваривања. Применљивост и могућност брзе реализације конструктивних пројеката и освајања производа, снижавање производних трошкова могуће је остварити процесом заваривања.

### **1.1.2 Недостаци заваривања**

Тешкоће које се јављају при изради заварених конструкција су првенствено последица примене топлотне енергије у уско омеђеном појасу заварених делова - локално загревање. Поступак заваривања се одвија поступно, у правцу завара, чиме је ток температуре веома неравномеран - настаје неравномерно температурско поље.

Услед утицаја температуре долази до промене структуре и механичких особина завареног споја. При бржем хлађењу шава челика са повишеним садржајем угљеника, јавља се опасност од закаљивања, то јест, од настанка кртих фаза у зони утицаја топлоте и у основном материјалу. Услед неравномерног хлађења и загревања настаје опасност од појаве унутрашњих напона и деформација. На квалитет шава, његову поузданост као и моћ ношења безусловно утичу скривене грешке у шавовима.

Мане заваривања представљају проблеми економичности као што су скупа текућа, процесна и накнадна термичка обрада при изради одговорних конструкција од закаљивих метала и легура, скупа текућа или накнадна контрола, скуп стручни кадар и слично. У мане заваривања убрајају се и разне опасности при раду попут електричне струје, електричног лука, гасног пламена, видљивог и невидљивог зрачења.

Међутим, технологије спајања материјала код којих се топлотна енергија не користи или се користи у мањој мери (заваривање притиском или комбинацијом притиска и топлоте, лемљење и лепљење) не дају спојеве довољне чврстоће за примену у одговорним конструкцијама, или су сувише скупе, па се користе само у специфичним конструкцијама. Стога се за израду одговорних конструкција користи заваривање топљењем, при чему се посебно води рачуна о понашању материјала током термодеоформационог циклуса.

## **1.2 Историјски развој поступака заваривања**

Историјски посматрано, неки поступци заваривања су стари колико и откриће метала, као на пример ковачко заваривање гвожђа. Међутим, развој савремених поступака заваривања почиње крајем XIX века, а њихова значајна примена средином XX века.

Први успешни покушаји електролучног заваривања нетопљивом графитном електродом су били 1881. године у Француској (Демеритон – спајање оловних акумулаторских плоча) и 1882. године у Русији (Бенардос – заваривање челика струјом из акумулатора), [2]. Примена Бенардосовог поступка је остала на нивоу ограничене репаратуре и наваривања

због два проблема: први, због присуства честица угљеника од делимично истопљене графитне електроде, услед чега се добијао тврд и крт спој, и други, због апсорпције гасова (првенствено кисеоника и азота из ваздуха), што је неповољно утицало на квалитет споја [1].

Следећи значајан корак направио је руски инжењер Славјанов, који је 1889. године успешно применио топљиву электроду у електричном луку једносмерне струје, добијене посебним генератором. Тиме је отклоњен први од наведених проблема, што је омогућило квалитетније спајање два метална предмета. Други проблем је решио шведски инжењер Кјелберг 1907. године увођењем обложене електроде, што је омогућило да средином двадесетих година ручно електролучно заваривање постане основни поступак заваривања, [2]. С друге стране, у циљу заштите од околне атмосфере и постизања стабилнијег лука, тридесетих година у САД и СССР су развијени поступци електролучног заваривања топљивом електродном жицом под прашком, чиме је уједно значајно повећана и производност. Поступци електролучног заваривања у заштити инертних гасова су 1941. године (нетопљива волфрамова електрода) и 1948. године (топљива електродна жица) уведени у САД, док је активни гас (угљен-диоксид) први пут примењен 1953. године у СССР.

Сучеоно електроотпорно заваривање је први пут применио Томсон у САД 1886. године, док је тачкасто заваривање освојено 1905. године, а шавно 1922. године. Гасно заваривање је познато још од 1894. године, а његова шира примена почиње 1902. године, када је пронађен јефтин поступак добијања кисеоника из ваздуха, док је ацетилен добијен још 1892. године у Канади. Нешто касније, 1911. године, у САД је ацетиленски пламен коришћен за резање челика [2].

Специјални поступци заваривања су уведени у праксу углавном после Другог светског рата, у складу са технолошким развојем и потребама њихове примене. Тако се заваривање плазмом користи од 1955. године, заваривање трењем од 1956. године, заваривање електронским снопом од 1957. године, дифузно заваривање од 1959. године, заваривање ласером и заваривање експлозијом од 1960. године. Данас се сматра да је 98 поступака заваривања освојено и примењено у пракси, укључујући лемљење, према класификацији Америчког друштва за заваривање (AWS – American Welding Society), [2].

Осим конвенционалних (електролучно, електроотпорно и гасно) и специјалних поступака заваривања, и већ поменутих поступака сродних заваривању (резање, лемљење и лепљење), треба поменути и наваривање, као процес идентичан заваривању, који се не користи за спајање материјала, већ за наношења површинског слоја. Исту сврху има и метализација, с тим да је код ње процес наношење површинског слоја нешто другачији. Коначно, жлебљење као процес уклањања дела материјала са површине, који се често користи при изради кореног завара одговорних спојева, такође спада у поступке сродне заваривању.

У табели 1.1 дате су скраћенице свих поступака заваривања које су коришћене у даљем тексту.

| Назив поступка заваривања                             | Скраћеница |
|-------------------------------------------------------|------------|
| Ручно електролучно                                    | РЕЛ        |
| Електролучно заваривање под прашком                   | ЕПП        |
| Гасно-пламено заваривање                              | ГПЗ        |
| Заваривање нетопљивом електродом у инертном гасу      | ТИГ        |
| Заваривање топљивом електродном жицом у активном гасу | МАГ        |
| Заваривање топљивом електродном жицом у инертном гасу | МИГ        |
| Заваривање у заштити гаса (Gas Metal Arc)             | ГМА        |

**Табела 1.1** Скраћенице поступака заваривања

## 2.0 Теоретска основа процеса заваривања и наваривања конструкцијских делова

Наваривање је процес наношења слојева метала на радне површине неких делова ради повећања њихове отпорности на хабање, ударни притисак и друге облике оптерећења [1]. Исто тако се наваривањем поправљају делови оштећени у раду, дорађују делови изграђени са грешкама и израђују неки нови производи као што су на пример двослојни лимови. У принципу се наварују само оне површине радних делова које су изложене највећем хабању, при чему је понекад могуће и вишеструко наваривање пре замене делова новим.

Због тога се уопштено наваривање користи за:

- регенерацију делова и уређаја наношења метала на површине оштећене трењем, хабањем, кавитацијом, корозијом и ломљењем,
- постизање тражених физичких или хемијских особина - на површинама појединих делова или њихових сегмената. У те особине спадају тврдоћа, отпорност према абразији, корозији и томе слично.

Век трајања великог броја машина и уређаја ограничен је услед трошења само појединих делова, па се зато и бирају различити материјали с циљем да се свим елементима обезбеди приближно исти век. То се до сада постизало побољшањем квалитета радних површина, термичком обрадом, на пример каљењем, цементацијом, нитрирањем, а у последње време наваривање све успешније замењује неке од ових поступака. Предност наваривања је што метал навра може бити различитог хемијског састава у односу на основни материјал.

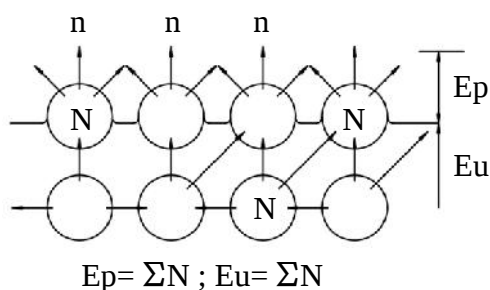
Искуства која су до сада стечена у примени технике наваривања подстичу на још већу примену овог поступка у разним гранама производње. На садашњем нивоу развијености заваривања и наваравања, економичније је организовати радионице за наваривање а смањити производњу нових резервних делова. Испитивања многих наварених делова су показала да они имају већу отпорност на хабање од нових делова, а да им је цена знатно нижа. Наваривањем се израђују облоге судова у хемијској индустрији, седишта вентила мотора са унутрашњим сагоревањем и друго. Исто тако се наваривањем поправљају ливачке грешке на челичним одливцима, одливцима од ливеног гвожђа, алуминијума и бронзе. Применом наваривања могуће је да се тражене особине на радним површинама добију наношењем скувих материјала на јефтинији, основни. Наваривање се заснива на полагању слојева додатног материјала на подлогу која се обично разликује по хемијском саставу када је у питању регенерација, а приближно је истог хемисјког састава када се поправљају одливци или одкивци. Отуда произилази да је потребно наносити наваре различитог хемијског састава и особина, што је могуће само ако се располаже широким асортиманом додатних материјала намењених само за наваривање.

Суштина заваривања је образовање металуршког споја створеног дејством међуатомских сила, које су узрок повезивања површине метала, то значи сила које веома ефикасно

одржавају узајамне положаје и растојања атома који образују кристалне решетке унутар дела. Идеалним телима, у смислу заваривања, сматрају се два тела савршено равних и чистих површина, истог или сличног типа кристалне решетке, исте или приближно исте вредности параметра решетке. Услов за настанак атомских веза, односно формирање завареног споја идеалних тела, је довођење површинских атома на растојање једнако параметру решетке. Ако се то оствари по целој додирној површини два метала настаће граница између њих и добиће се мање или више савршени спој. Истовремено такође обезбеђују стални облик металних предмета (супротно од механичких операција - закивање, везе остварене помоћу завртњева и друго).

Површински и потповршински слојеви знатно се разликују по својим особинама од унутрашњости материјала. Слојеви који раздвајају делове (објекте) који се додирују имају по правилу друкчију атомно-молекуларну грађу него ти предмети. Слободна површинска енергија представља вишак енергије на површини материјала над одговарајућом енергијом у његовој унутрашњости. Појам површинске појаве обухвата скуп појава везаних посебно за особине површинских слојева и јављају се као последица специфичних физичких услова у којима се налазе атоми и молекули у близини граничних површина. Површински слојеви поседују одређену слободну енергију, повећану активност, одређену оријентацију молекула, одређен хемијски састав који се знатно разликује од хемијског састава целог дела. Код свих површинских појава велику улогу игра промена површинске енергије.

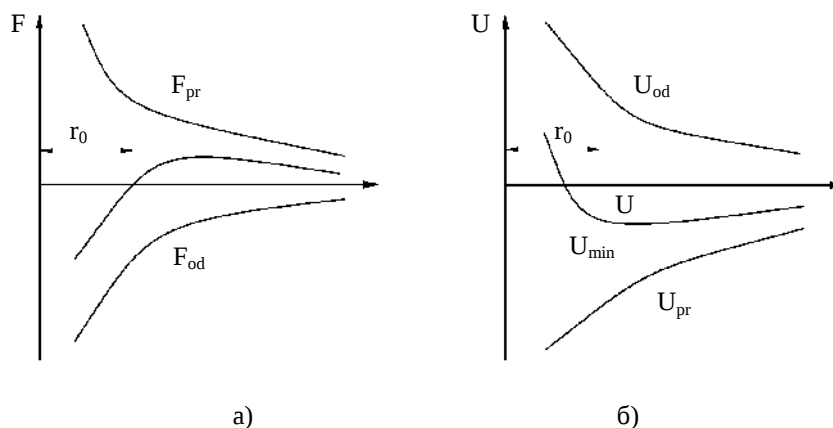
Изучавањем метала закључено је да су сви метали различите структуре, то јест унутрашња грађа метала (легуре) условљена је врстом кристалне решетке, атомским распоредом и присуством и размештајем структурних фаза. Међуатомске везе у чврстим металима одређују њихове физичке, хемијске и механичке особине а њихова енергија зависи од хемијског састава легуре као и од врсте кристалне решетке. У чврстом телу унутрашњи атоми су уравнотежени деловањем околних атома, док су спољни неуравнотежени и поседују површинску енергију, пошто се граниче са другом средином (слика 2.1). Уколико се доведе спољна енергија тада се стање посматраног система мења, а промена се испољава у већим амплитудама осциловања атома, највише на граничним површинама.



Слика 2.1 Приказ енергетског стања атома;  $E_p$  - површинска енергија,  $E_u$  - унутрашња енергија,  $n$  - површинска енергија атома,  $N$  - унутрашња енергија атома [3]

Довољно великим спољним енергетским побудама могуће је савладати такозване енергетске баријере између два комада метала и образовање заједничке металне везе, услед активација валентних електрона и формирања заједничког електронског облака [3].

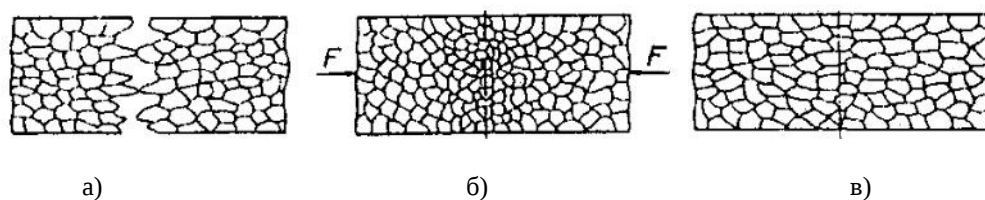
Ниједним поступком обраде није могуће свести средњу висину неравнина на ниво параметара кристалне решетке, већ се механичким притиском или довођењем топлоте могу атоми довољно примаћи како би настала атомска веза. У случају заваривања притиском (механичка енергија) током међусобног приближавања два тела настају електростатичке силе привлачења и одбијања услед дејства јона и електрона распоређених на граничним површинама и гравитациона сила. На неком растојању  $r_0$  укупне силе привлачења и одбијања,  $F_{pr}$  и  $F_{od}$ , су у равнотежи, слика 2.2а, при чему настаје највећа разлика одговарајућих потенцијалних енергија,  $U_{pr}$  и  $U_{od}$ , слика 2.2б, што се назива енергетском баријером. Равнотежно међуатомско растојање  $r_0$  приближно одговара параметру кристалне решетке, а даљим приближавањем граничних површина настаје метална веза.



**Слика 2.2** Зависност сила (а) и енергија (б) од међуатомског растојања  $r$

Заваривање притиском је процес спајања применом механичког дејства силе, статичког или динамичког карактера (слика 2.3). У пракси ови процеси спајања нису увек јасно разграничени. Ако се код појединих метода допуњују - спајање спада у поступке термо-механичког заваривања. Одатле може да се закључи да се спајање заваривањем остварује само истоветним деловањем два фактора:

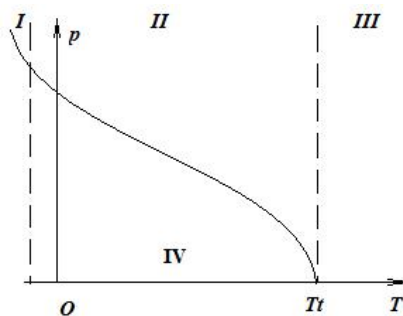
1. Међусобним приближавањем делова (лика 2.3а),
2. Довођењем потребне количине енергије, на пример притиска (слика 2.3б) и
3. Дифузијом и прекристализацијом (слика 2.3в).



**Слика 2.3** Фазе образовања споја притиском; а) довођење на потребно стање, б) дејство силе, в) дифузија и прекристализација

Довођењем топлотне енергије делови се загревају и омекшавају, тиме се повећава и пластичност, побољшавају дифузиони процеси па тиме расте и могућност да површински атоми лакше савладају енергетску баријеру. Са физичке тачке гледишта произилази да се спајање заваривањем може остварити деловањем притиска, довођењем топлоте и комбиновано.

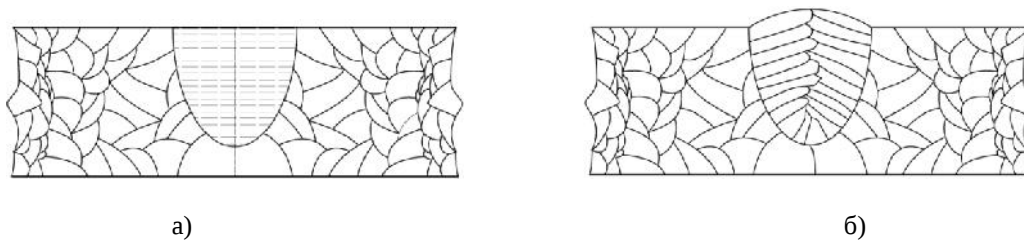
Дијаграмом притисак-температура могуће је приказати услов за образовање завареног споја и одредити граничне вредности подручја притиска и температуре за остваривање споја за сваки метал.



**Слика 2.4** Приказ граничних параметара заваривања; I-ограничена могућност заваривања, II-заваривање притиском уз загревање, III-заваривање топљењем, IV-недовољан притисак и температура

Према појавама које условљавају образовање завареног споја разликује се заваривање топљењем и заваривање притиском.

Заваривање топљењем је процес нераздвојивог спајања завариваних делова при температурама спајања вишим од температуре топљења уз примену додатног материјала или без њега (слика 2.5). Заваривање топљењем изискује снажне изворе топлоте за локално топљење метала, практично се користе покретни извори топлоте који се крећу дуж линије споја, како би се добио метални растоп-заваривачко купатило, чијом кристализацијом настаје шав.



**Слика 2.5** Заварени спој добијен топљењем; а) пре очвршћавања, б) после очвршћавања [1]

## 2.1 Класификација начина заваривања

За међусобно спајање материјала потребна је нека врста и количина енергије, под чијим утицајем може настати одређено кретање и премештање наелектрисаних честица, односно образовање заједничких веза на граничним површинама спајања. Независно од врсте енергије која се користи, била то механичка, хемијска, топлотна, увек је потребно да величина енергије буде већа од енергије потребне за активацију атома, то јест за њихово побуђивање као услов за међусобно спајање [1].

Због бројних начина поступака заваривања постоји већи број класификација, према: намени (заваривање, наваривање, метализација), агрегатном стању (топивом, притиском), врсти електрода (топљењем, нетопљивом, голом, обложеном, са језгром и слично), заштити растопа (без заштитне атмосфере или у заштитној атмосфери - инертног, активног гаса), стању електричног лука (са отвореним, покривеним луком и тако даље), врсти енергије.

У поступке заваривања притиском спадају: заваривање трењем, хладно заваривање, ултразвучно заваривање, заваривање експлозијом и друго.

У поступке заваривања топљењем спадају: гасно заваривање (заваривање пламеном или окси-ацетиленско заваривање), електричним луком обложеном електродом (или ручно-електролучно заваривање - РЕЛ, у неким литературама се означава и као Е - заваривање), аутоматско заваривање под прахом (ЕПП), електричним луком у заштитном гасу (МИГ; МАГ; ТИГ), електролучно под троском (ЕПТ), термитно (алуминотермијско) заваривање, плазмено заваривање, заваривање електронским снопом, ласерско заваривање и друго. Спој добијен топљењем карактеришу: нехомогеност структуре, хемијског састава, физичких и механичких особина, на основу чега долази до промене механичких и технолошких особина у околини зоне утицаја топлоте (ЗУТ-а) и у шаву. Нарочито неповољно утичу појава унутрашњих грешака у металу шава, структурна промена у ЗУТ-у, појава унутрашњих напона и деформација, физичке и хемијске примесе у металу шава у току заваривања, ливена структура метала шава.

Термо-механичко заваривање остварује се превођењем зоне спајања у стање пластичности и затим увођењем силе притиска. Сила притиска може бити ударна (ковачко заваривање),

или се уводи постепено: заваривање електричним отпором, плазмено заваривање притиском, термитно заваривање притиском, индукционо заваривање притиском.

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

**Табела 2.1** Класификација начина заваривања према врсти енергије [1]

Треба нагласити да се у пракси понекад примењује међусобно комбиновање наведених врста енергије, зависно од механизације и начина извођења, тако да подела није оштро условљена, па то значи да се неки поступак може сврстати у другу групу.

По методи заштите заваривање може бити у ваздуху, вакууму, заштитним гасовима, под прахом, са топитељем и са комбинованом заштитом. Заштитни гасови могу бити активни ( $CO_2$ ,  $N_2$ , водена пара, смеша активних гасова, инертни гасови (Ar, He, Ar+He) и такође смеша активних и инертних гасова.

### 3.0 Губитак радне способности делова машинских конструкција

#### 3.1 Узроци оштећења конструкцијских делова

Постоји велики број различитих узрока који изазивају разна оштећења делова и елемената машинских конструкција. Карактеристике оштећења су доста различите, па је због тога тешко сачинити класификацију оштећења машинских елемената. Оштећења која се јављају на деловима и елементима машинских конструкција најчешће се деле на [4]:

- природна,
- конструкцијска,
- производна,
- експлоатацијска, и
- поремећајна.

Природна оштећења настају услед сложеног физичко-механичко-хемијског процеса трења и природног трошења материјала које се јавља на контактним повшинама машинских делова и елемената при експлоатацији машина и механизма. Услед овог процеса засигурно долази до неизбежних оштећења тако да овај процес није могуће отклонити. Различитим методама које се примењују у пракси, могуће је ојачати површине како би се успорио процес хабања. У ове методе пре свих спадају ојачање хладним пластичним деформисањем (ковањем, ваљањем, бомбардовањем челичном сачмом...), разним врстама каљења, хромирањем, цементирањем, нитрирањем и другим поступцима.

Конструкцијска оштећења на машинским деловима и елементима јављају се као резултат неправилне конструкције (грешке облика, неправилан избор зазора, материјала, термичке и завршне обраде и друго). Најчешћи узрок лома многих машинских делова и елемената је управо грешка конструктора при процени утицаја концентрације напона на њихову чврстоћу. Такви примери су: жљеб за клин, прелаз са једног пречника на други или заварени спојеви који су озбиљни извори концентрације напона. Појаву различитих оштећења могуће је смањити изузетно добрим познавањем материјала, начином израде, завршне обраде, хемијско-термичке заштите, експлоатационих карактеристика машинских делова и елемената као и применом поузданих, прецизних и свеобухватних прорачуна.

Производна оштећења настају услед грешака и одступања од технолошког процеса израде машинских делова и елемената. Ова оштећења најчешће настају услед неправилне замене материјала, одступања од података захтеваних цртежима, скривених дефеката у материјалу, непоштовања услова обраде, склапања и слично. Ломови који се јављају у процесу експлоатације машинских конструкција практично су ретки, али њихов најчешћи узрок је појава лункера и шупљина полуфабриката. Услед израде и склапања делова и елемената машинских конструкција често остају трагови од монтажних рисева, обележавања, од проласка резног алата, који су (посебно код зупчаника и других машинских елемената окаљених на високу тврдоћу) извори концентрације напона.

Поремећајна оштећења, у највећем броју случајева, јављају се као резултат хаварије при управљању машинским системом услед непажње радника, услед замора материјала и његовог преоптерећења. Појава вибрација може бити чест узрок лома машинских делова и елемената. На пример, узрок заморног разарања зупчаника је релативно висок напон изазван појавом питинга, а такође и променљивом оптерећењу на савијање у ослабљеним, похбанним зупцима. Заморне прслине често настају и услед дејства пресованог склопа. Ова оштећења могу настати као резултат неправовременог откривања и отклањања других врста оштећења (на пример, недозвољена истрошеност радних површина, конструкцијска, неметални укључци и други дефекти у језгру машинског елемента и слично) при техничким прегледима или ремонту машинског система.

Приликом експлоатације машинских конструкција, иако су предузете све мере да се одржи што већа радна способност, засигурно долази до губитка радне способности, то јест до отказа делова и елемената машинске конструкције у одређеном току века трајања система. Експлоатацијска оштећења настају услед неравномерног и неправилног подмазивања елемената и склопова, неправилног управљања, слабљења веза елемената и склопова, постојања влаге, утицаја температуре, радијације, светлости, лошег горива, утицаја пламена ватре, ултравиолетног зрачења и тако даље.

Да би одређена машинска конструкција била поново радно способна, потребно је извршити њену поправку заменаом одређеног дела или елемента новим или репаратуром оштећених елемената или делова.

### **3.2 Губитак радне способности настале услед лома**

Лом конструкције почиње на месту најнеповољније комбинације слабог места и локалних напона који се могу битно разликовати од просечних напона по пресеку компоненте. За откривену прслину, која се образује у таквом подручју, или за постојећу почетну прслину, која потиче из производње, конструкција може бити сигурна или несигурна што зависи од понашања прслине при ширењу. Основни разлог лома материјала је појава прслина и њена пропагација (ширење и раст) при дејству одређеног напонског стања критичне величине прслине, када је више немогуће зауставити њену пропагацију што неизбежно доводи до појаве лома.

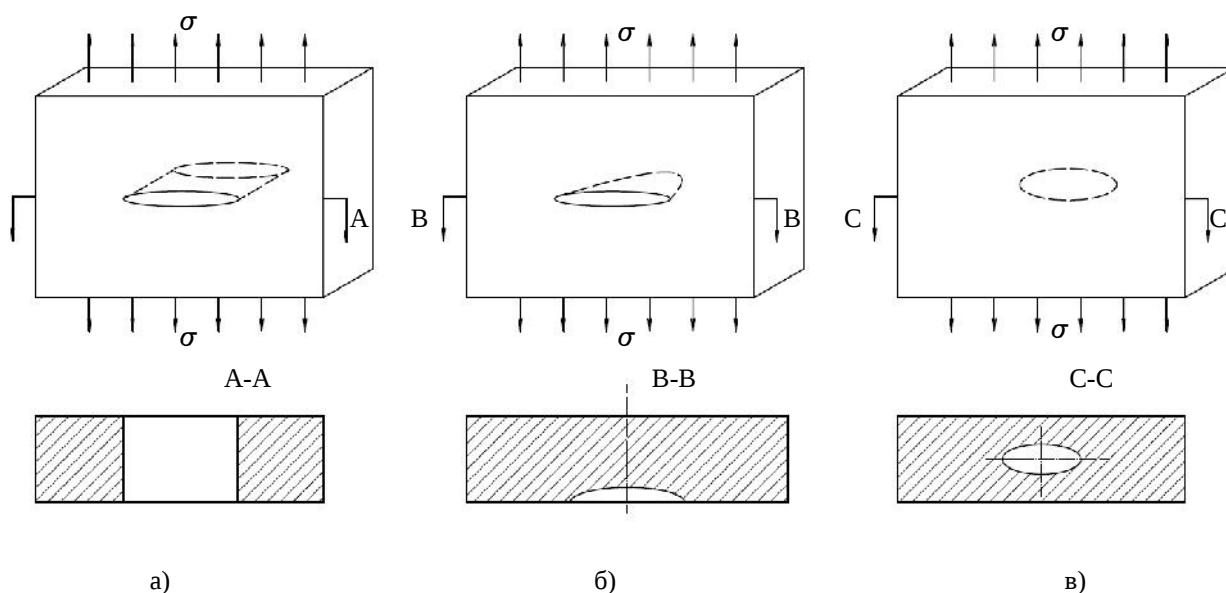
Одређивање основних параметара механике лома се заснива на дефинисању концентрације напона у околини врха прслине. Постоји више врста лома материјала, као што су дуктилни, заморни или крти, од којих је најопаснији крти лом. Фактор интензитета напона одређује отпорност неког материјала према појави кртог лома. Он дефинише напон, деформације и померања око врха прслине. Величина фактора интензитета напона одређује жилавост лома и када достигне критичну вредност долази до даљег ширења прслине и лома материјала [5].

Теоријско одређивање параметара механике лома представља сложен математички задатак, нарочито код конструкција са сложенom геометријом у условима оптерећења. За

одређивање отпорности различитих материјала према појави кртог лома користе се аналитичке, нумеричке и експерименталне методе [5, 6].

Као главни узрочници прслина у материјалу су дефекти који се налазе у металу на нивоу атомске решетке као што су: дислокације, атомске шупљине (мањак једног атома у решетки или, такозвани Шоткијев (Schottky) дефекат), страни атом у решетки, или атом померен са свог места (интерстицијални атом, такозвани Френкелов (Frenkel) дефект) [8]. Зависно од материјала прслине се могу јавити као последица хемијских реакција, променљивог температурског поља, услед динамичких и статичких оптерећења и слично.

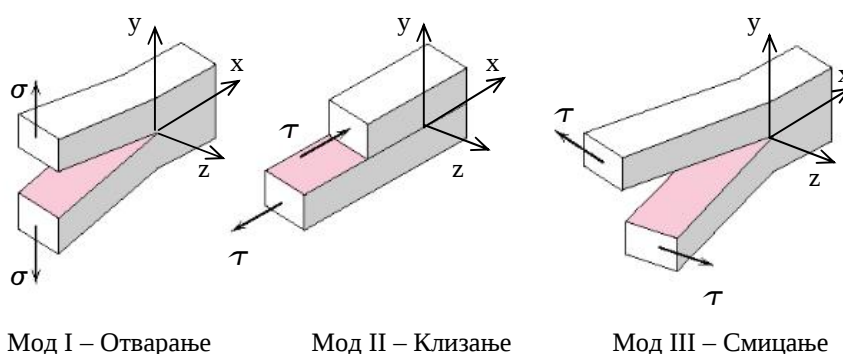
Под прслином се, начелно, подразумева шупљина у телу образована без уклањања материјала и ограничења са две наспрамне површине (страни) чије је растојање неупоредиво мање од димензија њене површине. Заједничка контурна линија површина прслине назива се фронт прслине (слика 3.1). Како су стварне прслине најчешће неправилне по облику, на слици 3.1 су дати најкарактеристичнији облици раванске прслине идеализованог фронта који се усвајају при теоријским разматрањима. Тако се на пример, фронт средишне пролазне прслине (слика 3.1а) и ивичнепролазне прслине идеализује као права линија, фронт површинске прслине као полуелипса (слика 3.1б) а фронт скривене (унутрашње) прслине као елипса (слика 3.1в). Фронт прслине може бити атомски оштар и атомски затупљен, при чему далеко већу опасност од појаве лома представља атомски оштар фронт прслине.



**Слика 3.1** Основни појавни облици раванске прслине: пролазна (а), површинска (б) и скривена (унутрашња) (в)

Површине прслине су, због своје близине, од доминантног утицаја на расподелу напона у непосредној околини фронта прслине. Остале контуре, то јест границе тела, и оптерећења

на њима утичу само на интензитет тог локалног поља напона. У том смислу одређивање поља напона и деформација у околини фронта прслине се може представити са три основна облика оптерећења тела са прслином односно, уопштеније, карактеристична померања површина прслине као последице таквог оптерећења (слика 3.2). За Декартов координатни систем постављен тако да је раван прслине у  $xz$ -равни, а фронт прслине паралелно са  $z$ -осом, је систем: спољње оптерећење - померање површина прслине за мод I (отварање прслине) симетричан у односу на  $xu$  и  $xz$ -раван. Код смицања у равни клизања (мод II), систем је анти-симетричан у односу на  $xz$ -раван, али је симетричан у односу на  $xu$ -раван. Код смицања ван равни (мод III) систем је анти-симетричан у односу на  $xu$ -раван и  $xz$ -раван. Сваком од ова три облика оптерећења одговара одређено поље напона и деформација у околини чела прслине и њихова суперпозиција је довољна за описивање напонско-деформационог поља сложених тридимензионих проблема. Како су у пракси најчешћи ломови настали при развоју прслине њеним отварањем, цепањем (мод I) то ће се овом типу ломова посветити посебна пажња [7].



**Слика 3.2** Основни облици оптерећења тела са ивичном пролазном прслином и померања њених површина [7]

### 3.3 Губитак радне способности настале услед дејства процеса корозије

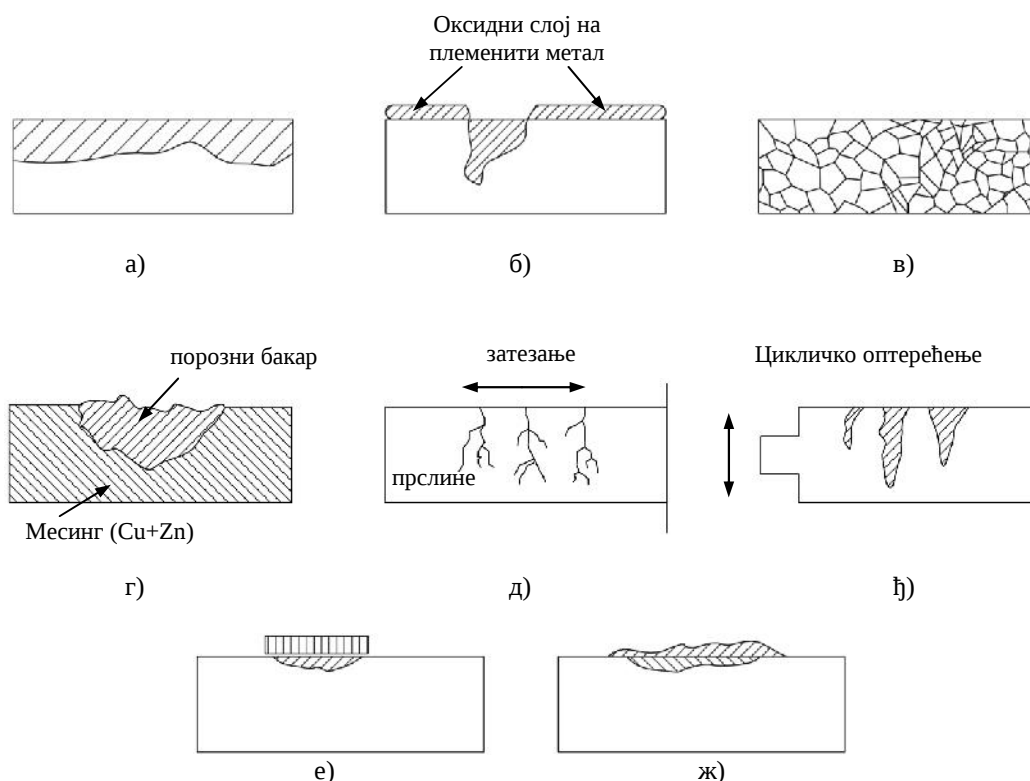
Корозија се може дефинисати као разарање материјала које настаје сложеним физичко-хемијским дејством околне средине. Корозија метала представља обрнути процес од поступка добијања метала и она представља природну појаву повратка метала у почетно равнотежно стање, при чему систем смањује слободну енергију [9]. Овај хемијски процес јавља се на површини елемената и делова који су изложени процесу експлоатације и он може бити примарни или секундарни узрочник губљења материјала.

Корозија метала не јавља се само услед експлоатације машинских система, већ је то процес који се одвија код материјала услед дејства спољашње средине, услед које се погоршавају физичко-хемијске особине материјала. Познавање проблема корозије је важно због чињенице да су годишњи губици дејством корозије око 25 милиона тона материјала [9]. Избором одговарајућих метода могуће је умањити губитке услед корозије, као на пример, избором материјала веће корозионе отпорности, смањењем агресивности

атмосфере, воде и тла путем филтрације сагорелих гасова и загађеног ваздуха из индустријских погона као и промарним пречишћавањем и неутрализацијом отпадних вода и такође применом различитих врста заштитних превлака које се наносе на металне конструкције.

У зависности од начина нападања метала, корозија може бити:

- Равномерна, који се дефинише готово уједначеним губитком метала по целој површини изложеној корозији (слика 3.3),
- Неравномерна, кад материјал бива нападан само на одређеним местима (слика 3.3б до 3.3ж).



**Слика 3.3** Шематски приказ разних облика корозије: а) равномерна корозија, б) питинг корозија, в) међукристална корозија, г) селектована корозија, д) напонска корозија, е) заморна корозија, ж) корозија испод прљавштине

**Равномерна корозија** (слика 3.3а) је термин који се користи за многе облике корозије код којих је карактеристика таква да је цела површина метала нападнута у истој мери, па се на основу ове карактеристике може лако проценити радни век неког дела те не треба стрепити од неочекиваних ломова.

**Питинг корозија** (слика 3.3б) углавном се јавља код метала који имају заштитну превлаку. Она настаје као последица оштећења превлаке, услед које аналогно настају јамице, којих може бити више по површини изложеној корозији.

Међукристална корозија (слика 3.3в) настаје због различите осетљивости граница зрна и самих зрна на корозиони медијум. Типичан пример је аустенитни нерђајући челик, на чијим се границама зрна, при загревању од 480-760°C, излучују карбиди хрома. Због тога границе зрна постају аноде, односно растварају се у електролиту, те због тога имају мању корозиону отпорност.

Селективна корозија (слика 3.3г) напада једну фазу у двофазним легурама, или само један мање племенит метал у једнофазним легурама типа чврстог раствора. Пример који се најчешће јавља је губитак цинка у месингу са више од 15%. Племенитији метал, у овом случају бакар, остаје непромењен, док се корозиони процес одвија у галванском пару у којем је бакар катода, а легура анода. Како цинк одлази у електролит, у легури остаје „сунђераст” бакар знатно лошијих механичких особина.

Напонска корозија (слика 3.3д) се углавном јавља код двофазних и вишефазних легура, док се код чистих метала напонска корозија готово и не јавља (изузетак је чист метал у раствору своје соли). Она настаје при истовременом деловању затежућег напона (спољашњег и унутрашњег) и локалне корозије. Напонска корозија јавља се и код угљеничних челика у јаким алкалним растворима (каустична крстост), код аустенитних челика, легура Al и Mg у присуству јона хлора и код месинга под утицајем трагова амонијака издвојеног на пример из пластичних маса и лакова који садрже аминоксидне групе ( $\text{NH}_2$ ).

Заморна корозија (слика 3.3ђ) јавља се као резултат комбинованог дејства цикличних напона и корозионог медијума. Отпорност метала процењује се на основу односа корозионе и заморне јачине у сланој води и нормалне јачине, чији је однос 0,2 за угљеничне челике, 0,5 за нерђајуће челике и 1 за бакар. овде може да се наведе и ерозиона корозија која најчешће настаје при транспорту флуида цевима.

Корозија у зазорима (слика 3.3е) напада метал у уским зазорима који постоје код многих склопова различитих метала и неметала.

Корозија испод страних материјала (слика 3.3ж) настаје на деловима метала прекривеним папиром, лишћем, песком, прашином, односно на оним местима где је отежан приступ кисеоника.

### **3.4 Губитак радне способности услед триболошких процеса**

У највећем броју случајева главни узрочници оштећења и отказа елемената техничких система су триболошки процеси. У основне триболошке процесе убрајају се контактни процеси, процеси трења, процеси подмазивања и процеси хабања.

Контактни процеси се одвијају при различитим условима остваривања контакта који се у пракси јављају као: номинална површина контакта, контурна површина контакта и реална (стварна) површина контакта. Природа контакта, која је динамична, услед

напонско-деформационих стања изазива промене у материјалу спрегнутих елемената. Услед међусобног релативног кретања спрегнутих елемената, на контактним површинама јављају се процеси трења. Уколико се на контактним површинама јави трећи елемент, то јест мазиво, тада се одвијају процеси подмазивања. Производ наведених процеса чини процес хабања [10].

Триболошке процесе карактеришу међусобно повезане процесе који се одвијају у околној средини. Трибо-технички систем представља триболошки процес који се одвија у контактним зонама. У зависности од начина одвијања триболошких процеса, технички системи могу бити трибо-механички и трибо-хемијски. Један трибо-механички систем сачињавају најчешће четири елемента, а то су: два чврста механичка елемента (могу бити металне или неметалне природе, различите врсте материјала, зависно од услова под којима се предвиђа њихово функционисање), мазиво (трећи елемент система који може делимично или потпуно да раздвоји контактне површине чврстих елемената или да повремено улази у зону контакта) и околна средина.

Триболошки процеси, који настају у зонама контакта елемената трибо-механичких система за време њиховог функционисања, развијају се већим или мањим интензитетом у зависности од структуре система и услова под којима он функционише. Последице развоја триболошких процеса у зонама контакта су појава трења у њима и хабање елемената трибо-механичких система. За савлађивање трења у трибо-механичким системима троши се значајни део енергије у индустријским транспортним системима. Због појаве хабања елементи трибо-механичких система морају бити повремено регенерисани или замењени новим. Да би машински део био радно способан неопходно је да се при пројектовању и изради примене одређена знања захваљујући којима ће се постићи рационалније и економичније искоришћење материјала и енергије, продужење радног век машинског дела, смањење трошкова за одржавање и слично.

Под појмом трење подразумева се, у основи, процес супростављања кретању тела. Ово супростављање тела може да се мери деформацијом средине у којој се тело креће или утрошком рада неопходног за остваривање кретања.

Трење које се јавља у зонама контакта елемената трибо-механичких система свих врста је спољашње трење. За решавање триболошких проблема у индустријским и транспортним системима познавање трења је од изузетног значаја. При обликовању предмета било којом врстом обраде деформисањем, у унутрашњости масе материјала јавља се унутрашње трење као последица релативног кретања између елементарних честица. Унутрашње трење јавља се и у другим случајевима деформисања чврстих тела. Унутрашње трење је процес успостављања релативног померања дела једног те истог тела [10].

Хабање се дефинише као прогресиван процес губитка материјала са контактних слојева елемената трибо-механичких система. Када се разматра процес хабања, у зони контакта трибомеханичких система свих врста, идентификују се и прате промене које настају на

свим елементима. Зависно од основне групе узрочника разликујемо механичко, хемијско, електрично, термичко хабање. У највећем броју случајева хабање површина су последица комбинованог физичког и хемијског деловања различитих узрочника.

Продукти хабања су честице материјала које у процесу остваривања контакта одлазе са контактних слојева чврстих елемената трибомеханичких система.

У зависности од величине продуката хабања могуће је класификовање процеса хабања на фино и грубо хабање. У процесу финог хабања величина продуката не прелази  $1\mu\text{m}$  и потичу из спољашњег граничног слоја, док процесу грубог хабања величина продуката се креће до  $10\mu\text{m}$  и формирају се рушењем унутрашњег граничног слоја (деформисаног металног слоја).

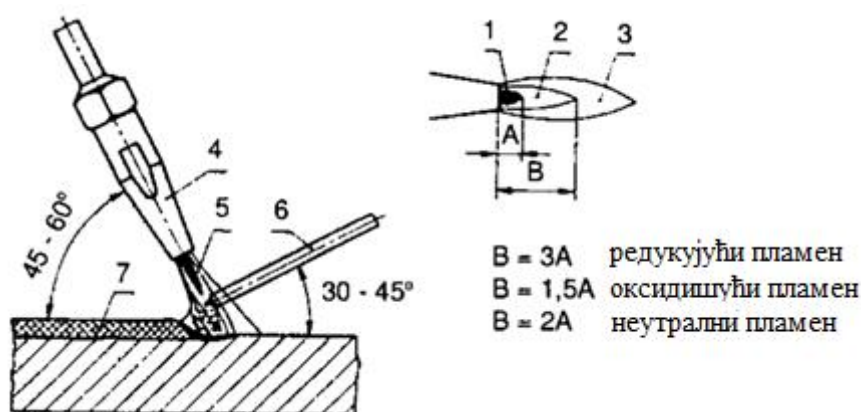
Класификација хабања може бити остварена и на основу механизма хабања како и услова под којима се контакт остварује. У литератури најчешће се сусреће класификација хабања према врсти механизма хабања на: адхезивно, абразивно, заморно, ерозионо, кавитационо, корозионо, оксидационо, електрично, водонично и фретинг (вибрационо) хабање. Подела хабања можња може бити и на основу релативног кретања (хабање при клизању, котрљању), према природи материјала елемента трибо-механичког система, према остваривању површинског контакта елемената трибо-механичког система (линијско, површинско и запреминско хабање)...

## 4.0 Различите методе наваривања конструкцијских делова

Важно је напоменути да се готово сви поступци заваривања почев од гасног, РЕЛ, МИГ, МАГ, ЕПП, ЕПТ, плазме и ласерског могу применити за наваривање. Избор одговарајућег поступка наваривања може доста да утиче на особину навареног слоја као и на продуктивност и економичност поступка.

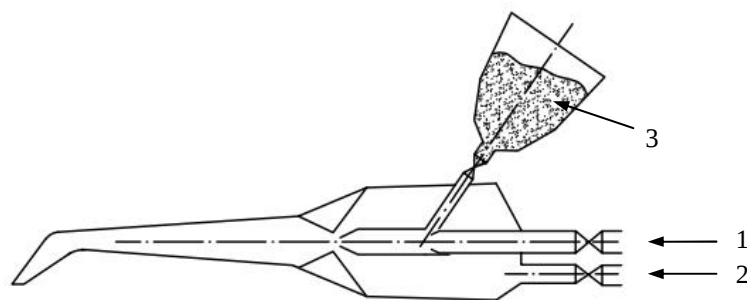
### 4.1 Гасно наваривање

Гасно наваривање се сврстава у поступке наваривања топљењем јер се чврст спој образује топљењем основног и додатног материјала, а затим њиховим очвршћавањем. Поред многих гасова који се користе у техници заваривања (метан, пропан, бутан, бензин (пара)...) за наваривање се највише користи ацетилен у комбинацији са кисеоником. Главни део уређаја за гасно наваривање је горионик, на чијем излазу се пали гориви гас и сагрева у смеси са кисеоником. Заваривачки пламен који се добија из приближно једнаких запремина ацетилена и кисеоника доведеног из боце зове се неутрални пламен. Пламен са вишком кисеоника зове се оксидишући, а са вишком ацетилена редукујући. Гасно наваривање жицом или шипком, подразумева да се крај додатног материјала подгрева на ивици пламена, затим се помера у зону највише температуре где се стапа (слика 4.1).



**Слика 4.1** Гасно наваривање жицом или шипком и препоручено регулисање окси-ацетиленског пламена; 1-језгро, 2-редукциона зона, 3-оксидишућа зона, 4-гасни горионик, 5-гасни пламен, 6-шипка, 7-наавар [11]

За гасно наваривање са прашком користи се посебно конструисан горионик (слика 4.2) са додатним судом у коме се налази легура за наваривање у облику праха. Прах се одводи подпритиском горивог гаса, стапа и набацује на површину.



**Слика 4.2** Шема горнионика за гасно наваривање прахом; 1-кисеоник, 2-гориви гас, 3-прах [3]

## 4.2 Ручно електролучно наваривање

Ручним електролучним заваривањем електрични лук се успоставља и одржава између завариваног дела - основног материјала и додатног материјала - електроде. У пракси РЕЛ заваривања, лук се успоставља најпре примицањем електроде (слика 4.3а), а затим одвајањем електроде од основног материјала (слика 4.3в). Ручним електролучним заваривањем постиже се већа концентрација топлоте, већа брзина заваривања и ужа зона под утицајем топлоте него при гасном заваривању.



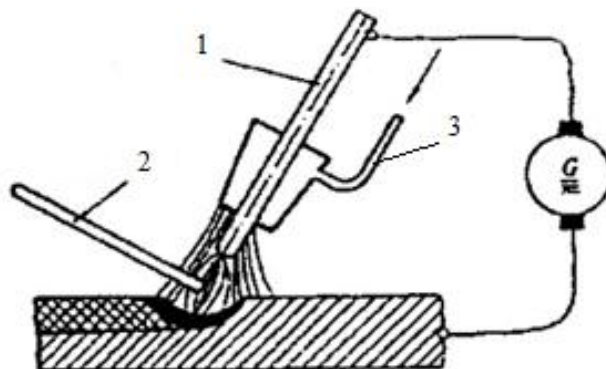
**Слика 4.3** Успостављање лука

## 4.3 Наваривање у атмосфери заштитних гасова

За наваривање се могу применити сви поступци (начини) заваривања у заштити гасова МАГ, МИГ, ТИГ с тим што се код ТИГ наваривања увек користи додатни материјал чијим се стапањем образује навар. Наведени поступци се могу извести у свим положајима (сем у неким случајевима ТИГ-поступка када се користи додатни материјал у праху), а мала запремина металног купатила омогућује полагање навара малих пресека на било којим деловима. Наваривање у заштити гасова може се изводити аутоматски и полуаутоматски. При полуаутоматском наваривању горнионик се води ручно а жица доводи аутоматски.

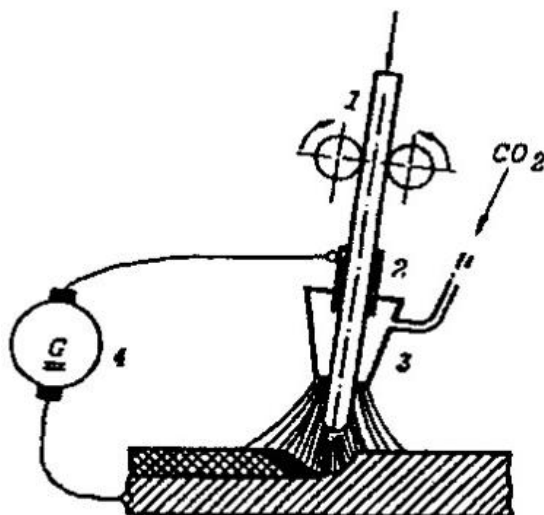
ТИГ наваривање спада у метод електролучног заваривања волфрамском електродом и аргоном као заштитни гас. Количина топлоте која је потребна за наваривање ослобађа се у електричном луку између нетопиве волфрамске електроде и дела који се наварује. За разлику од осталих поступака електролучних заваривања ТИГ-поступком се не топи електрода и не служи истовремено као додатни материјал. Електрода која се користи за

ТИГ поступак је израђена од волфрама чија је температура топљења  $3410^{\circ}\text{C}$ . Осим Назива ТИГ (тунгстен-инертни гас), у литератури се може јавити под именом WIG (волфрам-инертни гас) или аргонско-лучно заваривање или само аргонско заваривање. Шема ТИГ-поступка приказана је на слици 4.4.



Слика 4.4 Шема ТИГ наваривања; 1-волфрамска електрода, 2-додатни материјал, 3-аргон [11]

ТИГ-наваривање се примењује слично као и наваривање гасним пламеном. Додатни материјал, у виду жице или шипке, се доводи у зону електричног лука где се стапа са основним материјалом. Једну модификацију ТИГ- поступка представља примена легуре за наваривање у виду праха насутог на површине које се наварују.



Слика 4.5 Шема МАГ-поступка

МАГ наваривање обавља се у заштити угљен диоксида, приказаном на слици 4.5. Топљива електродна жица (1) доводи се преко вођице (2) која је повезана са једним полом извора једносмерне струје (4). Жица пролази кроз млазницу (3), која служи за усмеравање заштитног гаса на зону спајања. Гас  $\text{CO}_2$  се доводи из челичне боце под притиском. Одржавање електричног лука при наваривању у заштити  $\text{CO}_2$  је отежано јер нема стабилизатора лука, као на пример у облози електрода при РЕЛ наваривању. Из тог

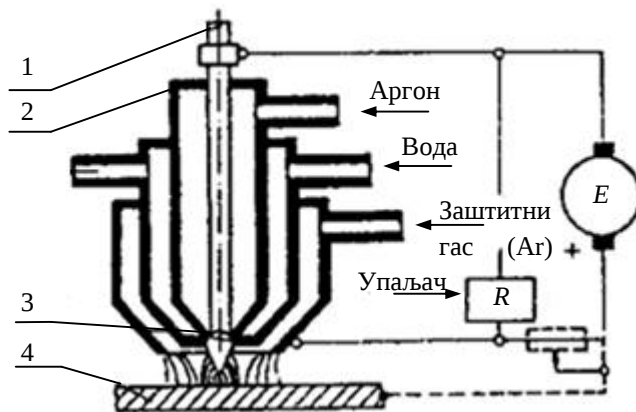
разлога примењује се за МАГ<sup>1</sup> заваривање једносмерна струја обрнуте поларности којом се постиже боља стабилност лука него са наизменичном струјом.

Наваривање у заштити инертног гаса топљивом електродном жицом - МИГ<sup>2</sup>, веома је слично заваривању у активном CO<sub>2</sub> гасу (МАГ - поступку), јер се користи идентична опрема и веома често смеша гасова Ar+CO<sub>2</sub>. Електрични лук се и у овом случају одржава између електродне жице и основног материјала.

#### 4.4 Наваривање плазмом

При наваривању се користи термичка плазма, која је у суштини јонизовани гас састављен од слободних електрона, позитивних јона и неутралних атома. Као последица судара молекула са електрнима гаса и озрачивања (радијације) настаје термичка јонизација између електричног лука у гасном простору. Плазма постоји код свих облика електролучног заваривања. Ако се заваривачки лук одржава волфрамском електродом у простору ограниченом телом млазнице, степен јонизације се толико повећа да се цео поступак назива заваривање плазмом. Поступак је сличан ТИГ-поступку.

Уређаји за заваривање плазмом могу бити, према начину одржавања електричног лука, независни и зависни. Независан лук се успоставља између електроде (1) (слика 4.6) и унутрашњости млазнице (2) док се топлота основном материјалу (4) предаје струјањем загрејане плазме. Плазма струји кроз конични отвор (3) на дну млазнице. Зависан лук се успоставља између електроде (1) и основног материјал (4).



Слика 4.6 Заваривање плазмом

У принципу се уређај за заваривање аргонском плазмом може искористити и за наваривање, с тим што се по потреби може конструисати нова млазница. Додатни

---

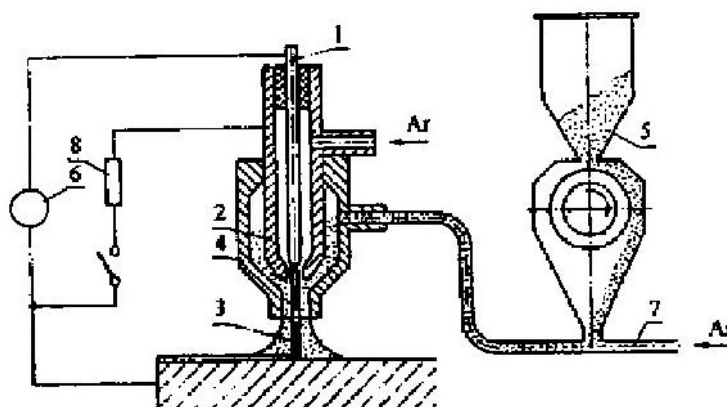
<sup>1</sup> МАГ - метал - активни гас

<sup>2</sup> МИГ - метал - инертни гас

материјал је у облику жице или праха који се уводи слично као код гасног наваривања или се претходно наноси на радне површине, а затим стапа топлотом плазме.

#### 4.4.1 Плазмено ТИГ-наваривање прашком

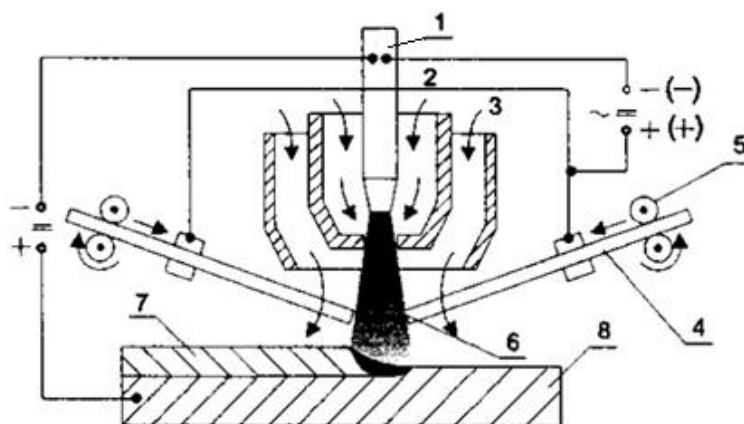
Легура за наваривање доводи се у облик праха који се усмерава дуж плазмене млазнице (слика 4.7), потискује кроз сужени отвор и убрзава до веома велике брзине, при чему температура плазме достиже  $18000^{\circ}\text{C}$ . Стопљени прах удара великом брзином у површински стопљену подлогу и тако формира навар.



**Слика 4.7** Шема плазменог наваривања прашком; 1-волфрамска катода, 2-плазмена млазница, 3-плазмени лук, 4-млазница заштитног гаса, 5-дозатор праха, 6-извор струје, 7-цев за пренос праха, 8-отпорник за регулисање струје помоћног лука

#### 4.4.2 Плазмено ТИГ-наваривање жицом

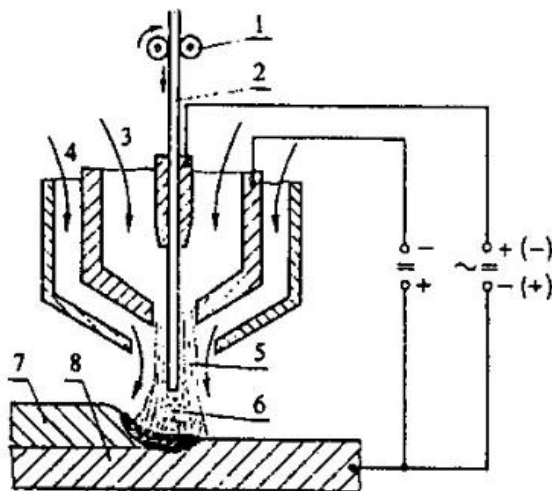
Ово је потпуно механизован поступак заснован на довођењу вруће или хладне жице у зони лука која се топи и стапа са површинским слојем подлоге и тако образује навар. Жицу загревану електричним отпором увела је фирма Union Carbide Corp., што обезбеђује мање уваривање и већу продуктивност (слика 4.8).



**Слика 4.8** Шема ТИГ наваривања плазмом; 1-волфрамска електрода, 2-плазмени гас, 3-заштитни гас, 4-жица, 5-давач, 6-лук плазме, 7-навар, 8-подлога

#### 4.4.3 Плазмено МИГ-наваривање

Овај поступак (слика 4.9) увела је фирма Филипс (Philips) да би се истовремено искористиле предности МИГ-наваривања и плазменог ТИГ-наваривања.



**Слика 4.9** Шема плазменог МИГ-наваривања; 1-давач, 2-жица, 3-плазмени гас, 4-заштитни гас, 5-плазмени лук, 6-МИГ-лук, 7-навар, 8-подлога

Лук се успоставља заваривачким МИГ-луком између додатне жице и основног метала, а после неколико милсекунди спонтано се пали плазмени лук између млазнице и навареног предмета. Споља гледано поступак личи на обично МИГ-наваривање, с тим што заштитни плазмени лук херметички опкољава електрични лук волфрам-електроде и тиме потпуно елиминише прштање. Плазмени гас је аргон, а заштитни Ar, CO<sub>2</sub> или њихова комбинација зависно од врсте навариваног материјала.

#### 4.5 Наваривање под прашком и троском

##### 4.5.1 Наваривање под прашком

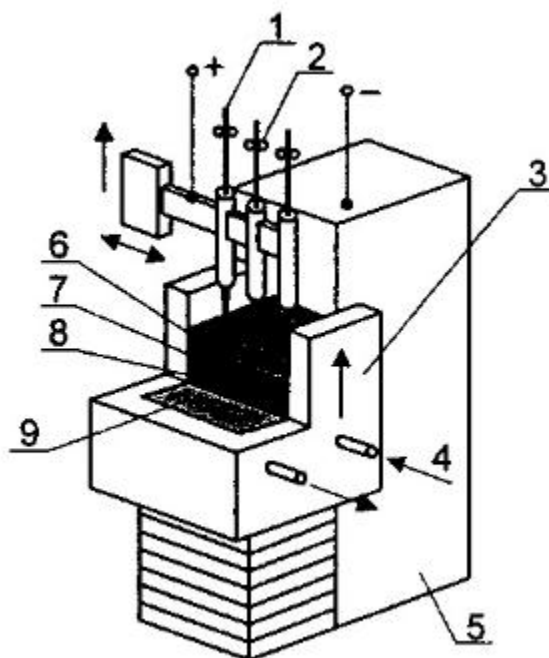
Наваривање под прашком (ЕПП) се заснива на одржању електричног лука између електродне жице и основног материјала под слојем прашка. Прашак који се топи образује троску изнад металног купатила а преостали део прашка остаје непромењен, па се може користити за поновну употребу. Троска и нерастопљени материјал имају улогу заштите металног купатила и навара од спољне атмосфере, а истовремено делују као топлотни изолатор који продужава време хлађења (слика 4.10). Продужење времена хлађења делује веома повољно при наваривању закаљивих челика. Наваривање под прашком се у пракси доста користи због високе продуктивности и високог квалитета изведених навара.



Слика 4.10 Шема ЕПП заваривања

#### 4.5.2 Наваривање под троском

Наваривање под растопом троске изводи се у посебним уређајима а заснива се на коришћењу топлоте ослобођене при протицању електричне струје кроз растоп електропроводљивог прашка великог омског отпора. Лук се одржава и успоставља само на почетку процеса док се не створи купатило течне троске која га гаси. Прекидањем електричног лука не прекида се и електрично коло, јер струја наставља да тече између електродне жице и основног материјала преко троске (слика 4.11). Према томе, у успостављеном процесу наваривања, корисна количина топлоте ослобађа се у троски на основу Џуловог ефекта, а не у електричном луку као код електролучног наваривања. Истопљени прах назива се троска па је по њему поступак добио име.



Слика 4.11 Шема процеса наваривања под троском; 1-електродна жица, 2-вођице, 3-калуп, 4-расхладна вода, 5-наварени део, 6-прашак, 7-растоп троске, 8-заваривачко купатило, 9-навар

Жљеб за наваривање под троском чини ивица дела који се наварује, постављеног у вертикални положај (5). На ивцу дела који се наварује поставља се покретни или непокретни бакарни калуп (3) што зависи од облика и нарастања навара (9). Бакарни калуп обухвата цео навар и спречава расипање праха (6) и истицање троске (7) из течног метала. Такође, у бакарном калупу се налазе двоструки зидови короз који циркулише вода ради хлађења (4). Температура течне троске мора бити већа од основног и додатног материјала. Захваљујући томе топе се ивице основног материјала и део електродне жице (1) уроњен у троску. Истопљени основни и додатни материјал образује метално купатило (8) чијим очвршћавањем настаје навар.

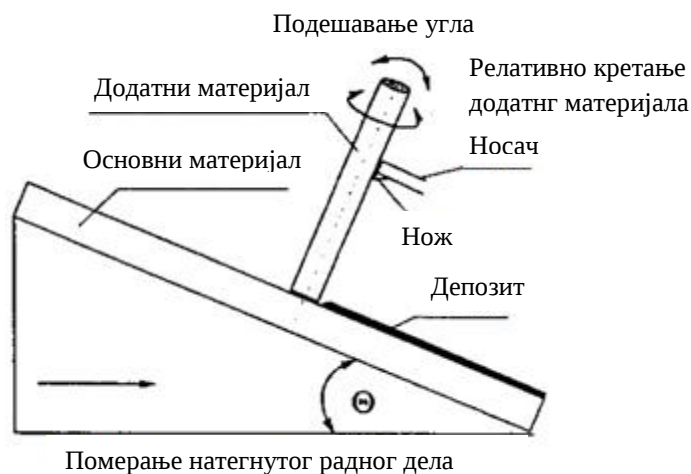
#### 4.6 Напредне технологије наваривања трењем

##### 4.6.1 Савремени поступци наваривања трењем

У циљу повећања отпорности радних површина на хабање, стално се усавршавају нове методе наношења превлака. Третирање површина ради побољшања јачине, смањења храпавости и повећања века компоненти, једна је од најбрже развијених области у производној индустрији. Интезивно се ради на усавршавању технологије наваривања трењем. У том смислу посебно се истичу три варијанте ове методе: *наваривање трењем са нагнутом подлогом*, *наваривање трењем процесним ковањем* и *наваривање трењем композитно-металних матрица*.

##### 4.6.2 Наваривање трењем са нагнутом подлогом

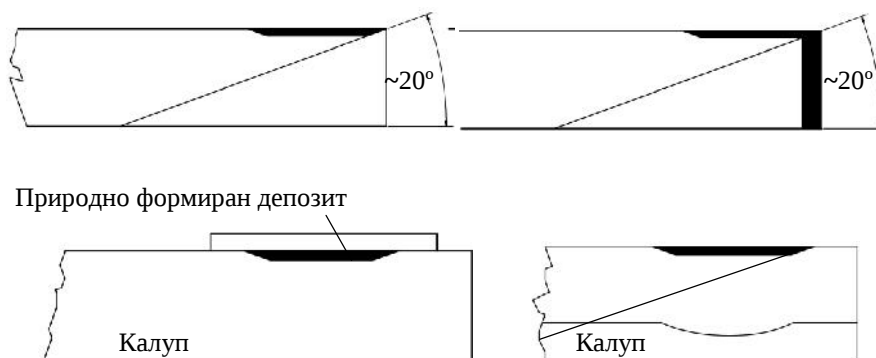
Додатни материјал изложен аксијалном притиску изводи осцилаторно полукружно кретање по нагнутој подлози која се истовремено помера у смеру стрелице (слика 4.12). При томе се контактна зона додира доводи у тестасто стање због силе трења што доводи до образовања дифузионо-адхезионог споја. Овај метод је погодан за наношење (танких) превлака на равне пљоснате плоче или равне попречно ожљебљене плоче.



Слика 4.12 Наваривање трењем са нагнутом подлогом

#### 4.6.3 Наваривање трењем процесним ковањем

Ова се метода заснива на постављању претходно обликованог додатног материјала који одговара форми будућег слоја (слика 4.13). Депозити дебљине до 2 mm и више могу бити од нежелезних, железних и композитних материјала. Применом ове технике смањује се учешће машинске обраде и праве уштеде у основном и додатном материјалу. Ова метода нашла је посебну примену при изради резних ивица индустријских ножева.



Слика 4.13 Наваривање трењем процесним ковањем

#### 4.6.4 Наваривање трењем композитно - металних матрица

Применом ове методе омогућава се наваривање трењем (*in situ*) композитних материјала металне основе, са другим металима (кобалтом, никлом, нерђајућим челицима и друго). Овом техником се побољшава својство површине и повећава отпорност на хабање (посебно абразију), корозију, омогућава рад на повишеним температурама и друго.

#### 4.6.5 Наваривање електронским снопом

Овај поступак спада у новије и скупље поступке, а намењен је првенствено за заваривање односно наваривање. Као извор топлоте користи се кинетичка енергија врло уског снопа електрона велике брзине (реда  $165000 \text{ km/s}$ ). Захваљујући великој концентрацији топлоте, навари (завари) добијени овим поступком су веома уски и дубоки. Специфични топлотни флуks се креће од  $3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5 \text{ kW/cm}^2$  и 100 пута је већи него при заваривању електричним луком.

Због високе цене, овај поступак има примену само за специјалне производе (при изради пројектила, за потребе нуклеарне индустрије и свемирског програма и друго). Овим поступком могу да се заваре сви материјали, дебљине 0,05-300 mm, али се првенствено користи за заваривање тешко заварљивих метала и метала високе температуре топљења (W, Be, Zr, Ti).

#### 4.6.6 Наваривање ласером

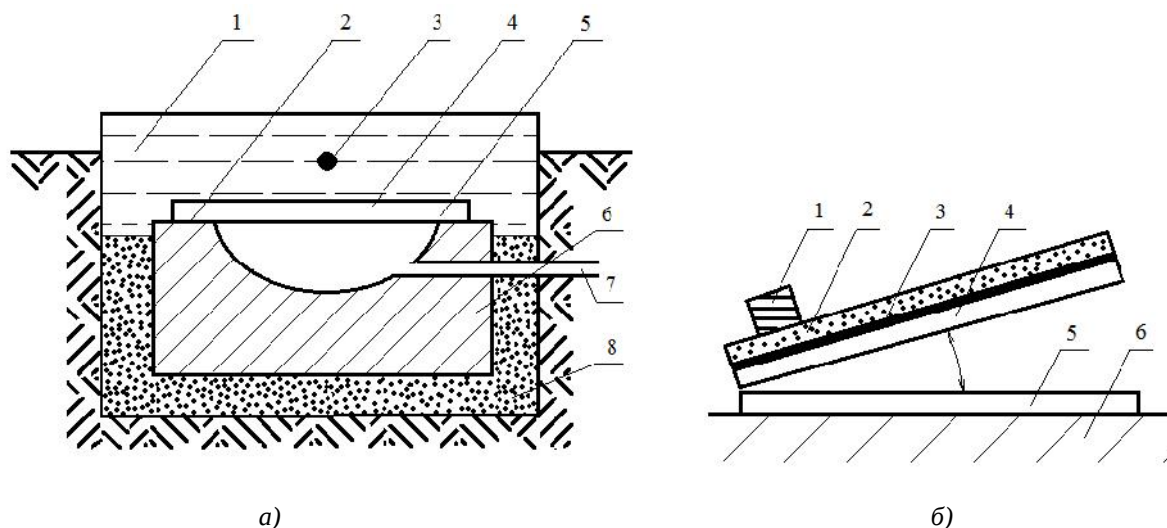
Ласерско заваривање заснива се на топлоти добијеној деловањем светлосног зрака, усмереног и концентрисаног на веома малу површину. Спада у поступке заваривања са највећим специфичним флуksom, али и у најскупље поступке заваривања. Квалитет споја је добар, заостали напони и деформације су минимални, уз минималну зону утицаја топлоте. Последњих година се све више уводи у производну праксу, највише за заваривање и сечење, али понекад налази примену и при наваривању.

#### 4.6.7 Наваривање експлозијом

Овај метод наваривања (заваривања) се заснива на веома брзом (ултразвучном) спајању делова под дејством динамичког притиска створеног локалном експлозијом одговарајућег експлозивног материјала. Заваривање експлозијом примењује се за спајање и израду двослојних пресека. Двослојни пресеци примењују се не само за делове једноставног облика (равне плоче), већ и за делове сложеног облика (цеви, резервоари и слично).

Углавном се заваривање-наваривање-плакирање примењује у хемијској индустрији за заштитно облагање резервоара од угљеничних челика, никлом или титаном. Дакле, наварују се разнородни материјали који међусобно отежано граде једињења типа чврстог раствора у течном и чврстом стању.

Постоје две основне методе наваривања експлозијом: *посредним* (слика 4.14а) деловањем експлозива и *директним* (слика 4.14б) деловањем експлозива.



Слика 4.14 Заваривање експлозијом: а) посредно, б) директно

У првом случају експлозив (3) се поставља у одговарајућу материјалну средину (вода, уље, ваздух) (1) да би се пригушило његово дејство на плочу (5) која треба да обложи калуп (6). Осим наведене материјалне средине, пригушење обезбеђују заштитни лим (4) и порозна маса (8). Херметички прстен (2) и отвор за ваздух (7) су такође неопходни при

примени ове методе. Метод је веома сличан обликовању или дубоком извлачењу и примењује се у ракетној техници, авијацији, у производњи резервоара, цеви и друго.

У другом случају експлозивно средство (hexagen -  $C_6H_6O_6N_6$ ) (2) се поставља на заштитни лим-заштитну пригушницу (гума, вештачка материја, метал) (3), испод кога се налази плоча основног метала (4), која је по правилу под неким углом у односу на другу плочу (5) и постоље (6). Лимови-плоче се најчешће постављају на растојању од 2 до 3 mm и под углом од  $2-7^\circ$ . Паљењем детонатора (1) експлозивни талас полази из тачке А и шири се по целој ширини плоче великом брзином ( $3000-9000\text{ m/s}$ ) развијајући притисак на горњи лим (реда величине  $10\text{GPa}$ ). У зони удара завариваних делова, омекшани материјал тече слично течности, слива се у једну целину и очвршћавањем образује чврст спој.

## 5.0 Поређење метода наваривања са аспекта основног материјала

### 5.1 Избор основног материјала за спајање заваривањем

Да би се одговарајући поступак и технологија заваривања применила неопходно је да се познаје врста конструкције која се заварује. Из постојећег великог асортимана материјала различитих квалитета, конструктор бира материјал за израду елемената или конструкције, са циљем да се добрим поступком избора одговарајућег материјала и поступка заваривања оствари поуздан заварени спој који се може трајно експлоатисати у датим радним условима. Овај задатак је врло комплексан, јер захтева свеобухватна техничка решења и сазнања, што се може остварити тимским радом стручњака различитих специјалности. Може се рећи да су инжењери заваривања, који раде на заваривању или сродним поступцима, при изради готово свих заварених конструкција и њихових елемената, од најкрупнијих до оних најмањих, одговорни у погледу концепције, производње и економије - јер заваривање као поступак спајања има пресудан утицај на понашање и чврстоћу конструкција при експлоатацији.

За добијање квалитетних спојева неопходно је добро познавање проблематике од стране инжењера, јер у супротном може доћи до неправилног избора материјала уз појаве грешака и лома, до појава погрешних локација шавова на местима великих локалних променљивих оптерећења, као и до тешкоћа око извођења конструкције или немогућности извођења конструкције. Ако се ова проблематика недовољно познаје или се игнорише, могу се добити неекономични или непоуздани елементи, што даље изискује споре и скупе поправке које условљавају закашњења у испоруци и могу довести до хаварије у радним условима.

Усавршавање поступка заваривања омогућава спајање разних врста челика, обојених и других метала и легура, као и неметалних материјала. Материјали који су наведени све више се користе у енергетици, базној и прерађивачкој хемији, електроници, ракетној техници... Примена одговарајућег материјала уз одговарајуће спајање обезбедиће постојаност споја у радним условима, немењајући својства при раду. Од избора основног материјала зависи успех израде заварене конструкције. При коришћењу заваривања, као начина спајања, може доћи до промене механичких, хемијских и других својстава основног материјала, због чега се мора водити рачуна да при одређеном поступку заваривања основни материјал мора да испуни тражене карактеристике после заваривања. При избору основног материјала тежи се да се уштеди највише на материјалу, па се усвајају најлакши делови са најмање отпада при њиховој изради, а који ће за дате радне услове и оптерећења бити најбољи. У највећем броју случајева овај захтев испуњавају угљенични челици, а у случају топлотних и хемијских дејстава бирају се легирани челици или друге легуре.

Смањење тежине за предвиђено оптерећење може се постићи погодним конструктивним решењем које ће обезбедити најравномернија оптерећења свих елемената, као и

коришћење одговарајућег материјала, побољшањем његових особина одговарајућом обрадом. Поред економске оправданости, за избор материјала треба узети у обзир чиниоце које за саму конструкцију и услове рада није лако квалитетно проценити. Чиниоци попут температуре експлоатације, дебљине основног материјала, степена значаја елемента, врсте оптерећења и напонско стање морају се увек узимати у обзир.

Тежња ка смањењу тежине конструкције изискује избор одговарајућих материјала и поступка обраде у зависности од набавне цене материјала и цене накнадне обраде, као и стварање нових материјала повишене чврстоће, попут челика повишене чврстоће чија је карактеристика да се у односу на угљеничне одликују повећаним својством чврстоће и поред ниског садржаја угљеника ( $C < 0,22\%$ ). Ово повећање чврстоће јавља се као резултат позитивног дејства малих количина легирајућих елемената (микросастојака) који не погоршавају заварљивост, насупрот угљеничним челицима код којих повећан садржај угљеника утиче на повећање чврстоће а смањује заварљивост. При избору било којег конструктивног материјала веома битан захтев при пројектовању, конструисању и изради чини експлоатациона сигурност конструкције. Из тог разлога се као предмет многих истраживања проучава општа концепција конструисања: одређује се допуштени напон према предвиђеном степену сигурности и одређују се гранична стања.

Обимна производња различитих заварљивих материјала проширила је могућност повољног избора основног материјала који обезбеђују поузданост конструкције. Ту спадају групе легура, као што су неки угљенични и легирани челици или у последње време микролегирани челици повишене чврстоће као и неке нежелезне легуре. Могућност побољшавања својства ових материјала неким термичким обрадама само још више проширују њихову примену.

## **5.2 Основни материјали за заваривање / наваривање и оцена њихове заварљивости**

За израду заварених машинских делова конструкција највише се употребљавају:

### **1. Челици**

- нискоугљенични челици обичног квалитета;
- нисколегирани челици;
- челици типа С-Мп, челици повишене јачине, микролегирани, и термички побољшани челици);
- челици за рад на повишеним температурама: хромни челици (Cr-Mo и Cr-Mo-V);
- челици отпорни на корозију (нерђајући: отпорни на киселине и ватроотпорни);

### **2. Ливена гвожђа (сиви лив, нодуларни лив, темпер лив) и**

3. Нежелезни материјали и њихове легуре.

**Меки угљенични челици.** Меки угљенични челици садрже мање од 0,30% угљеника. Веома лако се заварују сем у случају електричног заваривања када челик има мање од 0,1% угљеника, када се ствара поларитет. Ова појава се може избећи применом електрода базичног типа, лаганом брзином заваривања и кратким луком. Поларитет се јавља и заваривањем неумиреног челика у атмосфери инертног гаса и може се избећи употребом електродне жице са додатком алуминијума, [12]. Код заваривања полуумирених и умирених челика ова појава се не јавља. Код изузетно дебелих челика као и оних који су на собној температури испод 0°C потребно је предгревање на температури 80 - 150°C. Није потребно напуштање.

**Средње угљенични челици.** Средње угљенични челици имају садржај угљеника у распону од 0,30 до 0,50%. Могу се заваривати електролучно, електроотпорно, аутогено и термитно. После заваривања услед хлађења појављује се мартензитна структура у ЗУТ-у услед чега се могу појавити прслине. Да би се избегла појава прслина потребно је предгревање на 200 - 450°C, уколико се заваривање врши помоћу киселих или рутилних електрода, а уколико се заварује базичним електродама потребно је предгревати на 100 - 350°C, [12]. После заваривања потребно је постепено хладити на спољашњој температури. Побољшање структуре, повећање истегљивости и напуштање напрезања могуће је извршити накнадним загревањем на 650°C у трајању од једног часа на сваких 25 mm дебљине.

**Високоугљенични челици.** Садржај угљеника у високоугљеничним челицима се креће до 0,50% па је самим тим њихово заваривање отежано. Када се примењује гасно заваривање употребљава се редукујући пламен а притом треба водити рачуна да се основни материјал не загрева превише. У сваком случају накнадна обрада је потребна. При електролучном заваривању високоугљеничних челика потребно је предгревати на температури око 200°C те накнадно заваривати на 750°C. Електроде које се употребљавају су за меки челик, али вар апсорбује угљеник из основног материјала па зона стапања постаје тврда и крта. У таквом случају боље је употребљавати аустенитну электроду јер на тај начин зона стапања постаје мекша. Заварује се базичном електродом на плус полу и напоном од 20 - 25 V.

**Алатни угљенични челици.** Ови челици садрже од 0,8 до 1,5% угљеника и од свих угљеничних челика они се најтеже заварују. При гасном заваривању, додатни материјал мора осигурати вар истих или бољих хемијских и физичких карактеристика. Неопходно је предгревање и накнадно загревање, односно жарење основе. При електролучном заваривању резултат заваривања је врло ретко успешан, а после заваривања потребно је применити знатан број термичких обрада [12].

**Нисколегирани челици.** Садржај угљеника код ових челика ретко прелази 0,25%, а легирајући елементи који побољшавају корисне особине челика истовремено погоршавају заварљивост. Потешкоће заваривања настају због отврдњавања ЗУТ-а.

**Нисколегирани челици високе тврдоће.** Ови челици садрже мање количине никла, мангана, бакра, силицијума, хрома и молибдена. Примењују се за израду челичних конструкција попут дизалица, железничких платформи, транспортних цистерни, грађевинских машина. Карактерише их отпорност на атмосферске и остале антикорозивне услове. Граница течења им је  $35 \text{ kg/mm}^2$  до  $55 \text{ kg/mm}^2$ , а граница кидања им је од  $50 \text{ kg/mm}^2$  до  $80 \text{ kg/mm}^2$ . Због ниског садржаја угљеника веома су лако заварљиви па су из тог разлога веома тражени код одговорних конструкција. Код већих делова и конструкција неопходно им је предгревање, док код мањих делова то није потребно.

**Хром-молибденски челици.** Највише се примењују за делове који раде на високим температурама у енергетској индустрији, петрохемији и авионској индустрији. Добро се заварују свим поступцима заваривања. При гасном заваривању користи се строго неутралан пламен јер чак мали вишак кисеоника изазива стварање оксида хрома, гасних мехурова и порозних места. Редукујући пламен такође наугљенишава метал и тиме повећава кртост вара. Ради спречавања стварања тврде прелазне зоне потребно је предгревати челике на  $180 - 400^\circ\text{C}$ . Електроде за РЕЛ-поступак треба да буду обложене, да имају исто толико хрома, а и мало више, зато што при заваривању један део хрома оксидише.

**Мартензитни нерђајући челици.** Садржај хрома код ових челика креће се од 11-16%. Користи се за разне машинске делове (осовине за пумпе, вентиле, куглице лежишта), ножева за љуштење дрвета, хирушки прибор, ловачке ножеве... Структура постаје мартензитна када се ови челици хладе на ваздуху, па се они могу калити и отпуштати као и угљенични челици. Отпуштањем са температуре од  $750^\circ\text{C}$  структура постаје феритна, што се делимично може променити предгревањем и загревањем после заваривања.

**Феритни нерђајући челици.** Садржај хрома код ових челика је у количини од 14-30%. Користе се за израду водених турбина, кухињске опреме, издувних цеви, катализаторе, за хемијска постројења... Сврставају се у групу челика ограничене заварљивости, чији се завари добијају применом посебних мера. За време хлађења и после остају феритни те због тога топлотном обрадом неотврдњавају. Упркос томе они после загревања могу постати крти. Изнад  $1150^\circ\text{C}$  ови челици постају потпуно феритни и долази до излучивања хромкарбида, који чини структуру кртом. Ово се избегава жарењем на температури од  $650^\circ\text{C}$  у трајању од једног сата на сваких 25 mm дебљине.

**Аустенитни хром-никл нерђајући челици.** Садржај хрома код ових челика креће се од 18-35% а никла од 6-35%. Како је ово највећа група нерђајућих челика то ће услови за свако од њих бити различити. Прву групу чине челици код којих је садржај угљеника преко 0,08%, другу групу чине челици са мање од 0,04% и мање угљеника, а трећу групу чине стабилизовани челици са титаном или калумбијумом. Челици друге групе су практично неосетљиви на стварање карбида и због тога су лакши за заваривање. Разлог томе је мала количина угљеника, па време које је потребно за стварање иоле значајних количина карбида је веома велико. Код стабилизованих челика карбиде стварају

стабилизатори, то јест колумбијум или титанијум, па хром остаје у првобитном стању. Предгревање није дозвољено јер се због смањене брзине хлађења повећава садржај карбида, док напуштање нема ефекта због веома високе чврстоће попуштања, па се уопште не спроводи.

**Мангански нерђајући челици.** Зову се још и Хадфилд челици и садржај угљеника им је 1% и мангана од 14-16%. Користе се за израду транспортера за превоз тврдых и расутих терета, кашика багера, дробилица, свих делова који су изложени великим притисцима и ударцима. Када су у ливеној форми они су веома крти због излучених карбида. Да би челик постао мекши приступа се загревању на 1100°C како би се на тај начин карбиди распали. Дебљине лима до 13 mm могу се заваривати са електродама чији је састава: 12-14% и 3-5% Ni или електродама са: 25% Cr и 20% Ni. Како је овај челик осетљив на стварање прслина, то се дебљине изнад 13 mm заварују тако да се навари једна па затим друга ивица лима једним слојем са електродама: 25% Cr и 20% Ni, па тек онда споји манганском електродом. Електрода се прикључује на плус пол због базичног оплаштења, а код аутогеног заваривања треба радити са неутралним пламеном [12].

**Ливено гвожђе.** Применом одговарајућег поступка заваривања могу се заварити све четири врсте ливеног гвожђа (сиви лив, бели лив, темпер лив и нодуларни лив). Заваривање је могуће извести електролучно применом угљених или металних електрода, електролучно у заштити инертног гаса, аутогено. За репаратурно наваривање највише се употребљава електролучно заваривање са металном електродом и аутогено заваривање.

Угљеник у ливном гвожђу долази у формама железних карбида - Fe<sub>3</sub>C (цементит) и невезаних угљеника - графит. Заварљивост ливеног гвожђа опада са већим садржајем графита. Када се врши поправка делова са прслином, прслина мора бити исечена пре заваривања. Садржај угљеника у белом ливу креће се од 1,7 до 2,7% цементита. Када се примењује аутогено заваривање тада додатни материјал треба да има исти састав као и основа. Предгревање делова и одржавање температуре треба бити на 650°C за све време заваривања и при том треба пламен да буде неутралан. После заваривања део треба да се хлади лагано у пећи или у песку.

**Темпер лив.** Састоји се од ферита и темперованог угљеника. Темпер лив се добија од белог лива где је темперовани угљеник добијен загревањем на око 800°C у трајању од неколико дана и његовим хлађењем у пећи, највише 10°C по једном часу. За време заваривања темпер лива хемијска структура у зони утицаја топлоте постаје као и код белог лива. Ова особина није пожељна због појаве кртости па је потребна поновна термичка обрада као што је већ наведено. Темпер лив се заварује електролучно и аутогено. При електролучном заваривању користе се монел електроде или никл-манган електроде (94% Ni, 6% Mn) и то у случају када се комад накнадно термички обрађује. Уколико се не жели накнадна обрада, тада се примењују чисте никл електроде са графитним оплоштењем (пречника до 4 mm), која се везује на плус пол и заварује са најмањом могућом струјом, како би се комад што мање загрејао и тиме смањила зона утицаја топлоте која иначе

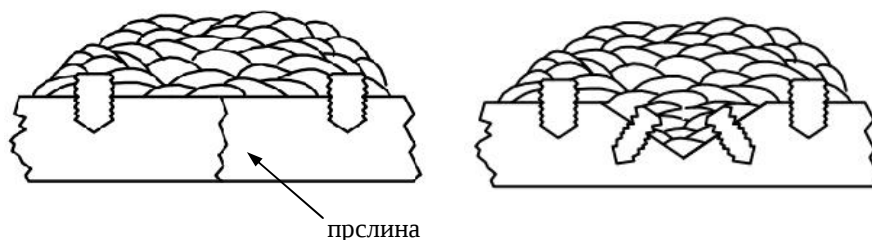
отврдњава и пуца. Аутогено се темпер лив заварује са месинганом жицом, и при том пламен треба да буде оксидишући. Предгревање треба да буде на 650°C и ту температуру треба одржавати за све време заваривања а хлађење треба извршити постепено.

**Сиви лив.** Садржај угљеника у сивом ливу креће се од 2,7-4,5% и то у форми графита. Како се при заваривању загрева основа напрезања, загревање треба да буде што мање. При заваривању величина напрезања може да пређе величину чврстоће истезања (која је врло мала) основног материјала, па заварена веза може да пукне. Ово је веома честа грешка код нестручног заваривања. Разлог пуцања је што се основни материјал при заваривању хлади веома брзо (електролучно заваривање), па угљеник нема довољно времена да се трансформише у форму графитних листића, већ се излучује у форми цементита, па из тог разлога вар и ЗУТ има структуру белог лива. Хлађење белог лива треба да буде што спорије јер ће у супротном бити крт и машински необрадив. Ово се остварују применом више начина:

1. Место које се заварује покрити азбестом после заваривања, а уколико је комад мањи, ставити га у песак.
2. Стварање белог лива спречава се употребом нежелезних електрода, који има нижу тачку топљења од основе.
3. Заваривати кратким варовима и прекидима.
4. Лук или пламен треба усмерити на истопљени метал а не на основу.

Електролучно се може заваривати оплаштенom електродом од меког челика, оплаштенom електродом од нежелезних легура, дебело оплаштенom електродом од сивог лива (али тада треба предгревати основу) и електродом са 7-11% силицијума.

Оплаштена електрода од меког челика употребљава се за поправку прслина или лункера, пошто се у прелазној зони ствара мартензитни слој који пуца. Ако се заварује прслина, припрема се врши као на слици 5.1, са шрафовима у основи који се везују заваривањем.



Слика 5.1 Припрема површине са прслином [12]

**Нодуларни лив.** Како је у нодуларном ливу угљеник у кугличастој форми, он има високу чврстоћу на истезање, па је лакше заварљив од осталих ливова. Заварује се углавном електролучно без знатних потешкоћа.

**Алуминијум и легуре.** На заварљивост алуминијума и његових легура утичу следећи фактори:

1. Подручје топивости;
2. Топлотни капацитети;
3. Осетљивост на пукотину у топлом стању;
4. Топлина и електрична проводљивост;
5. Оксидација;
6. Топлотно ширење и скупљање.

Температура топљења алуминијума и његових легура, далеко је ниже од челика, загревањем му се не мења боја, па је из тог разлога немогуће температуру оценити визуелно. Како су алуминијум и његове легуре знатно лакше од челика, њихова специфична топлота је толико велика да је за топљење алуминијума и његових легура потребно довести исту количину топлоте као и код челика по јединици запремине. По алуминијуму се јављају оксиди који штите алуминијум од корозије. Међутим филм оксида погоршава заварљивост јер је његова температура топљења  $2000^{\circ}\text{C}$ , а температура топљења алуминијума  $658^{\circ}\text{C}$ , [12]. Зато је неопходно да се филм оксида пре заваривања уклони, применом топитеља који се са овим хемијски веже или се пак слој разара електролучно пролазом лука кроз инертни гас. Алуминијум и његове легуре код високих температура често пуцају јер чврстоћа са температуром јако опада.

**Бакар и легуре.** Већина бакарних легура се лако заварује. Евентуални неуспеси су: оксидација, осетљивост на пукотине у топлом стању, топљена проводљивост, житкост растопљеног бакра. На температурама изнад  $400^{\circ}\text{C}$  оксидација наступа у великом обиму, што отежава заварљивост. Кисеоник смањује температуру топљења, повећава корозивност, смањује механичке карактеристике вара. Због успешности заваривања потребно је довести доста топлоте, јер бакар има високу топлотну проводност. Брзина заваривања треба да буде већа јер је бакар житкији знатно више од челика.

### 5.3 Оцена заварљивости метала према примењеном поступку наваривања

Применом окси-ацетиленског заваривања највише се заварују / наварују угљенични челици. Нискоугљенични челик се заварују без тешкоћа. Средњеугљенични и високоугљенични челици се могу заваривати уз примену посебних мера, као на пример предгревањем. Гасно заваривање алатних челика, то јест високоугљеничних челика, практично је немогуће. Високолегирани челици теже се гасно заварују од нискоугљеничних челика што се објашњава структуром каљења у зони утицаја топлоте. Високолегирани челици се могу добро гасно заваривати мада су погоднији други поступци. Ливено гвожђе спада у групу тешко заварљивих легура, мада се применом гасног заваривања могу заваривати сиви и бели темпер лив, док се црни темпер лив не заварује. Гасним наваривањем се могу добро наварити бакар и његове легуре: осим фосфорне и алуминијумске бронзе и легура бакра са белијумом. За већину легура бакра

употребљава се неутрални пламен. Од легура бакра најчешће се наварује месинг и бронза уз одговарајућу припрему, с тим што наваривање месинга применом других поступака даје боље резултате. Применом неутралног пламена, техником улево може се наваривати алуминијум и његове легуре.

Применом ручног електролучног наваривања могу се успешно наваривати угљенични челици, док се алатни челици теже наварују. Сиви, нодуларни и темпер лив успешније се наварују електролучно него гасно. Предност овог начина је мање уношење количине топлоте, што има боље ефекте на смањење напона и деформација изазваним ширењем и скупљањем појединих делова одливка. Применом РЕЛ наваривања, у односу на друге поступке заваривања, најбоље се наварују делови од легираних челика, челичних ливова, као и манганских челика који су изложени хабању и ударима. Наваривање легираних челика треба да буде са што мањом унетом топлотом, ниском струјом заваривања и кратким заварима. Електролучно заваривање алуминијума обложеним електродама је новијег датума. Наваривање алуминијума се изводи уз предгревање, то јест у посебним условима. Бакар се електролучно заварује струјом велике јачине, условљене великом топлотном проводљивошћу. Месинг је најбоље заваривати само гасно, јер електролучним наваривањем, услед велике топлоте долази до великог испаравања цинка. Бронзе се могу електролучно наваривати само под условом да захтеви квалитета наваара нису велики.

Примена ЕПП-поступка користи се за заваривање / наваривање нелегираних, нискоугљеничних и високолегираних челика - ватрогасних и хемијски постојаних, уз примену одговарајућег додатног материјала. ЕПП-поступком се попут РЕЛ поступка добро наварују нисколегирани, средње легирани и високо легирани челици, као и ливени челици. Бакар и бронза се овим поступком могу успешно заваривати, јер вар овим поступком има одговарајуће механичке и физичке карактеристике. Месинг није могуће заваривати, јер долази до топљења основног материјала у великој количини а цинк испарава. Високохромна ливена гвожђа је могуће наваривати као и неке легуре алуминијума.

Применом ТИГ-поступка наварују се делови од обичних угљеничних челика. Заварљивост зависи највише од садржаја угљеника. Тако на пример, одлично се наварују делови од нискоугљеничних челика, добро за средњеугљеничне а лоше за високоугљеничне. Поступком у заштити инертног гаса наварују се делови и од легираних челика, ливеног гвожђа, легура бакра и легура алуминијума. Легирани челици свих врста успешно се заварују ТИГ-ом. Алуминијум и његове легуре успешно се заварују ТИГ поступком, јер се ефектом катодног чишћења лако отклања топиви оксид. Бакар и његове легуре се успешно заварују, изузев месинга. Пошто је код заваривања у атмосфери инертног гаса ширина купке мања него код ручног електроручног заваривања, то предгревање може бити мање. Иако се ТИГ-ом и могу заваривати нискоугљенични и нисколегирани челици, боље је применити РЕЛ и МАГ поступке, док се за високолегране и нежелезне метале и њихове легуре примењује заваривање углавном у заштити аргона.

Поступци ГМА наваривања одвијају се у заштити аргона, угљен-диоксида, (или хелијума у САД) било појединачно или комбиновано, са или без мале количине кисеоника. Код ових поступака наваривања додатни материјал мора бити у облику електродне жице. Међутим, већину тврдих легура није могуће израдити у облику жице, па је примена ГМА за тврда наваривања ограничена. Овај поступак се може применити за наношење превлака од бронзе и других корозионо-отпорних метала на делове челика. Имају примену у наваривању алатних челика, ливених и легираних челика и угљеничних челика. Употреба пуњених жица применом ГМА-методе знатно проширује подручје примене.

МИГ се може применити за све врсте метала. Међутим, због велике цене аргона МИГ-поступком се најчешће заварују нерђајући челици као на пример алуминијум, бакар и њихове легуре. Примена МАГ заваривања се изводи искључиво на деловима од угљеничних и нискоугљеничних челика и челичног лива. Поступци ГМА наваривања се користе у мањој мери тако да се даље неће разматрати.

Помоћу заваривања применом плазме могу се наваривати угљенични и легирани челици, одређене легуре ливеног гвожђа, легуре бакра, док се за алуминијум и његове легуре готово и не примењује због његове велике топлотне проводљивости, мада је примена могућа.

Упоредне оцене заварљивости основног материјала према примењеној методи наваривања дате су у табели 5.1.

| Метода<br>Материјал                                                                                                      | ГПЗ | РЕЛ | ЕПП | ТИГ | Плазма |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------|
| Угљенични челик:                                                                                                         |     |     |     |     |        |
| Нискоугљенични                                                                                                           | +   | +   | +   | +   | +      |
| Средње угљенични                                                                                                         | ~   | +   | +   | +   | +      |
| Високоугљенични                                                                                                          | ~   | +   | +   | ~   | +      |
| Алатни челик                                                                                                             | -   | ~   | ~   | ~   | +      |
| Ливено гвожђе:                                                                                                           |     |     |     |     |        |
| Сиви лив                                                                                                                 | +   | +   | ~   | +   | *      |
| Црни темпер лив                                                                                                          | -   | +   | ~   | +   | *      |
| Бели темпер лив                                                                                                          | +   | +   | ~   | +   | *      |
| Нодуларни лив                                                                                                            | *   | +   | ~   | +   | *      |
| Легирани челици:                                                                                                         |     |     |     |     |        |
| Ниско легирани                                                                                                           | +   | ~   | +   | +   | +      |
| Високо легирани                                                                                                          | +   | ~   | +   | +   | +      |
| Нежелезни материјали и њихове легуре:                                                                                    |     |     |     |     |        |
| Бакар                                                                                                                    | +~  | +   | +   | +   | +      |
| Месинг                                                                                                                   | +   | ~   | +   | -   | +      |
| Бронза                                                                                                                   | ~   | ~   | -   | +   | +      |
| Алуминијум                                                                                                               | +   | +   | ~   | +   | +~     |
| + наварују се уобичајеним начином<br>- не наварују се<br>~ наварују се повремено и у посебним словима<br>* нема података |     |     |     |     |        |

**Табела 5.1** Упоредне оцене заварљивости основног материјала према примењеној методи наваривања

## 6.0 Поређење метода наваривања са аспекта додатног материјала

Легуре за наваривање, то јест додатни материјали, по хемијском саставу различити су од основног материјала, када је у питању репаратурно наваривање, а прилично су истог или сличног хемијског састава када су у питању поправке поломљених делова или одливака који су изливени са грешком.

Навари изложени хабању могу имати једнородну структуру: ледебурит, аустенит, мартензит или вишекомпонентну код које су у основи, на пример аустенитној, утиснути карбиди или карбонитриди. Аустенитна основа вишекомпонентне легуре у неколико смањује тврдоћу навара, али добро „уклињује” карбиде и смањује опасност од крућења. Као најпогоднија се показала аустенитно-мартензитна структура са 20-40% аустенита, јер се постиже релативно велика тврдоћа и отпорност према крућењу [1].

Потребну тврдоћу и отпорност према хабању дају карбиди садржани у основи навара, а њихов облик и количина зависе од садржаја угљеника, елемента који граде карбиде и термичке обраде. Тврдоћа разних карбида према литературним подацима је у следећим границама:  $\text{Fe}_3\text{C}$ -(840-1150 HV),  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ -(1000-1150 HV),  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6 \sim 1650$  HV; WC - (1700-1750 HV);  $\text{W}_2\text{C} \sim 3000$  HV, VC - (2700-1900 HV);  $\text{Mo}_2\text{C} \sim 1600$  HV; TiC  $\sim 3200$  HV. Најекономичније легуре за наваре отпорне на хабање су са Cr као основним легирајућим елементом, при чему мора бити испуњен услов  $9 < \text{Cr}/\text{C} < 22$ . Још већа отпорност на хабање постиже се увођењем W, V и B на рачун снижења садржаја Cr. Када се тражи аустенитна основа уводи се до 9% Ni. Навари отпорни према корозији изводе се од додатног материјала који по хемијском саставу одговара нерђајућим челицима. При полагању навара на подлогу од нискоугљеничног и нисколегираног челика може настати знатно мешање, те ће се први слој разликовати по хемијском саставу од додатног материјала. Због тога за сваки конкретан случај наваривања, први корак је избор поступка и технике наваривања, а затим следује избор додатног материјала. Величина радног дела, његов облик и захтеви који се постављају за квалитет радне површине утичу на избор поступка.

### 6.1 Класификација додатних материјала

На основу хемијског састава, класификација додатних материјала навара разликује 12 група легираности. На снази је стандард „EN 14700:2005 Welding consumables for hard-facing” - Потрошни материјали за тврдо наваривање [13].

У табели 6.1 дата је класификација метала навара према хемијском саставу (EN 14700) као и њихова погодност за различите експлоатационе услове у којима се примењују.

| Симбол<br>легури                                                                                       | Погодна<br>за | Хемијски састав у %            |         |         |        |                      |      |       |      |                            |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|------|-------|------|----------------------------|---------|
|                                                                                                        |               | C                              | Cr      | Ni      | Mn     | Mo                   | W    | V     | Nb   | други                      | остатак |
| Fe1                                                                                                    | p             | ≤0,4                           | ≤3,5    | /       | 0,5-3  | ≤1                   | ≤1   | ≤1    | /    | /                          | Fe      |
| Fe2                                                                                                    | p             | 0,4-1,2                        | ≤7      | ≤1      | 0,5-3  | ≤1                   | ≤1   | ≤1    | /    | /                          | Fe      |
| Fe3                                                                                                    | s t           | 0,2- 0,5                       | 1- 8    | ≤5      | ≤3     | ≤4-5                 | ≤10  | ≤1,5  | /    | Co,Si                      | Fe      |
| Fe4                                                                                                    | s t (p)       | 0,2- 0,5                       | 1- 6    | ≤4      | ≤3     | ≤10                  | ≤19  | ≤4    | /    | Co,Ti                      | Fe      |
| Fe5                                                                                                    | c p s t w     | ≤0,5                           | ≤0,1    | 17-22   | ≤1     | 3-5                  | /    | /     | /    | Co,Al                      | Fe      |
| Fe6                                                                                                    | g p s         | ≤2,5                           | ≤10     | /       | ≤3     | ≤3                   | /    | /     | ≤10  | Ti                         | Fe      |
| Fe7                                                                                                    | c p t         | ≤0,2                           | 4- 30   | ≤6      | ≤3     | ≤2                   | /    | ≤1    | ≤1   | Si                         | Fe      |
| Fe8                                                                                                    | g p t         | 0,2- 2                         | 5-18    | /       | ≤3     | ≤4,5                 | ≤2   | ≤2    | ≤10  | Si,Ti                      | Fe      |
| Fe9                                                                                                    | k (n) p       | 0,3-1,2                        | ≤19     | ≤3      | 0,3- 3 | ≤2                   | /    | ≤1    | /    | Ti                         | Fe      |
| Fe10                                                                                                   | c k (n) p z   | ≤0,25                          | 17-22   | 7-11    | 11-18  | ≤1,5                 | /    | /     | ≤1,5 | Si                         | Fe      |
| Fe11                                                                                                   | c n z         | ≤0,3                           | 18-31   | 8-20    | 3-8    | ≤4                   | /    | /     | ≤1,5 | Cu                         | Fe      |
| Fe12                                                                                                   | c (n) z       | ≤0,08                          | 17-26   | 9-26    | ≤3     | ≤4                   | /    | /     | ≤1,5 | /                          | Fe      |
| Fe13                                                                                                   | g             | ≤1,5                           | ≤6,5    | ≤4      | 0,5-3  | ≤4                   | /    | /     | /    | B,Ti                       | Fe      |
| Fe14                                                                                                   | g (c)         | 1,5-4,5                        | 25-40   | ≤4      | 0,5-3  | ≤4                   | /    | /     | /    | /                          | Fe      |
| Fe15                                                                                                   | g             | 4,5-5,5                        | 20-40   | ≤4      | 0,5-3  | ≤2                   | /    | /     | ≤10  | B                          | Fe      |
| Fe16                                                                                                   | g z           | 4-7,5                          | 10-40   | /       | ≤3     | ≤9                   | ≤8   | ≤10   | ≤10  | B,Co                       | Fe      |
| Fe20                                                                                                   | c g t z       | Тврди метал <sup>b)</sup>      | /       | /       | /      | /                    | /    | /     | /    | /                          | Fe      |
| Ni1                                                                                                    | c p t         | ≤1                             | 15-30   | остатак | 0,3-1  | ≤6                   | ≤2   | ≤1    | /    | Si,Fe,B                    | Ni      |
| Ni2                                                                                                    | c k p t z     | ≤0,1                           | 15-30   | остатак | ≤1,5   | ≤28                  | ≤8   | ≤1    | ≤4   | Co,Si,Ti                   | Ni      |
| Ni3                                                                                                    | c p t         | ≤1                             | 1-15    | остатак | 0,3-1  | ≤6                   | ≤2   | ≤1    | /    | Si,Fe,B                    | Ni      |
| Ni4                                                                                                    | c k p t z     | ≤0,1                           | 1-15    | остатак | ≤1,5   | ≤28                  | ≤8   | ≤1    | ≤4   | Co,Si, Ti                  | Ni      |
| Ni20                                                                                                   | c g t z       | Тврди метал <sup>b)</sup>      | /       | /       | /      | /                    | /    | /     | /    | /                          | Ni      |
| Co1                                                                                                    | c k t z       | ≤0,6                           | 20-30   | ≤10     | 0,1-2  | ≤10                  | ≤15  | /     | ≤1   | Fe                         | Co      |
| Co2                                                                                                    | t z (c s)     | 0,6-3                          | 20-35   | ≤4      | 0,1-2  | /                    | 4-10 | /     | /    | Fe                         | Co      |
| Co3                                                                                                    | t z (c s)     | 1-3                            | 20-35   | ≤4      | ≤2     | ≤1                   | 6-14 | /     | /    | Fe                         | Co      |
| Cu1                                                                                                    | c (n)         | /                              | /       | ≤6      | ≤15    | /                    | /    | /     | /    | Al,Fe,Sn                   | Cu      |
| Al1                                                                                                    | c n           | /                              | /       | 10-35   | ≤0,5   | /                    | /    | /     | /    | Cu,Si                      | Al      |
| Cr1                                                                                                    | c g           | 1-5                            | остатак | /       | ≤1     | /                    | /    | 15-30 | /    | Fe,B,Si,Zr                 | Cr      |
| Погодност:                                                                                             |               | с: отпорност на општу корозију |         |         |        | п: немагнетичан      |      |       |      | t: термички постојан       |         |
|                                                                                                        |               | g: отпорност на абразију       |         |         |        | р: отпорност на удар |      |       |      | z: отпорност ка оксидацији |         |
|                                                                                                        |               | к: отврдњава у раду            |         |         |        | s: задржавање ивица  |      |       |      | w: отврдњава таложењем     |         |
| ( ) не може се применити на све легуре                                                                 |               |                                |         |         |        |                      |      |       |      |                            |         |
| <sup>a)</sup> Легуре које нису обухваћене овим стандардом а налогне су, обележавају се са предзнаком Z |               |                                |         |         |        |                      |      |       |      |                            |         |
| <sup>b)</sup> Топљени волфрам карбид или изломљен (комадићи) или сферичног облика                      |               |                                |         |         |        |                      |      |       |      |                            |         |

Табела 6.1 Класификација метала наvara према хемијском саставу (EN 14700) [13]

### 6.1.1 Додатни материјали на бази железа

**Додатни материјали групе легирања Fe1** дају метал наvara са садржајем  $C \leq 0,4\%$  и укупним садржајем легирајућих елемената Cr, Mn, Mo, Ni,  $W \leq 5\%$ . Зависно од легираности, структура је феритна или мартензитна, а вредности тврдоће наvara у распону 150-450 НВ. Материјали са ознакама тврдоће до 350 НВ дају жилаве наваре подесне за вишеслојно наваривање јако похабаних површина, обрадиве стругањем. Материјали са ознакама тврдоће 400 односно 450 дају наваре отпорне на ударе и хабање, теже обрадиве стругањем или обрадиве брушењем.

**Додатни материјали групе легирања Fe2** дају метал наvara са садржајем  $C \geq 0,4\%$  и укупним садржајем легирајућих елемената Cr, Mn, Mo, Ni до 10%, са највећим уделом Cr, мартензитне структуре. Због већег присуства C и Cr и зависно од њиховог садржаја,

распон тврдоћа креће се од 30 до 58 HRC. Ове материјале не треба наносити у више од три слоја, уз предгревање основног материјала реда величине 250-350°C. Материјали ове групе дају наваре отпорне на трење.

**Додатни материјали групе легирања Fe3** дају метал навара са садржајем С до 0,5% и укупним садржајем легирајућих елемената Cr, Mn, Mo, Ni преко 10%, са највећим уделом Mo и W уз додатак Co и Si, мартензитне структуре са карбидима, постојани на температурама до 600°C. Зависно од њиховог садржаја, распон тврдоћа је 40 до 55 HRC. Метал навара одговара особинама челика за топли рад. Неопходно је прегревање основног материјала до 400°C и полагање хлађење навара. Механичка обрада могућа је само у жареном стању. После жарења и механичке обраде могућа је термичка обрада, побољшањем.

**Додатни материјали групе легирања Fe4** дају метал навара са садржајем С до 1,5% и легирајућим елементима Cr, Mn, Mo, Ni преко 10%, са највећим уделом W (до 19%), Mo (до 10%), V (до 4%) и уз додатак Co и Ti, мартензитно карбидне структуре. Распон тврдоћа је од 55 до 65 HRC. Метал навара одговара особинама челика за топли рад. Користи се за наваривање оштрица алата посебно за рад на високим температурама.

**Додатни материјали групе легирања Fe5** дају метал навара са садржајем С до 0,5% и садржајем легирајућих елемената, пре свега, Ni до 22% и Mo, уз додатак Co и Al, мартензитне структуре (отврдњавају таложењем). Распон тврдоћа је 30 до 40 HRC. Метал навара отпоран је на корозију, удар и ватропостојан је. Користи се за пробојце, маказе...

**Додатни материјали групе легирања Fe6** дају метал навара са садржајем С до 2,5% и садржајем легирајућих елемената Cr, Mn, Mo преко 10%, са великим уделом Nb (до 10%) уз додатак Ti, мартензитно карбидне структуре. Распон тврдоћа је 48 до 55 (при вештачком старењу на 480°C 3 до 4 сата). Наварени слојеви се могу користити при комбинацији удара и трења абразијом, код делова дробилица, ваљака за уситњавање угља, руда...

**Додатни материјали групе легирања Fe7** дају метал навара са садржајем С до 0,2% и садржајем легирајућих елемената Cr до 30%, Mn, Mo, Ni, V и Nb уз додатак Si, феритно/мартензитне структуре. Зависно од удела мартензита, распон тврдоћа је 250 до 450. Са садржајем Cr од 12% корозионо је отпоран, и закаљивањем на ваздуху може да обезбеди тврдоћу 41-51 HRC. Користи се за наваривање кућишта пумпи, вентила, седишта вентила за гас, пару и морску воду, кавитациона оштећења лопатица...

**Додатни материјали групе легирања Fe8** дају метал навара са садржајем С до 2% и садржајем легирајућих елемената Cr до 18%, Mn до 3%, Mo до 4,5%, W и V са великим уделом Nb (до 10%) уз додатак Si, Ti, мартензитно карбидне структуре. Распон тврдоћа је 50 до 65 HRC. Слојеви нису отпорни на удар и притисак па се наносе у једном до два слоја. Наварени слојеви се могу користити при комбинацији високих температура и абразије у гасној атмосфери, на пример код делова високих пећи: звона, левка...

**Додатни материјали групе легирања Fe9** дају метал навара са садржајем С 0,3-1,2% и садржајем легирајућих елемената Mn 11-18%, Cr до 19%, са уделом Mo, V уз додатак Ti, структуре нестабилног аустенита. Распон тврдоћа је 200 до 250 HB (40 до 50 HRC отврдњавањем у раду). Жилава аустенитна подлога са површинским слојевима мешовите структуре аустенита, мартензита и Mn карбида даје изванредну отпорност на интензивне

ударе и хабање. Обрада површине је могућа само тврдим металом. При наваривању захтевају што хладнији основни материјал. Намена је за наваривање делова опреме за млевење тврдих минерала, за заштиту делова ровокопача у каменоломима, дробилица, зуба багера...

**Додатни материјали групе легирања Fe10** дају метал навара са садржајем С до 0,25% и садржајем легирајућих елемената Cr 17-22%, Ni 7-11%, Mn 3-8%, Mo до 1,5%, са уделом Nb (до 1,5%) уз додатак Si, аустенитне структуре. Распон тврдоћа је 180 до 200 HB (при отврдњавању у раду 38 до 42 HRC). Навар мање отврдњава под деловањем удара у односу на навар претходног типа. Најчешће се користе за наваривање манганских челика и разнородних челика.

**Додатни материјали групе легирања Fe11** дају метал навара са садржајем С до 0,3% и садржајем легирајућих елемената Cr 18-31%, Ni 8-20%, Mn до 3%, Mo до 4%, са уделом Nb (до 1,5%) уз додатак Cu, аустенитне структуре која одговара високолегираним, корозионо и ватроотпорним Cr-Ni челицима. Користе се за наваривање у циљу заштите од корозије нелегираних или ниже легираних челика.

**Додатни материјали групе легирања Fe12** дају метал навара са садржајем С до 0,08% и садржајем легирајућих елемената Cr 17-26%, Ni 9-26% Mn до 3%, Mo до 4%, са уделом Nb (до 1,5%) аустенитне структуре која одговара високолегираним, корозионо и ватроотпорним Cr-Ni челицима. Користе се за наваривање у циљу заштите од корозије нелегираних или ниже легираних челика.

**Додатни материјали групе легирања Fe13** дају метал навара са садржајем С до 1,5% и садржајем легирајућих елемената Cr до 6,5%, Ni до 4%, Mn 0,5 до 3%, Mo до 4%, уз додатак В, Ti. Структура је мешавина мартензита, аустенита и FeV. Распон тврдоћа је 55 до 65 HRC. Захтевају предгревање и одржавање међуслојне температуре између 300-600°C. Навари су обрадиви само тврдим металом. Користе се за све врсте арматура за услове високог притиска, температуре и корозије.

**Додатни материјали групе легирања Fe14** дају метал навара са садржајем С 1,5 до 4,5% и садржајем легирајућих елемената Cr 25 до 40%, Ni до 4 %, Mn 0,5 до 3%, Mo до 4%. Структура је мешавина мартензита, аустенита и карбида. Распон тврдоћа је 40 до 60 HRC. Захтевају предгревање и одржавање међуслојне температуре између 300-600°C. Користе се за све врсте арматура за услове високог притиска, температуре и корозије.

**Додатни материјали групе легирања Fe15** дају метал навара са садржајем С 4,5 до 5,5% и садржајем легирајућих елемената Cr 20 до 40%, Ni до 4%, Mn 0,5 до 3%, Mo до 4% уз учешће Nb до 10% уз додатак В. Структура је мешавина мартензита, аустенита и карбида. Распон тврдоћа је 55 до 60 HRC. Захтевају предгревање и одржавање међуслојне температуре између 300-600°C. Навари су обрадиви само тврдим металом. Користе се за све врсте опреме изложене високој абразији, температури и корозији.

**Додатни материјали групе легирања Fe16** дају метал навара са садржајем С 4 до 7,5% и садржајем легирајућих елемената Cr 10 до 40%, Mn 0,5 до 3%, Mo до 9%, уз W до 8%, V до 10%, Nb до 10%, уз додатак В, Co. Структура је мешавина мартензита, аустенита и карбида. Распон тврдоћа је 60 до 70 HRC. Захтевају предгревање и одржавање међуслојне температуре између 300-600°C. Користе се за услове изузетно високе абразије, температуре и корозије.

**Додатни материјали групе легирања Fe20** дају метал навара код којег се у Fe матрици налази тврди материјал обично на бази карбида Cr или W, високе отпорности на хабање абразијом. Распон тврдоћа се дефинише тврдоћом тврдог материјала која је 1500 до 2800 HV, док је тврдоћа матрице 50 до 60 HRC. Захтевају предгревање на температури између 400-600°C. Користе се за алате за бушење земље, алате за пресовање у индустрији керамике, цемента и слично.

#### 6.1.2 Додатни материјали на бази никла

**Додатни материјали групе легирања Ni1** дају метал навара на бази Ni уз додатак Cr (15 до 30%), Mn, Mo, W, V са додацима Si, Fe, B, тврдоће 45 до 60 HRC. Захтевају предгревање и одржавање међуслојне температуре између 300-600°C. Користе се за све врсте арматура за услове високог притиска, температуре и корозије.

**Додатни материјали групе легирања Ni2** дају метал навара на бази Ni уз додатак Cr (15 до 30%), Mn, Mo (до 28%), W (до 8%), V, Nb са додацима Co, Si, Ti, тврдоће 200 до 400 HB. Навар је отпоран према корозији, трајне чврстоће при високим температурама.

**Додатни материјали групе легирања Ni3** дају метал навара на бази Ni уз додатак Cr (до 15 %), Mn, Mo (до 6%), W (до 2%), V, са додацима Si, Fe, B, тврдоће 45 до 60 HRC. Навар је отпоран према корозији, трајне чврстоће при високим температурама и отпорности на хабање и удар.

**Додатни материјали групе легирања Ni4** дају метал навара на бази Ni уз додатак Cr (15 до 30%), Mn, Mo (до 28%), W (до 8%), V, Nb (до 4%) са додацима Co, Si, Ti, тврдоће 200 до 400 HB. Навар је отпоран према корозији, трајне чврстоће при високим температурама.

**Додатни материјали групе легирања Ni20** дају метал навара код којег се у Ni матрици налази тврди материјал обично на бази карбида Cr или W, високе отпорности на хабање абразијом. Распон тврдоћа се дефинише тврдоћом тврдог материјала која је 1500 до 2800 HV, док је тврдоћа матрице 45 до 55 HRC. Захтевају предгревање и одржавање међуслојне температуре на температури између 400-600°C. Користе се за све врсте арматуре за услове ударних оптерећења, високог притиска, температуре и корозије.

#### 6.1.3 Додатни материјали на бази кобалта

**Додатни материјали групе легирања Co1** дају метал навара на бази Co уз додатак Cr (20 до 30%), Ni (до 10%), Mo (до 10%), W (до 15%), Nb (до 1%) са додацима Fe тврдоће 250 до 350 HB при отврдњавању у раду 40 до 45 HRC. Особине метала шава, више него код других додатних материјала, зависе од поступка и начина извођења наваривања. Код TIG поступка, метал навара на 600°C, нарочито код легура са вишим садржајем W је веће тврдоће него метал навара код гасног поступка неутралним пламеном, због финије расподеле карбидне фазе. Код гасног поступка, зависно од врсте пламена долази до наугљеничења навара односно повећања удела карбидне фазе, а тиме и тврдоће, да би даљим повећањем количине ацетилена (преко 4:1) због повећане порозности, дошло до пада тврдоће.

**Додатни материјали групе легирања Co2** дају метал навара на бази Co уз додатак Cr (20 до 35%), Ni (до 4%), W (4 до 10%), са додацима Fe тврдоће 35 до 50 HRC.

**Додатни материјали групе легирања Co3** дају метал навара на бази Co уз додатак Cr (20 до 35%), Ni (до 4%), W (6 до 14%), са додацима Fe тврдоће 45 до 60 HRC.

#### **6.1.4 Додатни материјали на бази бакра**

**Додатни материјали групе легирања Cu1** дају метал навара на бази Cu (легура Cu-Al) уз додатак Ni (до 6%) и Mn (до 15%), тврдоће 200 до 300 HB. Примењују се за наваривање арматура и других делова у хемијској индустрији, индустрији папира, прехранбеној и електроиндустрији. Легирани са Fe користе се за наваривање делова пумпи, мешаче, пропелере; легирани са Ni се користе у бродоградњи, за делове турбина и пумпи; легирани са Si се користе за делове пумпи и вентиле.

#### **6.1.5 Додатни материјали на бази алуминијума**

**Додатни материјали групе легирања Al1** дају метал навара на бази Al уз додатак Ni (10 до 35%), уз додатак Cu и Si, тврдоће 150 до 300 HV. Структура је алфа чврсти раствор са интерметалним талогом. Примењују се при наваривању делова израђених од Al и Al легура у циљу повећања површинске тврдоће.

#### **6.1.6 Додатни материјали на бази хрома**

**Додатни материјали групе легирања Cr1** дају метал навара на бази Cr уз додатак V (15 до 30%), уз додатак Fe, B, Si, Zr, тврдоће 600 до 700 HV. Примењују се при наваривању арматура и других делова у хемијској индустрији, индустрији папира, прехранбеној и електроиндустрији.

У табели 6.2 детаљно је приказана примена одређених легура у зависности од захтева који се траже, њихове микроструктуре, легираности као и од опсега тврдоће.

| Симбол легуре | Захтев    |       |                     |           |           |                      |            | Легура /микроструктура                  | Опсег тврдоћа           |                     |
|---------------|-----------|-------|---------------------|-----------|-----------|----------------------|------------|-----------------------------------------|-------------------------|---------------------|
|               | Механички |       | Термички            |           | Корозиони | Отпорност на прслине | Обрадивост |                                         | HB                      | HRC                 |
|               | Трење     | Удар  | Висока температура. | Термо шок |           |                      |            |                                         |                         |                     |
| Fe1           | 3 и 4     | 2 и 3 | 4                   | 4         | 4         | 1                    | 1          | ферит / мартензит                       | 150-450                 |                     |
| Fe2           | 3 и 4     | 2     | 4                   | 4         | 4         | 2                    | 3          | мартензит                               | /                       | 30-58               |
| Fe3           | 3         | 2     | 2                   | 2         | 3         | 2                    | 2          | мартензит (карбиди)                     | /                       | 40-55               |
| Fe4           | 2         | 2 и 3 | 1 и 2               | 1 и 2     | 3         | 2 и 3                | 3 и 4      | мартензит + карбиди                     | /                       | 55-65               |
| Fe5           | 2         | 1     | 1                   | 1         | 2         | 1                    | 2          | мартензит                               | /                       | 30-40               |
| Fe6           | 1         | 1     | 2 и 3               | 2 и 3     | 4         | 2 и 3                | 3 и 4      | мартензит + карбиди                     | /                       | 48-55 <sup>a)</sup> |
| Fe7           | 2         | 2     | 1 и 2               | 1 и 2     | 1 и 2     | 1                    | 1 и 2      | ферит / мартензит                       | 250-450                 | /                   |
| Fe8           | 1 и 2     | 1 и 2 | 4                   | 4         | 3         | 2 и 3                | 3 и 4      | мартензит + карбиди                     | /                       | 50-65               |
| Fe9           | 4         | 1     | 4                   | 4         | 2 и 3     | 1 и 2                | 3          | аустенит                                | 200-250                 | 40-50 <sup>b)</sup> |
| Fe10          | 4         | 1     | 1 и 2               | 1         | 2         | 1                    | 2          | аустенит                                | 180-200                 | 38-42 <sup>b)</sup> |
| Fe11          | 4         | 3     | 1                   | 4         | 1         | 1                    | 1          | аустенит                                | /                       | /                   |
| Fe12          | 4         | 3     | 1                   | 4         | 1         | 1                    | 1          | аустенит                                | 150-250                 | /                   |
| Fe13          | 1         | 4     | 2                   | 4         | 4         | 4                    | 4          | мартензит/аустенит + FeB                | /                       | 55-65               |
| Fe14          | 1         | 3 и 4 | 3                   | 4         | 2         | 4                    | 4          | мартензит/аустенит + карбиди            | /                       | 40-60               |
| Fe15          | 1         | 4     | 2                   | 4         | 3         | 4                    | 4          | мартензит/аустенит + карбиди            | /                       | 55-65               |
| Fe16          | 1         | 4     | 1                   | 4         | 3         | 4                    | 4          | мартензит/аустенит + карбиди            | /                       | 60-70               |
| Fe20          | 1         | 3     | 3                   | 4         | 3         | 4                    | 4          | тврди метал у Fe-матрици                | 1500-2800 <sup>ц)</sup> | 45-55 (матрица)     |
| Ni1           | 1 и 2     | 2 и 3 | 2                   | 3         | 2         | 3                    | 3          | Ni-легура                               | /                       | 45-60               |
| Ni2           | 2 и 3     | 2     | 1                   | 1         | 2         | 1                    | 2          | Ni-легура                               | 200-400                 | /                   |
| Ni3           | 2         | 2 и 3 | 2                   | 3         | 2         | 2                    | 2          | Ni-легура                               | /                       | 45-60               |
| Ni4           | 2 и 3     | 2     | 2                   | 1         | 2         | 1                    | 2          | Ni-легура                               | 200-400                 | /                   |
| Ni20          | 1         | 2     | 2                   | 3         | 2         | 1 и 2                | 4          | тврди метал у Fe-матрици                | 1500-2800 <sup>ц)</sup> | 45-55 (матрица)     |
| Co1           | 2 и 3     | 1     | 1                   | 1 и 2     | 1         | 1                    | 1          | Co-легура                               | 250-350                 | 40-45 <sup>b)</sup> |
| Co2           | 1 и 2     | 2 и 3 | 1                   | 1 и 2     | 2         | 2 и 3                | 3 и 4      | Co-легура                               | /                       | 45-60               |
| Co3           | 1 и 2     | 2 и 3 | 1                   | 1 и 2     | 2         | 2 и 3                | 3 и 4      | Co-легура                               | /                       | 35-50               |
| Cu1           | 3 и 4     | 2 и 3 | 4                   | 4         | 1         | 2 и 3                | 2          | Cu-Al легура                            | 200-400                 | /                   |
| Al1           | 1         | 3     | 4                   | 4         | 2         | 2 и 3                | 3          | алфа чврсти раствор + интерметалне фазе | 150-300 HV              | /                   |
| Cr1           | 1         | 3     | 3                   | 3         | 1         | 2 и 3                | 3 и 4      | аустенит + талог                        | 600-700 HV              | /                   |

Критеријум за погодност: 1-одлично, 2-добро, 3-прихватљиво, 4-није прихватљиво  
а) -вештачко старење 3 до 4 часа на 480<sup>o</sup>C, б) -отврдњава у раду, ц) -тврди метал

Табела 6.2 Примена легура за тврдо наваривање

## 6.2 Додатни материјали у зависности од поступка наваривања

**Гасно наваривање.** Додатни материјал за гасно наваривање може бити пуна или пуњена жица, шипка или прашак. Од горивих гасова који се користе при гасном наваривању (ацетилен, коксни гас, земни гас, пропан-бутан) највише се користи ацетилен који се може регулисати према односу ацетилена и кисеоника из боце.

**Гасно наваривање жицом или шипком.** Методом гасног наваривања жицом или шипком могуће је наносити превлаке кобалта, олова и других нискотопивих метала на челичне подлоге. Крај додатног материјала у облику жице или шипке подгрева се на ивици пламена, затим се помера у зону највише температуре где се стапа. Превлаке које се наносе на делове од: челика, челичног лива, ливеног гвожђа, бронзе, месинга, могу бити од неких легура на бази гвожђа као и легура кобалта, никла, хрома, односно легура бакра и олова.

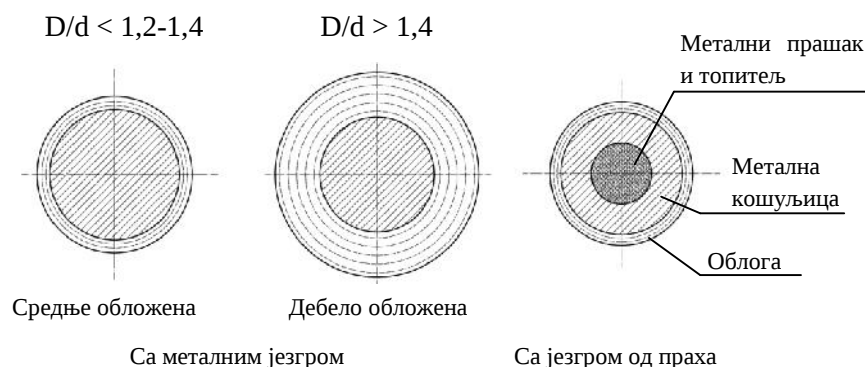
**Гасно наваривање прашком.** Код ове методе користе се тврде легуре у праху које немогуће направити у облику жице или шипке. Прах гранулације 0,03-0,010 mm бива усисан млазом горивог гаса  $C_2H_2+O_2$ ; прашак се стапа у пламену и набацује се на радну површину. Треба напоменути да се уређај за овај вид наваривања може употребити не само са прашком већ и у комбинацији са уношењем шипке у пламен. За гасно наваривање прашак и жица не морају да буду истог састава. На пример може се нанети главни слој топљењем шипке који даје пластичан навар, а завршни слој помоћу прашка који садржи 50% или више волфрам-карбида или неке друге метале.

**Ручно електролучно наваривање.** За наваривање ручно електролучним поступком користе се искључиво обложене електроде. За потребе наваривања електроде могу бити рутилне, базичне или рутилно-базичне.

Улога облоге електрода је да: штите зону заваривања од кисеоника и азота из ваздуха, дезоксидишу растоп, легирају метал шава, доприносе стабилизацији електричног лука, помоћу троске створене изнад растопа (топљењем облоге) продужава се време хлађења метала шава.

Базичне електроде се пре наваривања морају сушити по режиму 250°C/2h. У облози се налазе и легирајући елементи те не треба наваривати са електродама оштећене облоге. Веће тврдоће се добијају при вишеслојном наваривању. Вишеслојно наваривање негативно утиче на појаву прслине, што изискује наваривање уз претходно предгревање основног материјала које је сразмерно тврдоћи навара електроде. Тако ако електрода даје тврдоћу чистог навара од 300 НВ, основни материјал се предгрева до  $T_p \approx 500^\circ C$ . После наваривања сви делови се морају споро хладити. Поред уобичајених обложених електрода пречника 2,5 mm до 6 mm израђују се и прашком пуњене обложене електроде пречника 4 mm до 11 mm (слика 6.1). Предност пуњених електрода је та што се већ у другом пролазу може постићи тражени хемијски састав захваљујући састојцима у језгру и што се навар може полагати струјом веће јачине. Базичне електроде се праве искључиво као средње и

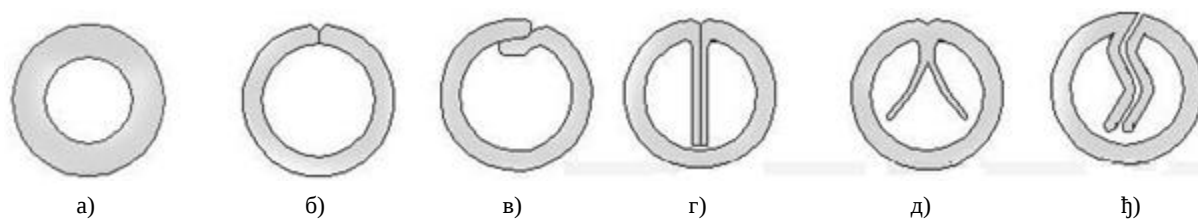
дебело обложене. Топе се нешто спорије и не треба их оптеретити сувише великом струјом.



**Слика 6.1** Врста обложених електрода за РЕЛ-наваривање [11]

Рутилне електроде се производе као средње и дебело обложене. Поседују добре заваривачке особине, могу се користити у свим положајима, како једносмерном тако и наизменичном струјом, брзо се топе и не изазивају прскање. Не примењују се за челике повишене јачине јер у себи садрже дифундовани угљеник који може изазвати хладне прслине. Одстрањивање влаге предгревањем електрода може изазвати круњење облоге и огољавање електродне жице.

**Наваривање отвореним луком.** Код наваривања отвореним луком карактеристика је да се наварује без топитеља и заштитног гаса, јер комплетну улогу преузима електродна жица напуњена спрашеним легирајућим елементима и дезоксидаторима. Главна предност пуњене жице у односу на обложену је та што се ова може испоручити у котуровима. Пуњене жице које се данас производе могу бити коришћене за наваривање отвореним луком, али за неке врсте пуњених жица потребна је додатна заштита углавном са  $\text{CO}_2$  или ( $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ). У каталозима произвођача жица наглашава се да ли су жице композитне или је потребно доводити  $\text{CO}_2$ . Пуњене жице могу бити као и обложене електроде рутилне, базичне, нисководоничне и рутилно-базичне. Поред састојака који делују као дезоксидатори и као легирајући елементи ту морају бити састојци чијим се сагоревањем или разлагањем ствара заштитна атмосфера у зони навара. Сама жица образује заштитни гас и троску током наваривања. Пуњене жице, како за наваривање отвореним луком тако и за ГМА заваривање, могу бити израђене у облику попречних пресека датих на слици 6.2.



**Слика 6.2** Примери попречних пресека обложених жица [14]

У прва три типа челика облога учествује са 75 до 85% у тежини саме жице и око 75% у површини попречног пресека.

Пуњене жице, у поређењу са пуним, имају одређене предности али и мане. Омогућују лако увођење не мале количине легирајућих елемената у метал шави. Количина легирајућих елемената убачена овим начином, креће се чак до 10%, што је веома важно при тврдом наваривању када за образовање карбида није могуће убацивати легирајуће елементе пуним жицама.

Пуњене жице одликују се бољим заваривачким карактеристикама него пуне, посебно што мање прште. Самозащитне жице су боље за рад на теренским условима јер су мање осетљиве на ударе ветра и промаје. Мана пуњених жица је издвајање веома велике количине дима и прашине што смањује видљивост и погоршава хигијенске и техничке услове. Применом одговарајућих заштитних гасова и одговарајућих електродних жица могу се заварити сви метали.

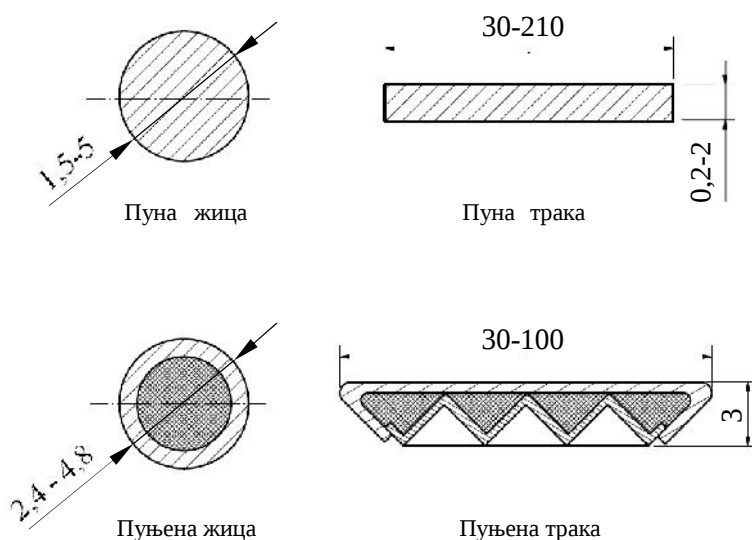
Количина унутрашњег пуњења је мања него код класичних електрода за ручно електролучно наваривање, зато што облога између осталог садржи и везну супстанцу чија је улога да веже прашак за жицу. Код пуњене жице са двоструким плаштом, спољни плашт садржи оксиде и карбонате а језгро дезоксидишуће елементе (Si и Mn), као и друге легирајуће елементе за слојеве отпорне на хабање и корозију. Пуњене жице су најчешће пречника 0,5 mm до 1,6 mm, ређе 2,4 mm као и 4,0 mm до 8,0 mm.

**Наваривање ТИГ поступком.** Наваривање ТИГ поступком је слично као и гасно заваривање, с тим што за разлику од гасног заваривања, код ТИГ заваривања нема штетног утицаја оксиацетиленског пламена на неке метале и легуре. За легуре за наваривање користе се жице или шипке пречника 1,0 mm до 8,0 mm дужине 500 mm. Додатни материјал се периодично уводи у зону лука који се одржава између волфрама електроде и основног материјала, тако да загрејани врх не изађе из заштитне зоне аргона.

Модификација код ТИГ поступка је примена легуре за наваривање у виду праха која се насипа хоризонтално на површине које се наварују. То су најчешће грануле карбида волфрама или хрома од којих се не могу направити жице или шипке. Стапање површинског слоја основног материјала, поменути карбиди у виду гранула се чврсто утискују што се највише користи за тврдо наваривање резних ивица сврдала за камен.

Легуре за наваривање ТИГ-поступком су најчешће стелити, олово, бронзе, легуре никла и аустенитни челик. Сви ови додатни материјали код ТИГ-наваривања могу бити у облику жице, шипке, пуњене жице или у облику праха.

**Наваривање под прахом (ЕПП).** Поступак наваривања под прахом је у већини случајева аутоматизован тако да се користе легуре у облику пуне или пуњене жице односно пуне или пуњене траке (слика 6.3).



**Слика 6.3** Пресеци пуних и пуњених трака и жица за наваривање под прахом [11]

Прашак, керамички или топлени, који такође спада у додатни материјал, поред тога што штити растоп он пречишћава метално купатило, регулише хемијски састав навара, стабилизује лук и утиче на облик шав. Захваљујући комбинацијама састава пуне или пуњене жице, односно траке и праха могу се депоновати слојеви од нискоугљеничних и нисколегираних челика, високолегираних и специјалних челика, легура, кобалта, никла, хрома, висококвалитетних гвожђа и легура алуминијума и бакра. У случају када се на челичне зидове наноси слој од бакарних легура потребно је најпре нанети пластичан међуслој од аустенитног челика или легура Ni-Cu-Al.

**Наваривање плазмом, плазмено наваривање прашком.** У облику прашка за наваривање користе се легуре на бази кобалта, никла, гвожђа, хрома, бакра и калаја. Исто се тако добри резултати постижу наношењем праха од нерђајућих челика, тешко топљивих метала као и честица карбида, волфрама укључених у матрицу легура никла или кобалта.

**Плазмено ТИГ-наваривање.** Код плазменог ТИГ-наваривања образује се навар довођењем загрејане или хладне жице која се доводи у зону лука и која се топи са површинским слојем. Легуре за наваривање у облику пуне или пуњене жице (1,2 mm - 2,0 mm) доводе се преко електронски управљаног давача у зону лука, у близини плазмене

млазнице. Најчешће се израђују навари од аустенитног челика, легуре никла, као и легуре бакра.

**Плазмено МИГ-наваривање.** За плазмено МИГ-наваривање користе се жице које могу бити пуне или пуњене, пречника од 0,8 mm до 2,4 mm. Жице дају наваре састава угљеничних челика, легура отпорних на корозију, легура бакра, легура никла и легура алуминијума.

| Додатни материјал                            | Поступак заваривања – означавање према EN ISO 4063 |         |                      |     |                                              |         |                    |    |    |     |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------|----------------------|-----|----------------------------------------------|---------|--------------------|----|----|-----|
|                                              | 111                                                | 131/135 | 136/137              | 114 | 141                                          | 121/122 | 72                 | 15 | 52 | 311 |
| Обложена електрода                           | +                                                  | -       | -                    | -   | -                                            | -       | -                  | -  | -  | -   |
| Ливена шипка                                 | -                                                  | -       | -                    | -   | +                                            | -       | -                  | *  | -  | +   |
| Пуна жица                                    | -                                                  | +       | -                    | -   | +                                            | +       | -                  | +  | +  | +   |
| Пуна трака                                   | -                                                  | *       | -                    | -   | +                                            | +       | +                  | +  | *  | -   |
| Пуњена жица                                  | -                                                  | -       | +                    | +   | +                                            | +       | *                  | +  | +  | -   |
| Пуњена трака                                 | -                                                  | -       | *                    | -   | *                                            | +       | *                  | *  | -  | +   |
| Пуњена шипка                                 | -                                                  | -       | -                    | -   | +                                            | -       | -                  | -  | -  | +   |
| Синтерована трака                            | -                                                  | *       | -                    | -   | +                                            | +       | +                  | +  | *  | -   |
| Синтерована шипка                            | -                                                  | -       | -                    | -   | +                                            | -       | -                  | -  | -  | +   |
| Метални прашак                               | -                                                  | -       | -                    | -   | -                                            | -       | -                  | +  | +  | +   |
| 15-плазма                                    |                                                    |         |                      |     | 131-МИГ                                      |         |                    |    |    |     |
| 52-ласер                                     |                                                    |         |                      |     | 135-МАГ                                      |         |                    |    |    |     |
| 72-под троском                               |                                                    |         |                      |     | 136-самозащитна жица у заштити активног гаса |         |                    |    |    |     |
| 111-ручно електролучно обложеном електродом  |                                                    |         |                      |     | 137-самозащитна жица у заштити инертног гаса |         |                    |    |    |     |
| 114-самозащитна пуњена жица                  |                                                    |         |                      |     | 141-ТИГ                                      |         |                    |    |    |     |
| 121-под прашком                              |                                                    |         |                      |     | 311-гасно пламено                            |         |                    |    |    |     |
| 122-под прашком са електродом у облику траке |                                                    |         |                      |     |                                              |         |                    |    |    |     |
| +: у употреби                                |                                                    |         | *: могућа производња |     |                                              |         | -: није у употреби |    |    |     |

**Табела 6.4** Испоруке облика додатног материјала у зависности од поступка наваривања [13]

На основу приказане табеле 6.4, може се рећи да се највећи број различитих додатних материјала може применити за ТИГ–поступак наваривања, а да се најмањи број облика додатног материјала примењује за РЕЛ-поступак наваривања у виду обложених електрода. Међутим, не може се рећи да је мана РЕЛ-поступка наваривања та што кориси само један облик електрода. Треба имати у виду да се највећи избор легирајућих

елемената може наћи у виду пуњених жица и пуњених трака а затим у обложеним електродама (табела 6.5).

| Симбол легуре                                               | Пуњена жица и пуњена шипка | Пуњена трака | Пуњена трака и синтерована трака | Пуна жица и пуна шипка | Синтерована шипка | Обложена електрода | Ливена шипка | Метални прашак |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------|----------------|
| Fe1                                                         | +                          | +            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe2                                                         | +                          | +            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe3                                                         | +                          | +            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe4                                                         | +                          | *            | *                                | +                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe5                                                         | +                          | *            | *                                | +                      | -                 | +                  | -            | *              |
| Fe6                                                         | +                          | +            | -                                | -                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe7                                                         | +                          | +            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | +              |
| Fe8                                                         | +                          | +            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe9                                                         | +                          | +            | +                                | -                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe10                                                        | +                          | +            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe11                                                        | +                          | +            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe12                                                        | +                          | +            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe13                                                        | +                          | -            | -                                | -                      | -                 | *                  | -            | -              |
| Fe14                                                        | +                          | *            | +                                | -                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe15                                                        | +                          | -            | -                                | -                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe16                                                        | +                          | -            | +                                | -                      | -                 | +                  | -            | -              |
| Fe20                                                        | +                          | -            | +                                | -                      | +                 | +                  | +            | -              |
| Ni1                                                         | +                          | -            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | +              |
| Ni2                                                         | +                          | -            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | +              |
| Ni3                                                         | +                          | -            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | +              |
| Ni4                                                         | +                          | -            | +                                | +                      | -                 | +                  | -            | +              |
| Ni20                                                        | +                          | -            | +                                | -                      | +                 | +                  | +            | +              |
| Co1                                                         | +                          | -            | *                                | +                      | -                 | +                  | +            | +              |
| Co2                                                         | +                          | -            | *                                | +                      | -                 | +                  | +            | +              |
| Co3                                                         | +                          | -            | *                                | +                      | -                 | +                  | +            | +              |
| Cu1                                                         | +                          | -            | -                                | +                      | -                 | +                  | -            | +              |
| Al1                                                         | +                          | *            | -                                | -                      | -                 | -                  | -            | +              |
| Cr1                                                         | -                          | -            | -                                | -                      | *                 | -                  | -            | +              |
| +: у употреби    *: могућа производња    -: није у употреби |                            |              |                                  |                        |                   |                    |              |                |

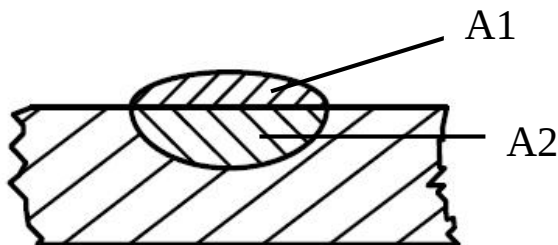
**Табела 6.5** Облици додатног материјала у зависности од легуре

## 7.0 Поређење метода наваривања са аспекта примењеног поступка заваривања

Да би се изабрао поступак заваривања потребно је анализирати више фактора [1]:

- Квалитет и димензије завариваног материјала са свим његовим особинама које карактеришу његова физичко-технолошка својства (јачину, пластичност, заварљивост...);
- Количину и квалитет производа, као и економичност завареног производа;
- Карактеристике извора енергије, односно расположиву опрему за извођење радова, као и потребно време израде;
- Величину заварене конструкције односно елемента, што је од утицаја на избор места заваривања - у радионици или на терену, крупно габаритни делови и конструкције заварују се помоћу ручних или полуаутоматизованих преносних уређаја. Елементи и конструкције малих димензија могу се заваривати зависно од броја комада, било механизованим поступцима или ручно;
- Цена уређаја.

При наваривању јавља се један значајан чинилац о којем се мора водити рачуна, а то је степен мешања или како се у англосаксонској терминологији каже разблаживање навара основним материјалом. Пошто се у већини случајева разликују хемијски састави основног материјала (подлоге) и додатног материјала (легури за наваривање), то је пожељно да дубина уваривања буде што мања јер се тиме смањује разблаживање навара. Управо због ове појаве разблаживања, у већини случајева корисне су особине навара (тврдоћа, отпорност на хабање и друго) које се дају у каталогу произвођача за наваривање. У неким случајевима уноси се пластични међуслој између подлоге и првог слоја легуре за наваривање, чиме се разблаживање своди на најмању могућу меру али и поништавају штетне последице због разлике у коефицијентима термичког ширења материјала и превлаке. Однос мешања може се одредити из попречног пресека навара након наваривања:  $D=A_2/(A_1+A_2)$ , где је  $D$  однос мешања  $0 < D < 1$ ,  $A_2$ -површина увара,  $A_1$ -површина навара.



Слика 7.1 Попречни пресек навара; A1-површина навара, A2-површина увара [14]

Дебљина навара у првом пролазу се креће од 0,8 mm до 5 mm, а када се траже дебљи навари наноси се више слојева; ипак се за тврде и веома крпе легуре уводи ограничење од највише два слоја укупне дебљине 8 mm. Навари изведени гасним пламеном и ТИГ

поступком могу бити тањи од 1 mm. Скупљање навара при очвршћавању може изазвати велике сопствене напоне и деформације, јер при наваривању нема могућности за технолошко уравнотежење сопствених напона за наваривање са супротне стране. При наваривању делова велике крутости неопходно је предгревање до 400°C за електролучне поступке наваривања и до 600°C при наваривању гасним пламеном. Квалитет површине је при наваривању веома груб, па се мора прибећи накнадној механичкој обради. Најквалитетнија површина из групе поступака електролучног наваривања добија се применом ТИГ-а (надвишење око 1 mm), а најгрубља код РЕЛ-поступка (надвишење око 2 mm). За делове као што су ведрице багера, чељустии дробилице за камен, радни елементи неких пољопривредних машина није потребна никаква накнадна обрада, али се код наваривања блокова мотора, зупчастих венаца, седишта вентила и слично, мора бирати легура за наваривање која се може механички обрађивати. При наваривању алата пре механичке обраде навар се омекшава жарењем, а коначна тврдоћа добија се накнадном термичком обрадом.

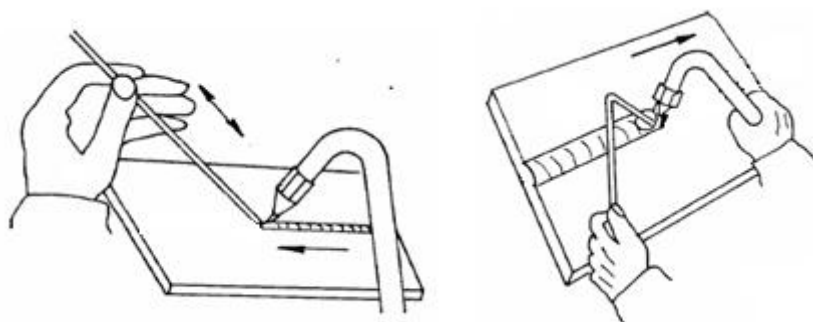
Количина основног материјала раствореног у навареном слоју мења се зависно од броја нанетих слојева и параметара наваривања, за дати основни и додатни материјал и усвојени поступак наваривања. При томе се дефинише однос мешања као процентуални удео основног материјала у навару; његовим порастом опадају корисне особине навара (тврдоћа, отпор према хабању и слично). Понекад се применом погодног међуслоја однос мешања знатно смањује и истовремено умањује непожељне последице које настају због различитих коефицијената ширења односно скупљања основног и додатног материјала.

Оријентационо се однос мешања узима у границама до 5% код наваривања гасним пламеном, 10-30% код РЕЛ и наваривања пуњеним жицама, док је код ЕПП поступка 10-40%. Разумљиво је да се у оквиру наведених вредности, за исте материјале и поступке наваривања, однос мешања може мењати зависно од основних параметара процеса, првенствено јачине струје, брзине полагања навара и величине преклапања суседних навара.

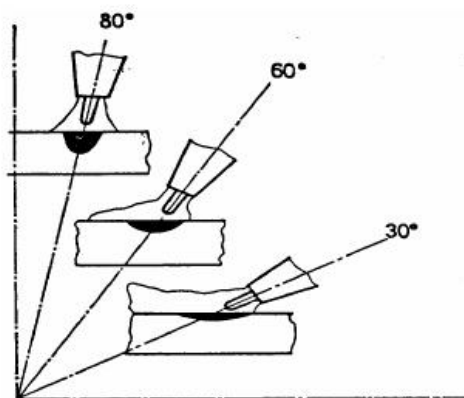
| Поступак наваривања                                                                             | Начин извођења | Облик легуре за тврдо наваривање                                                                              | Разблаживање основним материјалом [%] | Брзина депоновања [kg/h] | Минимална дебелина стапања [mm] |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| ГПЗ                                                                                             | Р              | Ливене шипке, пуњене жице                                                                                     | 1-10                                  | 0,45-2,7                 | 0,8                             |
|                                                                                                 | Р              | Прашак                                                                                                        |                                       | 0,45-6,8                 |                                 |
|                                                                                                 | А              | Веома дуге ливене шипке, пуњена жица                                                                          |                                       | 0,45-2,7                 |                                 |
| РЕЛ                                                                                             | Р              | Обложене ливене шипке, обложене пуњене шипке                                                                  | 15-25                                 | 0,45-2,7                 | 3,2                             |
| Отворен лук                                                                                     | 1/2 А          | Легурама пуњене жице                                                                                          | 15-25                                 | 2,27-11,35               | 3,2                             |
|                                                                                                 | А              |                                                                                                               |                                       |                          |                                 |
| ТИГ                                                                                             | Р              | Ливене шипке, пуњене жице, пуњене жице, дуге ливене шипке (300 mm), карбид W у ливеној шипки или пуњеној жици | 10-20                                 | 0,45-3,6                 | 2,4                             |
|                                                                                                 | А              |                                                                                                               |                                       |                          |                                 |
| ЕПП                                                                                             | 1/2 А          | Голе пуњене жице                                                                                              | 20-60                                 | 4,5-9                    | 3,2                             |
|                                                                                                 | А1             |                                                                                                               | 30-60                                 | 4,5-11,3                 | 3,2                             |
|                                                                                                 | AV             |                                                                                                               | 15-25                                 | 11,3-27                  | 4,8                             |
| Плазмено                                                                                        | А              | Прашак са или без гранула карбида W                                                                           | 5-30                                  | 0,45-6,8                 | 0,8                             |
| Р-ручно; А-аутоматски; 1/2А-полуаутоматски; А1-аутоматски, једна жица; AV-аутоматски, више жица |                |                                                                                                               |                                       |                          |                                 |

**Табела 7.1** Упоредне карактеристике поступака наваривања

Применом гасног наваривања врло мало се топи основни материјал, тако да однос мешања може бити нижи од 1%, што је посебно важно када се користе скупии додатни материјали у облику мешавине карбида у праху (стелити). Извођач веома лако управља процесом па се навар може нанети и на површине малих димензија. Могу се наваривати уски канали и жљебови и наносити слојеви дебелине испод 1 mm, али са малом брзином полагања додатног материјала која ретко прелази вредност од 1 kg/h. Приликом гасног наваривања извођачу су обе руке заузеле. Прах се на излазу из горионика топи и у облику распршених капљица наноси на радне површине. Ово је у суштини метализација јер се основни метал не топи. Дебелина нанетог слоја износи 0,05 mm до 3 mm, а брзина полагања навара 0,5 kg/h. Код гасног наваривања наваривање се изводи техником улево као и техником удесно (слика 7.2), при чему техника улево даје мање разблаживање навара. Препоручен нагиб горионика при наваривању је 45-60° (слика 7.3), а додатног материјала, то јест жице или шипке 30-45°.



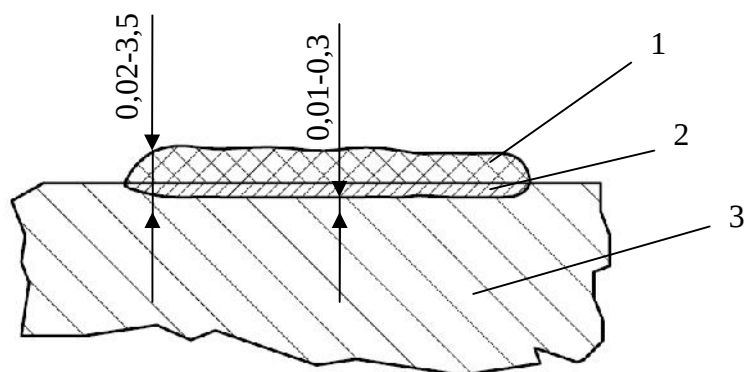
**Слика 7.2** а) наваривање улево, б) наваривање удесно [15]



Слика 7.3 Угао нагиба горионика на облик завара

Пре наваривања жицом или шипком, потребно је пажљиво очистити одговарајуће површине, за челике топитељ није потребан ако је радна површина чиста и сува, али ако су неке површине неприступачне за механичко чишћење неопходан је топитељ. За тврдо наваривање ливеног гвожђа редовно се употребљава топитељ, мада и легура за наваривање обично садржи дезоксидатор. У зависности од потребе радни предмети се после чишћења предгревају, а затим загревају гасним пламеном до црвеног усијања без обзира на то да ли је или није изведено предгревање. Кад топљење започне површина заблиста, „озноји се”, онда капљице жице квасе подлогу и разливају се по њој. За тврдо наваривање стелитним шипкама (60% Co, 25% Cr, 6% W, 1,5% C, 1% Si) примењује се лакоредукујући пламен - троперни пламен (вишак  $C_2H_2$ , 20-30%). Овај пламен подпомаже редукцију оксида и такође обогаћује угљеником површински слој чиме му се смањује температура топљења у односу на дубинске слојеве и омогућује „знојење”. Тврди карбидни материјали су обично зрнастог облика и смештају се у металну цевчицу од нискоугљеничног челика да би могли да се користе са обичном опремом за гасно заваривање. При топљењу цевчице, на радној површини комада ствара се „мека” матрица у коју се равномерно устискују карбиди, веома отпорни на хабање.

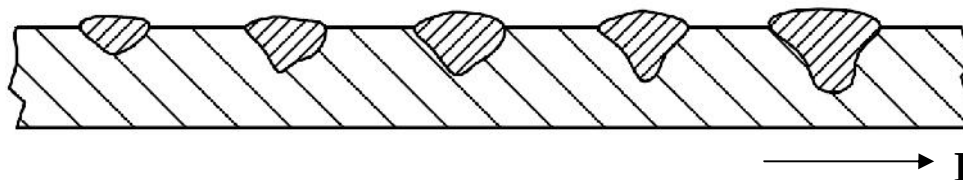
Основна предност методе наваривања прахом јесте могућност да се искористе и оне легуре које немогуће направити у облику жице или шипке. Захваљујући овом поступку наваривања у једном пролазу добијају се глатки слојеви, без порозности дебљине 0,02-3,5 mm (слика 7.4). У већини случајева се први везивни слој дебљине око 0,25 mm наноси тек после предгревања на 400-800°C, а затим се наноси завршни слој тражене дебљине. За дебљине навара до 0,5 mm није потребан посредан слој већ се полаже једнопролазан навар. Предност овог поступка је што квалитет навара не зависи битније од вештине заваривача, као што је случај код наваривања жицом. Поред предности као што су могућност наваривања равних, цилиндричних, закошених површина, минималног уваривања, високог квашења навара, док је мана често потребно предгревање и накнадна термичка обрада (због заосталих напона и структурних промена у ЗУТ-у).



Слика 7.4 Навар добијен наваривањем прашком; 1-навар, 2-зона стапања (разблаживање 2-10%), 3-подлога [11]

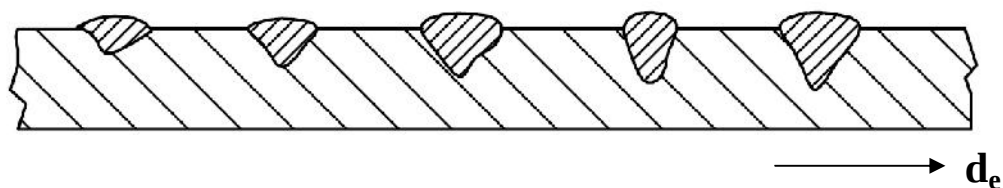
У неким случајевима када је потребан навар велике дебљине, главни његов део може се нанети топљењем шипке која даје релативно пластичан навар, а завршни слој помоћу прашка који садржи 50% или више волфрам карбиде или друге веома тврде метале. У овим и другим случајевима уместо термина наваривање често се користи израз прскање растопљеним прахом. Поступак је нарочито погодан за танке наваре дебљине 0,25 mm до 0,50 mm. Због лоше заварљивости сивог, темпер и нодуларног (ковног) лива у односу на челик, ливена гвожђа се ређе гасно наварују, мада у том случају може бити изузетак ковно гвожђе. Наваривање стелитима помоћу гасног пламена примењује се за поправку ситних делова као што су зуби механичких тестера за дрво, печурке вентила мотора са унутрашњим сагоревањем, ваљци транспортних трака и слично.

За РЕЛ-поступак наваривања користи се иста опрема као и за РЕЛ заваривање с тим што су енергетски параметри ( $U$ ,  $I$ ,  $v_z$ ) модификовани како би се смањила дубина уваривања, а тиме и разблаживање навара стопљеним металом подлоге. Јачина струје значајно утиче на облик шава као и на његове механичке особине. При повећању јачине струје надвишење и дубина уваривања се повећавају, док се ширина шава практично не мења (слика 7.5). Сувише велика јачина струја даје грубозрну структуру метала шава и повећава сагоревање легирајућих елемената, а недовољна јачина струја малу дубину уваривања и слабу везу шава и основног метала.



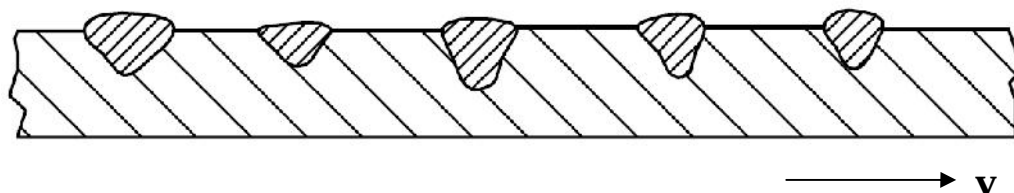
Слика 7.5 Зависност облика шава од јачине струје [16]

Повећањем пречника електроде повећава се одвођење топлоте и смањује густина струје, што сужава шав и повећава дубину уваривања (слика 7.6).



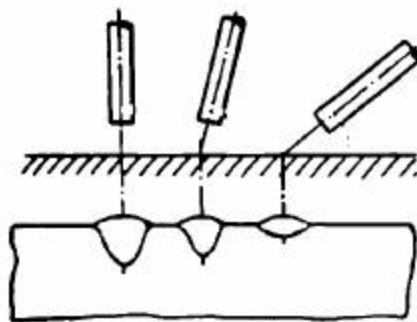
Слика 7.6 Зависност облика шава од пречника електроде

Повећањем брзине заваривања смањује се количина растопљеног додатног и основног метала, што утиче на димензије шава тако да се ширина шава смањује, дубина уваривања расте до неке вредности, па онда опада, а надвишење прво опада, па расте, (слика 7.7). Недовољна брзина заваривања условљава грешке типа налепљивања и укључака троске, а пребрзо заваривање даје превелико надвишење шава.



Слика 7.7 Утицај брзине заваривања на облик шава

Нагиб електроде у равни управној на раван предмета који се заварују утиче првенствено на дубину уваривања, а у мањој мери на ширину и надвишење шава. Највећа дубина уваривања постиже се при углу од  $90^\circ$ , односно када је електрода управна на површину заваривања (слика 7.8). Избор нагиба електроде зависи од основног материјала, облоге електроде, положаја заваривања и врсте споја.



Слика 7.8 Утицај нагиба електроде на облик шава

Однос мешања износи 10-40%, дебљина навара се креће у границама 1 mm до 5 mm, а брзина полагања навара може се добити истим језгром електроде од нискоугљеничног челика али са другачијим саставима облога електроде. Тражени хемијски састав навареног слоја и потврдна тврдоћа постижу се у трећем слоју навара, јер први слој, а у мањој мери и други, садржи састојке подлоге. Тврдоћа навара у великој мери зависи и од технолошких услова наваривања. Највећа тврдоћа добија се без предгревања подлоге и вишеслојним наваривањем. Али, у том случају постоји опасност од појаве прслина у првом навару, тим

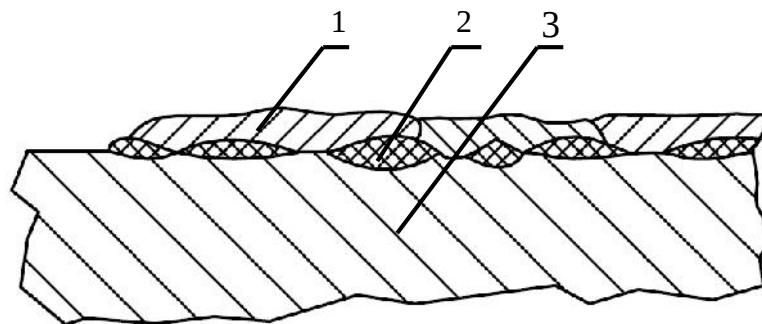
већа што је већа тврдоћа нанетог слоја. Због тога опада тврдоћа навара услед смањења брзине хлађења. Веома је широк обим примене ручно електролуног наваривања како за репаратурне радове тако и за наношење тврдых навара на радне површине различитих делова и алата. При репаратури похабаних делова или поновном наваривању потребно је брушењем одстранити оштећена места, нарочито када су у питању прслине које могу деловати као концентратори напона.

У вези са предгревањем и накнадном термичком обрадом не могу се дати опште препоруке. Иако се ручно електролучно наваривање у већини случајева може извести без предгревања, то не важи за полагање дебелих навара на масивне челичне подлоге са садржајима угљеника изнад 0,5%. У том случају део се мора предгрејати до 150°C, и та температура одржавати за време наваривања. Супротно, при наваривању аустенитног Мп челика, који ојачава мартензитном трансформацијом услед површинске деформације на хладно, тражи се минимално уношење топлоте (кратки навари) и брзо хлађење, на пример директно - принудним струјањем ваздуха или посредно - водом.

Репаратуром локално оштећених делова, као што су зупчаници, зупчасте летве, куке дизалица, ваљци и друго, изводи се базичном електродом легираном молбденом. При наношењу навара мора се предвидети и додатак за механичку обраду. За репаратурно наваривање точкова шинских возила, скретница трамвајских и железничких шина користи се нисколегирана базична електрода чистог метала навара 0,2% С, 2% Мп, 0,6% Si, 0,6% Cr које у сировом стању даје тврдоћу од 26 до 37 HRC, а после отпуштања (400°C/5h) 34 HRC. Места наваривања се локално предгревају у опсегу од 150 - 200 °C.

Код материјала склоних појави прслина у ЗУТ-у наносе се кратки завари ширине 1 до 2 пречника електроде што умањује разблаживање, сопствене напоне и деформације. Супротно томе се код материјала добре заварљивости полажу широки завари и наварују се струјом веће јачине. Посебно се при наваривању великих површина помоћу кртих легура препоручује наношење пластичног међуслоја у облику растављених завара нанетих никловим или аустенитним електродама. Наредни слојеви изводе се са максималном допуштеном јачином струје, широким заварима (10 d<sub>e</sub>) који се преклапају, како је то приказано на слици 7.9.

Пластичан међуслој препоручује се не само када се наварују крти материјли, већ и у случајевима када се по термо-физичким особинама знатно разликују легуре за наваривање и подлоге. Тако се на пример при наваривању ливеног гвожђа помоћу бронзе Cu-Ni-Al-Mg препоручује да се нанесе пластичан међуслој електродом од никла.



**Слика 7.9** Начин наношења дебелих наваара од кртих материјала; 1-навар од легуре на основу 60% волфрама карбида, 2-навар од челика 18Cr8Ni, 3-челик Č1212 [11]

Предмети отпорни на абразију под притиском, израђују се од манганског аустенитног челика или челичног лива, на пример делови дробилица, гусенице возила и слично а репарирају се базичном манганском електродом. Навар аустенитних манганских електрода у почетку рада нема велику тврдоћу већ она расте у плитким слојевима који се деформишу на хладно, све до постизања максималне вредности. Потребна деформација на хладно у неким случајевима се постиже у радним условима, а понекад искивањем охлађеног навара.

За репаратуру ковачких матрица од челика за рад на топло примењују се нисколегиране електроде које дају чист метал навар приближан основном материјалу (0,32-0,60% C, 0,5-2,6% Cr, 1,4-1,8% Ni и 0,25-0,7% Mo, и наравно Si, Mn, P, S). Пре наваривања неопходно је предгревање на 300-350°C, а затим споро хлађење, и најзад механичка обрада на коначним димензијама.

Приликом наваривања алата за рад на хладно разликују се два случаја [11]:

а) Репаратурно наваривање и

б) Израда нових алата од конструкционог челика и наваривање радних (хабајућих) површина алатним челицима.

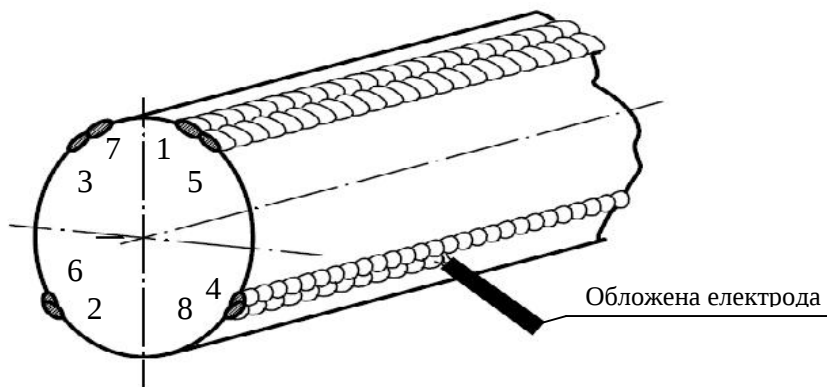
Репаратурно наваривање алата који раде на хладно углавном се односи на матрице, извлакаче и слично. Неопходно је предгревање на 100-300°C и примена електрода са 15% Co, 15% W, односно 15% Co, 15% Mo (код обе још: 0,15% C, 0,5% Mn, 0,5% Si), при чему се Co-W навар тврдоће у сировом стању 300-350 HV обрађује резањем, а Co-Mo навар тврдоће 320-400 HV искључиво брушењем. После механичке обраде следи дисперзионо отврдњавање које се изводи жарењем навареног алата при 500°C у току 3-5 h, зависно од његове величине. Тиме се постиже тврдоћа од 350-450 HV за Co-W наваре и 500-600 HV за Co-Mo наваре.

У случају алата за рад на хладно, као што су ножеви маказа за лим, резне ивице матрица, просекачи, алати за дубоко извлачење, алати за израду завртњева ваљањем, примењује се такође Co-Mo електроде (са 20% Co и 10% Mo, остало као у преходном случају). Оне дају

тврдоћу у сировом стању 420%-480% HV, а после жарења на 500°C тврдоћу навара од 700 HV.

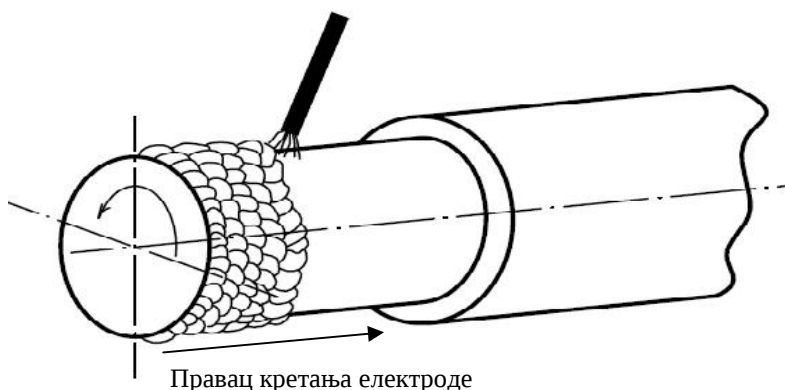
Алати за обраду резањем се по правилу не репарирају наваривањем, али се ипак на овај начин могу на резне ивици алата од угљеничних челика нанети оштрице од брзорезног челика. При полагању малих навара на резни део стругарског ножа, применом електроде са 0,9% C, 5% Cr, 18% W, 1,0% V добија се тврдоћа 57-62 HRC. После наваривања резни део ножа се бруси на радни облик и најзад примењује двоструко отпуштање при 560°C/h.

Наваривање цилиндричних површина може се извести полагањем уздужних, или код делова већег пречника, кружних навара. Тако се код рукаваца, осовине и слично први навари наносе на дијаметрално супротним странама да би се уравнотежиле термичке деформације (слика 7.10)



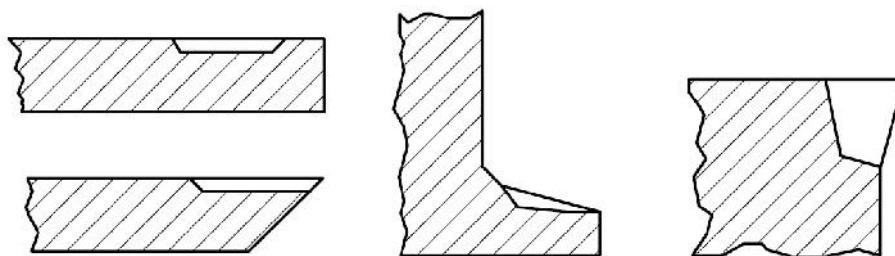
**Слика 7.10** Редослед полагања навара РЕЛ поступком у циљу смањења деформација

Цилиндричне делове већег пречника најбоље је наваривати широким кружним наварима (слика 7.11), уз примену такозваних окретаљки или позиционера чији је задатак да радни део доводе у положај погодан за наваривање.



**Слика 7.11** Препоручени начин наваривања уз помоћ окретаљки

На крају, треба истаћи могућност РЕЛ наваривања стелитним електродама, у случајевима када је неопходна знатна тврдоћа на повишеним температурама, велика отпорност на корозију и ерозију у сагорелим гасовима и прегрејаној пари. Осим тога, стелитни навари имају високу отпорност на абразију, термичке ударе, као и добре клизне особине и могућност полирања. Стелитне легуре за наваривање израђују се у облику шипки и обложених електрода, па се може наваривати гасним пламеном, ТИГ и РЕЛ-поступком. Пре употребе, стелитне електроде се морају сушити при температури од 300°C, у току 2-4 h. Наварују се једносмерном струјом позитивног поларитета (E+) са најмање два слоја и са што мањом јачином струје. Оштећене предмете треба припремити као што је приказано на слици 7.12, да би се у одговарајућим гнездима сместила стелитна легура. После површинске припреме, наваривани део треба предгрејати до 600°C и ту температуру одржавати за све време наваривања. Хлађење до 400°C не сме да буде брже од 50°C/h, најбоље заједно са пећи у којој је и извршено предгревање.



**Слика 7.12** Припрема делова за наваривање стелитом

Наваривање отвореним луком је полуаутоматски поступак код којег се не кориси ни топител нити заштитни гас, већ само пуњена електродна жица која у језгру садржи спрашене легирајуће елементе и дезоксидаторе. Предност овог, у односу на друге електролучне поступке, јесте једноставна опрема, јер нису потребни сложени прибори за довођење прашка или заштитног гаса. Зато се сврстава, у најједноставније поступке полуаутоматског заваривања или наваривања, који може користити исти извор струје и исти пиштољ као и за ГМА-поступак. Може се радити на отвореном простору.

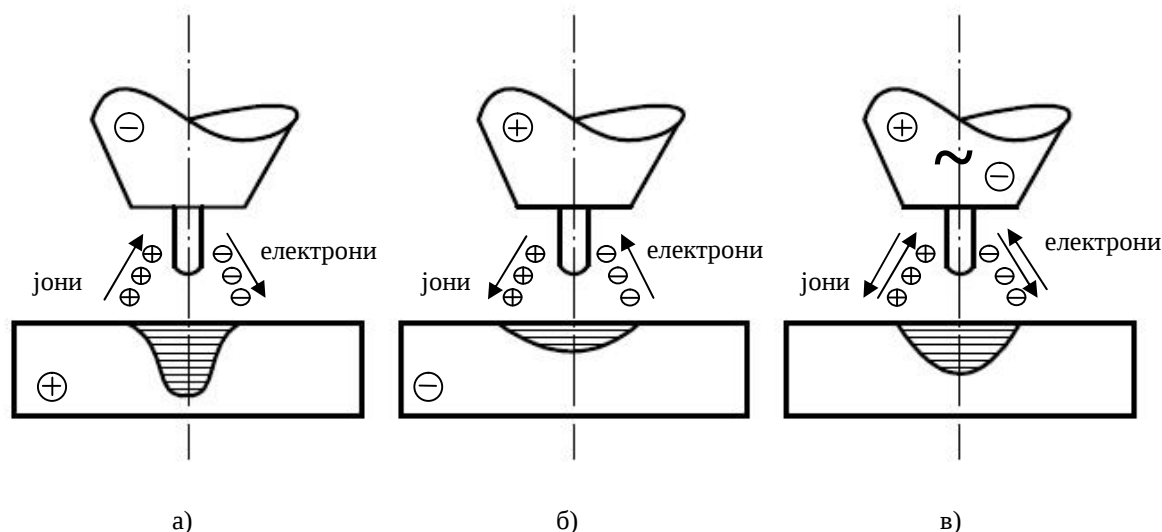
Дебљина навареног слоја у једном пролазу креће се у границама од 3 mm до 6 mm, а већ се у првом пролазу постижу потребне експлоатационе особине. Ипак се у бројним примерима наваривања равних и цилиндричних површина траже бар два слоја.

Наваривање ТИГ-поступком углавном се примењује за репаратурно наваривање ситнијих делова. Приликом коришћења додатних материјала, заваривачу су обе руке заузете. Поред ручног вођења пиштоља за наваривање могућа је адаптација поступка помоћу посебних механизма којима се доводи легура за наваривање. У том смислу је карактеристична примена ТИГ-наваривања за пооловљавање зидова челичних резервоара. Оловна жица аутоматски се доводи у зону лука који се одржава између волфрамске електроде и челичне подлоге у заштити аргона. Поларитет је негативан (E-).

Резервоар се окреће, за заваривачки уређај аксијално помера тако да се може нанети херметична оловна превлака. Пре него што се приступи наваривању, зидови се морају очистити од рђе, коварине, масти и другог до металног сјаја, а затим на чисте површине треба нанети прелазни слој од калаја или калајно-оловне фигуре.

Највећу примену има ручно ТИГ-наваривање, који се изводи слично као и гасно наваривање. Његова предност је што за разлику од гасног заваривања нема штетног утицаја окси-ацетиленског пламена на неке легуре и метале.

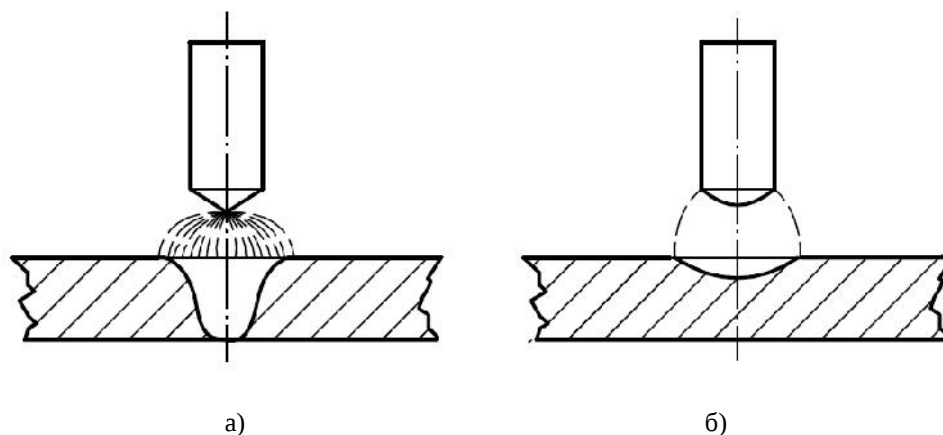
Поступак ТИГ-наваривања се готово једино примењује за наваривање високолегираних челика, као и алуминијума и његових легура. Поступак ТИГ наваривања спада у технике са малом дубином уваривања којом се могу наварити веома мале површине. Код ТИГ поступка се најчешће користе наизменична струја (НС) и једносмерна струја директне поларности (ЈСДП) (минус пол на електроди). Утицај врсте струје на облик шава изведен ТИГ поступком је приказан на слика 7.13. Једносмерна струја директне поларности даје најужи и најдубљи шав, слика 7.13а. Топлота при заваривању се распоређује приближно  $1/3$  на електроду, а  $2/3$  на основни материјал. Индиректна поларност даје најшири и најплићи шав, слика 7.13б. Топлота при заваривању се распоређује супротно претходном случају, односно  $2/3$  на електроду, а  $1/3$  на основни материјал, што је нерационално, даје нестабилан лук и прегрејава електроду и горионик. Наизменична струја даје шав ширине и дубине измеђа два поларитета једносмерне струје, слика 7.13в. С обзиром на природу наизменичне струје (промена поларитета 50 пута у секунди) електрични лук је нестабилан.



Слика 7.13 Облик шава у зависности од врсте струје: а) ЈСДП, б) ЈСИП, в) НС [15]

На стабилност лука и дубину уваривања битно утиче и облик врха електроде. Постоје два основна облика врха електроде: конусни и сферни. У првом случају густина струје је знатно већа, па је струјни лук концентрисан, слика 7.14а. У другом случају јачина струје је

мала, лук није концентрисан, па се добија знатно мања дубина уваривања, а већа ширина шава, слика 7.14б. Конусни облик се користи са ЈС, а сферни са НС, слика 7.14.



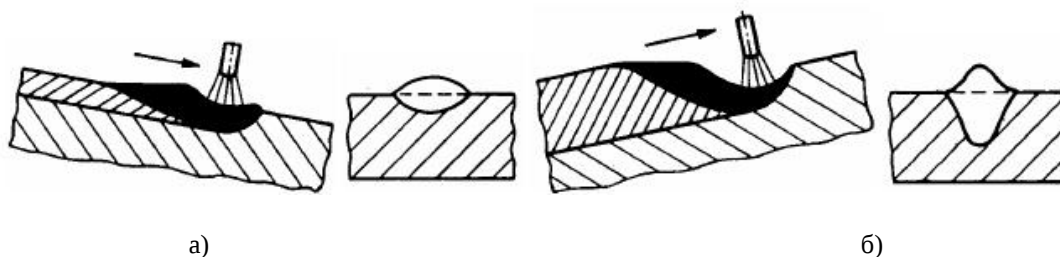
**Слика 7.14** Утицај облика врха електроде на облик шава

Дебљина депонованог слоја навара у једном пролазу је 2 mm до 4 mm, однос мешања 2-40%, а брзина полагања навара до 2 kg/h. Техником улево се постиже мање разблаживање а већа количина депонованог материјала у јединици времена (продуктивније наваривање). Није погодно ТИГ-наваривање за извођење радова на терену већ само у радионицама.

Наваривање под прашком се у пракси доста користи због високе продуктивности и високог квалитета изведених навара. Под прашком се наварују само масивни делови постављени у хоризонталан положај, при чему додатни материјал може бити у облику жице (једна или две) или траке. Овај поступак посебно је повољан за наваривање предмета великог габарита, где се врши аутоматско додавање жице, а цео поступак се одвија под гранулисаним прахом.

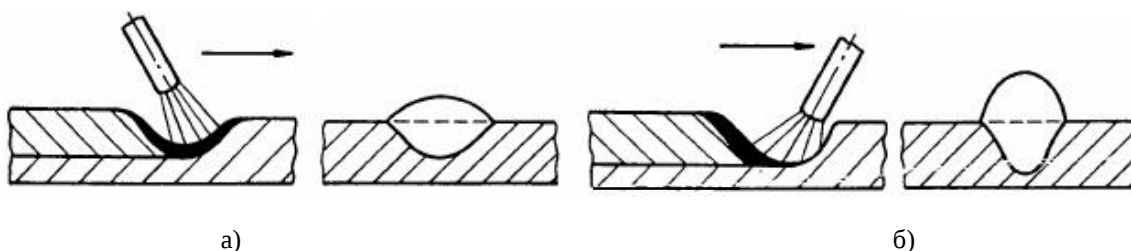
Основни параметри ЕПП заваривања су врста и јачина струје, напон електричног лука, брзина заваривања и пречник електродне жице. Осим основних параметара, на облик метала шава битније утичу још и врста и гранулација прашка, нагиб електродне жице и радног комада. Треба имати у виду да јачина струје директно одређује брзину топљења електродне жице, односно ефикасност процеса, па се по правилу тежи што већој вредности јачине струје. Максимална јачина струје је ограничена дозвољеном густином струје, односно пречником жице. Повишењем напона лука повећава се потрошња прашка и поспешује прелаз легирајућих елемената из прашка у метал шава. Међутим, сувише висок напон лука даје облик шава који је склон прслинама и налепљивању.

Као што је већ поменуто, електролучно заваривање под прашком је могуће само у хоризонталном положају, или са малим нагибом радног комада. Нагиб радног комада може да се искористи код наваривања да би се дубина уваривања смањила, слика 7.15.



Слика 7.15 Утицај нагиба радног комада на облик шави; а) нагиб надолу, б) нагиб нагоре

У зависности од нагиба жице разликује се заваривање унапред, слика 7.16а, и уназад, слика 7.16б. Код заваривања унапред лук и топлота су усмерени према основном металу, а код заваривања уназад према металној купки, услед чега се растоп потискује из жлеба и добија метал шави са превеликим надвишењем, слика 7.16б.



Слика 7.16 Утицај нагиба електродне жице на облик шави; а) заваривање унапред, б) заваривање уназад

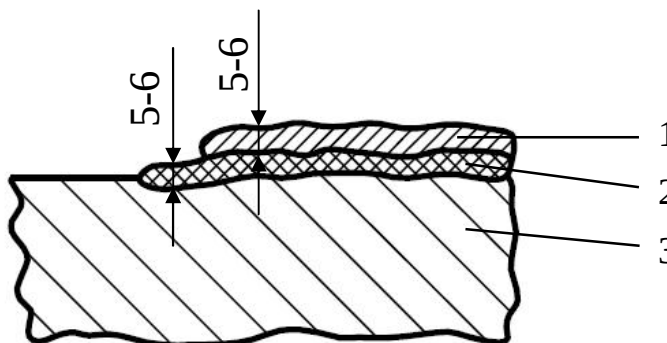
ЕПП наваривање највише се примењује у случају регенерације челичних ваљака великог пречника (слика 7.17). Наваривање се изводи непрекидним процесом уз обртно кретање ваљка и транслаторно кретање заваривачке главе дуж осе ваљка. По правилу, наварени слојеви треба да имају већу тврдоћу и отпорност на хабање од основног материјала. Као и код других поступака наваривања делови се претходно пажљиво чисте и по потреби предгревају, нарочито ако садрже више од 0,35% С или су израђени од легираних челика.



Слика 7.17 Регенерација челичних ваљака великог пречника [17]

Може се применити наизменична или једносмерна струја позитивног или негативног поларитета. За ЕПП наваривање жицом пречника до 3 mm или траком (12,5 mm до 30 mm) x 0,5 mm препоручују се извори константног напона, а за веће димензије извори константне струје. Поред предности овог поступка као што су велика брзина депоновања (2-40 kg/h), равномерни квалитет, одлика му је заштићен лук (прекривен прашком) па нема прштања ужарених металних честица. У мане ЕПП-а се убраја: ограничена примена за једноставне делове, непримењивост за теренски рад, велико разблаживање (30-40%) те је потребно нанети два или три слоја дебљине 2-8 mm. Најчешће се удео основног материјала у навареном слоју смањује смањењем корака наваривања и ограничењем јачине струје. Наваривање под прахом не треба користити за репаратуру делова од аустенитног челика јер прекомерно унета топлота може довести до тога да ове легуре постану сувише крте. Наваривање се изводи попречним њихањем електроде тако да се оно врши у широком слоју. На овај начин постиже се висока продуктивност.

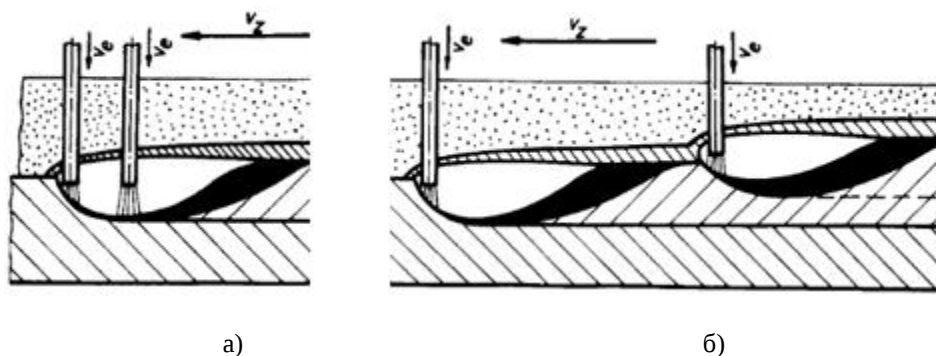
Друга област примене наваривања под прахом јесте наношење навара од нерђајућег челика, легура никла, или легура бакра на дебелозидне резервоаре за водену пару и хемијски активне материје. У случајевима када се на челичне зидове наноси заштитани слој од бакрених легура потребно је најпре нанети пластичан међуслој, како је то дато на слици 7.18.



**Слика 7.18** Начин полагања плакираног бакарног слоја на дебелозидни челични резервоар; 1-легура Cu, 2-аустенитни челик или легура Ni-Cu-Al, 3-нискоугљенични челик [11]

Пошто је већ прошло више од 40 година како се индустријски примењује заваривање под прахом, ова метода је довољно усавршена па се данас могу постићи како квалитетни навари, тако и једна од највећих продуктивности наваривања међу свим поступцима. Из тих разлога, у индустрији се примењује заваривање се једном електродном жицом, са две електродне жице и са пуњеном тракастом електродом.

Наваривање коришћењем две електродне жице може бити: у варијанти са заједничком металном купком, која се одликује јединственом кристализацијом метала шави и бржим хлађењем, слика 7.19а; или у варијанти са засебном металном купком, слика 7.19б, која се одликује споријим хлађењем.



**Слика 7.19** Шема заваривања са две електродне жице; а) са заједничком металном купком, б) са засебном металном купком [16]

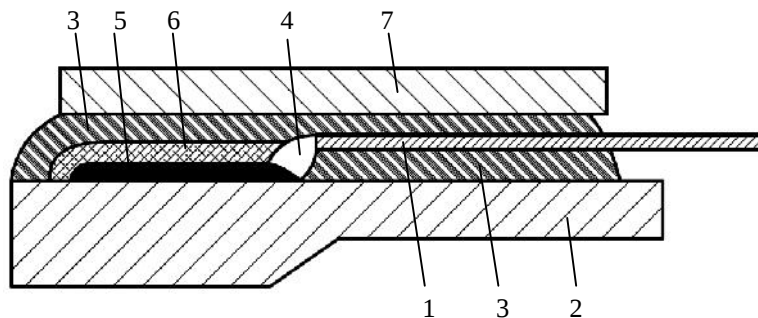
Овде се неће улазити у детаље везане за примену горе наведених варијанти, али се само наглашава да је и за поступак са једном жицом разрађено више модификација. ЕПП-поступак се може изводити спиралним кретањем заваривачке главе при чему се добија уски навар (слика 7.20б), осцилаторним кретање заваривачке главе амплитуде 30 mm до 100 mm (слика 7.20а), допунски се доводи додатни прах испред заваривачке главе, све у циљу да се смањи разблаживање, повећа продуктивност и снизи потрошња прашка и жице (обично 1-2 kg прашка на 1 kg жице). Применом пуњених трака потрошња прашка може се смањити и до 30% уз истовремено смањивање разблаживања и повећање продуктивности, све у односу на пуну жицу. Траке које се пуне одговарајућим легирајућим састојцима израђује се од нискоугљеничног челика дебљине 0,5 mm.



**Слика 7.20** а) изглед широког навара (60 mm) изведеног са осцилаторним кретањем, б) изглед уског навара изведеног са спиралним кретањем [18]

Једну варијанту наваривања под прахом могуће је извести и без заваривачког аутомата помоћу лежеће електроде и насутог прашка (слика 7.21). Најпре се на подлогу (основни материјал) насипа прах дебљине 20-30 mm, а затим поставља тракаста електрода која се опет засипа прахом. На крају се подлога повезује са извором струје заваривања, а помоћу графитног штапа лук се успоставља на другом крају електроде. Даље се процес одвија сам од себе као код уобичајеног ЕПП наваривања. Димензије тракасте електроде обично су 40

mm x 20 mm, јачина струје 550 A, напон лука 34 V, мада ове величине могу бити и нешто веће (50 mm x 3 mm,  $I = 680$  A,  $U = 36$  V), што се прилагођава расположивим изворима напајања.

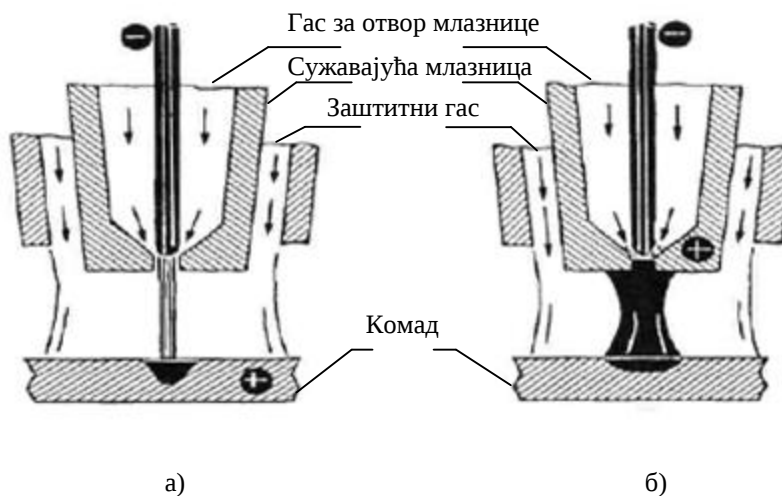


**Слика 7.21** Шема ЕПП наваривања тракастом лежећом електродом, 1 - електрода, 2 - основни материјал, 3 - прах, 4 - лук, 5 - навар, 6 - троска, 7 - плоча [11]

Однос мешања при плазменом наваривању износи једва неколико процената, што практично не утиче на промену хемијског састава додатног материјала. То значи да се потребне особине, а нарочито тврдоћа и отпорност према корозији, могу добити већ у првом навареном слоју. Познате тешкоће при наношењу бакра или бронзе на површине челичних делова могу се превазићи применом плазменог наваривања.

Ако се као критеријум за оцену појединих поступака наваривања узме најмањи однос мешања и минимална дубина уваривања онда наваривање плазмом заузима прво место.

Горионици за плазма заваривање могу бити изведени тако да се електрични лук успоставља између основног материјала и волфрамове (нетопиве) електроде то је такозвани преносиви лук (слика 7.22а) или између сужавајуће млазнице и волфрамове (нетопиве) електроде тада се лук назива непреносиви (слика 7.22б). Преносиви лук произвешће дубок провар у основном материјалу а непреносиви лук произвешће плитак провар у основном материјалу. Непреносивим луком могу се заваривати материјали који не проводе електричну струју.



**Слика 7.22** Горнионици за поступке наваривања са плазмом; а) преносиви лак, б) непреносиви лак [15]

Плазмено наваривање прашком је поступак погодан за полуаутоматско или аутоматско наваривање. Минимално разблаживање овим поступком је са минималним разблаживањем (5-10%). Наваривање се изводи по правилу у једном пролазу, а дебљина навара може бити од 0,25 mm па до 7 mm. Када се тражи већа дебљина навара може се применити вишеслојно наваривање. Лице навара је толико глатко да се понекад може избећи завршна механичка обрада.

Код плазменог ТИГ-наваривања дебљина депонованог навара у једном пролазу је у границама 2 mm до 15 mm. Пошто се унета топлота може одржавати на минималној вредности, спречава се деформисање наварене конструкције, а промене у ЗУТ-у су веома мале.

Предност оваквог поступка је још и у томе што се електрични лак одржава између волфрамске електроде и додатне жице, тако да процес није осетљив на примицање или одмицање пиштоља у односу на предмет. Растварање је мање од 10% па је довољно нанети само један слој да би се добиле тражене особине навара. Вишеслојно наваривање долази у обзир за наваре дебље од 15 mm или када је пожељно да се спонтано термички обради зона утицаја топлоте подлоге.

Уређај за плазмено МИГ-наваривање је веома скуп али то се може оправдати високим квалитетом навара, великом продуктивношћу процеса, као и могућношћу да се поступак изводи полуаутоматски или аутоматски. Највише се примењује за наношење лакираних слојева, за репаратуру железарских ваљака, седишта вентила, похабаних рукаваца и слично. Удео основног материјала раствореног у навару, то јест разблаживање је у границама 5 до 15%, а наваре дебљине 5 mm до 6 mm и ширине 40 mm до 50 mm.

Инертни гас омогућује заштиту тиме што спречава хемијску реакцију његовом хемијском неутралношћу. Међутим примесе, које су хемијски активне у заштитном гасу ( $O_2$ , N и водена пара) могу довести до порозности шавова као и погоршања основних особина. При заваривању нискоугљеничних челика, нарочито неумирених, из растопог метала се може издвојити  $O_2$ , N и водоник, па да би се добио шав који одговара основном материјалу, је да се располаже широким асортиманом додатних материјала који морају имати што мање нечистоћа попут S, P, O, N...

Аргон чистоте 99,95% употребљава се за све врсте метала, нарочито за чист алуминијум, бакар, никал, као и за угљеничне челике. Аргон чистоте 99% + 1%  $O_2$  намењен је за заваривање нисколегираних и високолегираних челика, хромових, хром-никлових нерђајућих челика и чистог алуминијума.

Скоро све врсте нерђајућих челика заварују се успешно у заштити аргона. Заваривање у заштити мешавине гасова се све више користе јер се једном опремом заварују више различитих метала и тиме смањују трошкови рада.

Високоаргонска мешавина Ar +  $CO_2$  мења облик стуба лука и врсту преноса капљица. Додатком  $CO_2$  побољшава се формирање и облик шавова, уваривање је дубље, равномерније и заокруженије, покривање металне купке гасом је боље, што спречава порозност.

Високоаргонској мешавини, додаток  $O_2$ , побољшава облик преноса металних капљица на ситне капи, побољшава се формирање зава, смањује се порозност и прштање, расте продуктивност заваривања, добија се течљива купка која код вишеслојних шавова омогућује лакше излажење гасова.

Заваривање активним гасом подразумева заваривање у заштити  $CO_2$  или било којом другом мешавином.  $CO_2$  је стабилно једињење које при различитим температурама не показује хемијску активност према другим металима. Степен дисоцијације  $CO_2$  зависи од притиска и температуре. Услед дисоцијације јавља се слободан оксид  $O_2$  који приликом заваривања образује стабилне оксиде са свим техничким металима и неметалним укључцима у техничким легурама гвожђа (Fe, C, Si, S, P). Брзина оксидације појединих састојака зависи од њихове концентрације у легури, афинитета према кисеонику, температуре и притиску. Да би се добио шав жељеног хемијског квалитета и хемијски најближи основном металу, треба употребити електроду са вишком активних састојака за које се зна да ће сагорети при заваривању.

## 8.0 Поређење метода наваривања са техно-економског аспекта

Делови машинских конструкција који су оштећени или похабани могу се заменити новим или ревитализованим постојећим деловима. У циљу што бржег, ефикаснијег и јефтинијег враћања машинске конструкције у функцију разматрају се сви фактори и могућности који могу повећати поузданост конструкције, уз минималне застоје и ефикасну замену оштећених делова. Искуства и разни радови су показали да репаратура оштећених делова има потпуну техно-економску оправданост у односу на замену новим деловима, што за последицу има смањење потребе резервних делова, његовог евентуалног складиштења, скраћује се време застоја, а трошкови се вишеструко снижавају [20, 21, 22, 23, 24]. Упоредне анализе која је спровела фирма „Castolin+Eutectic” показују да је веома исплатива репаратура делова [23]. Упоређивањем трошкова репаратуре и уградње оштећених делова, у које спадају трошкови: додатних радова (демонтаже, предгревање, дораде...), додатног материјала, заваривачких радова, употребљене енергије (гаса и/или струје) са трошковима набавке и уградње нових делова, у које спадају трошкови: додатних радова (демонтаже, припреме...), набавке нових резервних делова, стања машина, застоја у производњи, долази се до податка да је уштеда која се добија репаратуром у односу на набавку новог дела у границама од 5 до 50 и више пута. Захваљујући новим материјалима, новим технологијама опрема, радни век репарираних делова често траје дуже од радног века нових делова.

Техно-економски квалитет заваривачких радова може се изразити кроз продуктивност, економичност и рентабилност [24].

Принцип продуктивности је начело према коме треба остварити одређену производњу с минималним утрошцима радне снаге. Продуктивност представља зависност остварене производње са једним или више фактора производње, који су постављени као улог, да би се остварила предвиђена производња. Продуктивност код заваривачких радова је количина јединице производа (дужина или количина) завареног навара или шава у јединици уложеног времена. Повећање продуктивности остварује се комплексном механизацијом и аутоматизацијом производних процеса.

У зависности од степена механизације и аутоматизације могу се рангирати и поредити различити поступци заваривања. РЕЛ-поступак заваривања је искључиво ручни, и као такав, има врло малу, то јест најмању продуктивност од свих поступака наваривања. Брзина депоновања метала код РЕЛ-поступка наваривања је у границама од 0,45 kg/h до 2,7 kg/h. Следећи у рангу најмање продуктивних поступака наваривања су гасно и ТИГ-наваривање. Техника извођења гасног и ТИГ-наваривања је врло слична. Степен њихове механизације може бити ручни и аутоматски. Брзина депоновања ручним и аутоматским извођењем за гасно наваривање креће се у границама од 0,45 kg/h до 2,7 kg/h, односно за ТИГ-наваривање у границама од 0,45 kg/h до 3,6 kg/h. Једино се знатно већа продуктивност гасног наваривања добија ручним извођењем, када се за додатни материјал узима прашак. Тада се брзина депоновања метала креће у границама 0,45 kg/h до 6,8 kg/h.

Исто толика граница продуктивности добија се плазменим наваривањем изведеним аутоматски. Наваривање отвореним луком представља најпродуктивнији поступак, јер се његовом применом добија брзина депоновања у опсегу од 2,27 kg/h до 11,35 kg/h у зависности од начина извођења који може бити полуаутоматски и аутоматски. За најпродуктивнији поступак наваривања узима се ЕПП поступак који у зависности од полуаутоматског извођења или аутоматског са једном жицом може имати брзину депоновања од 4,5 kg/h до 11,3 kg/h, док се аутоматским извођењем са више жица добија брзина депоновања у опсегу од 11,3 kg/h до 27 kg/h. На основу наведених чинилаца може се рећи да је са аспекта брзине депоновања материјала поступак ЕПП-наваривања је најпродуктивнији, док је најмање продуктиван РЕЛ-поступак наваривања.

Економичност показује однос оствареног и уложеног у производњу. Значај економичности као фактора реализације је врло велики, јер увек наводи на смањење трошкова производње. Смањењем времена израде смањиће се трошкови производње. Постоји више елемената производње на које се може утицати како би се повећала економичност. Ту спада смањење времена израде, избор поступка наваривања који даје наваре траженог или задовољавајућег квалитета, избор поступка после којег ће се најмање применити накнадна обрада, набављање продуктивних машина, побољшање технолошког процеса, квалитетна квалификациона структура, избор одговарајућег додатног материјала и друго.

Избором РЕЛ-поступка наваривања добијају се навари тражених карактеристика тек у трећем пролазу. На основу ове чињенице може се закључити да је за овај поступак наваривања потребна већа количина додатног материјала како би се добио навар тражених карактеристика, што утиче на укупну цену репаратуре. Поред тога цена уређаја за заваривање се креће негде око 500 евра [25] (ово ће бити референтна цена за упоређивање цена са осталим поступцима заваривања). Поступак РЕЛ-заваривања је погодан за мања репаратурна наваривања, а исплати се само у случајевима када је количина материјала који се наваривањем наноси мала а време ефективног рада кратко. Руковање опремом је једноставно и брзо. Овај поступак наваривања не захтева велику припрему основног материјала за почињање наваривања, а механичка својства навара су добра. Погодан је за рад на терену, у свим положајима заваривања, што је веома битно ради уштеде са аспекта евентуалне демонтаже, транспорта, монтаже, застоја конструкције и слично. Са економског аспекта негативно је што има малу продуктивност, накнадна механичка обрада уколико се то тражи, као и потребна строга контрола руковања електродама. На економичност утиче и време за обуку радне снаге, што ће имати даљи одраз на квалитет навара јер он директно зависи од вештине заваривача. Губици материјала због прскања у околину и отпада елекроде (око 10%) при наваривању директно утичу на економске губитке.

Избором ЕПП-поступка наваривања добијају се навари тражених карактеристика у другом а врло често тек у трећем слоју, што аналогно утиче на утрошак додатног материјала. Следеће особине позитивно утичу на смање цене репаратуре: поступак РЕЛ-наваривања је

веома високо продуктиван, брзина наваривања му је велика, а губитак материјала услед наваривања је безначајно мали, трошкови додатног материјала су мањи него за трошкове обложених електрода, квалитет навара није под утицајем заваривача, врло је квалитетан естетски изглед навара па је његова накнадна механичка обрада јефтинија и бржа него код РЕЛ-поступка, могуће је рециклирати троску, а време обуке радника је знатно краће него код РЕЛ-наваривања, није потребна висока обученост заваривача, утрошак енергије је мањи. Особине које утичу на повећање цене репаратуре су: трошкови заштитног праха који се код РЕЛ-поступка не јавља, цена уређаја за ЕПП-поступак наваривања која је око десет пута већа у односу на цену уређаја за РЕЛ-поступак, цена додатне механизације која се користи на технолошкој линији за наваривање, могућност наваривања је искључиво полуаутоматско или аутоматско тако да нема смисла примењивати за мала и појединачна репаратурна наваривања, трошкови утрошене електричне енергије су мањи него код РЕЛ-поступка, наваривање је могуће само у специјализованим радионицама и у хоризонталном положају, могућа је већа систематска грешка због немогућности праћења лука.

Наваривањем отвореним луком добијају се квалитетни навари већ у провом а некад тек у другом слоју, што се одражава на потрошњу додатног материјала. Особине које позитивно утичу на смањење цене репаратуре су: нема коришћења заштитног материјала, процес је брз и високо продуктиван, цена опреме за заваривање је два до пет пута мања од опреме за ЕПП-поступак, могућност заваривања у свим положајима, велики депозит наношења, могућност изласка на терен, добија се квалитетан завар који не зависи од заваривача, тако да није потребна висока обученост заваривача, механичка обрада је јефтинија, цена додатног материјала је у рангу цене додатног материјала ЕПП-поступка, поступак је добар за мања репаратурна наваривања као и за серијска јер је поступак могуће извести полуаутоматски или аутоматски.

Особине код ТИГ-поступка који позитивно утичу на смањење цене репаратуре су: врло високо квалитетни навари већ у првом, некада и у другом слоју, те се на тај начин трошкови за додатни материјал смањују, нижа цена механичке обраде, добијени навари су без троске, те не изискује додатно време за чишћење. Особине које утичу на повећање цене репаратуре су: цена опреме за заваривање је до десет пута скупља од опреме за РЕЛ-заваривање, цена заштитних гасова, потребна добра обученост заваривача, поступак није најпогоднији за аутоматизацију али је могућ, потребна чистоћа површине за наваривање што изискује додатно трошење времена и новца на додатне препарате за чишћење, одмашћивање и слично, увођењем аутоматизације добија се мала продуктивност, поступак је добар за мања репаратурна наваривања, прилично велика потрошња енергије при аутоматском наваривању, репаратура мора да се обавља искључиво у радионицама.

Избором гасаног наваривања, добијају се високо квалитетни наварени слојеви већ у првом пролазу. Особине које утичу на нижу цену репаратуре су: погодност за коришћење скупљих додатних материјала, с обзиром да је у већини случајева довољан један пролаз, није потребно неко посебно припремање површине која се наварује, уређај за гасно наваривање је до пет пута јефтиније од уређаја за РЕЛ-наваривање, могуће је наваривање

на терену, нема потрошње електричне енергије. Особине које утичу на веће цене репаратуре су: потребан високо обучени кадар, квалитет навара зависи од заваривача, могућа аутоматизација са малом брзином наваривања и малом продуктивношћу.

Применом плазменог наваривања добијају се навари високог квалитета у првом наносу, што утиче на нижу цену репаратуре услед уштеде материјала. Особине које утичу на нижу цену репаратуре је: да поступак може бити аутоматизован и средње продуктиван, цена додатног материјала је јефтинија од цене додатног материјала за наваривање са отвореним луком, није потребна велика накнадна обрада, могућност изласка на терен. Особине које утичу на веће цене репаратуре су: потрошња релативно скупог инертног гаса, поступак није исплатив за појединачну производњу, добра обученост заваривача у случају ручног наваривања јер квалитет навара зависи од заваривача, виши трошкови одржавања апарата, цена апарата је до десет пута већа од цене апарата за РЕЛ заваривање, већа потрошња електричне енергије, потребно чишћење.

Рентабилност показује однос између дохотка и ангажованих средстава. Тежња производње је да се оствари што већи доходак, уз што мање ангажованих средстава. Продуктивност и економичност показују парцијално пословање производње, док се израчунавањем рентабилности показује комплетна слика пословања једне радионице или предузећа, и на тај начин добијају укупни економски квалитети производње. Да би се повећала рентабилност потребно је повећати добит и смањити ангажована средства. Код ангажованих средстава мисли се на основна и обртна средства. Рентабилност представља однос добити и ангажованих средстава производње (заваривачка опрема).

Да би се смањили губици при извођењу репаратурног наваривања потребно је претходно урадити анализу у зависности од тога да ли је репаратурно наваривање појединачно или серијско и у зависности од тога колика је могућност механизације и аутоматизације поступка. Тиме би се добиле уштеде у броју заваривача, што значи смањење времена израде, а самим тим је продуктивнији процес. У зависности од тога шта се наварује, од којег материјала је део израђен, каквог је облика, да ли део мора да се репарира на терену или у радионици, да ли мора да се репаратура врши у одређеном положају, бира се и одговарајући поступак прецизном анализом како би производња била рентабилна.

На основу изложених чињеница а и на основу радова у литературама [23, 25], са аспекта трошкова додатних материјала, трошкова електричне енергије, трошкова заштитних материјала, трошкова радне снаге, трошкова за одржавање апарата, најмањи су трошкови извођењем ЕПП-репаратурног наваривања.

Може се рећи да је у виду појединачне репаратуре најбоље изабрати РЕЛ-поступак наваривања јер је цена уређаја ниска, квалитет навара задовољавајући, док се за серијско репаратурно наваривање препоручује ЕПП-поступак и наваривање отвореним луком јер је цена апарата приступачна а продуктивност висока.

## 9.0 Закључак

Постоји огроман број машинских конструкција без којих је немогуће замислити живот савременог човека. Услед рада конструкција, разних утицаја радне средине, под утицајем трења, абразије, ерозије, температуре, фрикције и других долази до оштећења машинских конструкција. Због великог трошења материјала данашња тенденција је да се уместо нових делова користе оштећени делови који се применом одговарајућег техничког поступка могу репарирати. Један од технолошких поступака репарирања је наваривање.

Наваривање представља процес наношења слојева материјала на површине неких делова ради побољшавања њихових механичких особина. Наваривање се примењује када се жели слој специфичних особина или када се жели повећање димензија неког дела. Применом наваривања могуће је постизање великих уштеда. Ово нарочито важи за скупе делове, од скупих материјала, делова великих маса, димензија и друго. До уштеда је могуће доћи наваривањем скупог, квалитетног материјала са траженим одређеним механичким, физичким и хемијским особинама на део машине који је изграђен од материјала лошијих карактеристика. Данашња тенденција је да се не бацају истрошени и оштећени делови већ да се репарирају. Репарирањем је могуће добити исте, па чак и далеко боље карактеристике него што су карактеристике новог дела.

Репаратуром се добија велика уштеда 50-90% у односу на вредносту новог дела. У неким случајевима, ако репаратура није економски исплатива, то јест цена репаратурног дела је већа од цене новог дела, репаратура се препоручује јер се добија део са два до десет пута већом експлоатационом могућношћу него што је могућност експлоатације новог дела. Репаратуром је могуће повећати поузданост конструкције, смањити застој на минимум, смањити трошкове складиштења делова и тако даље.

Као закључак може се истаћи да је наваривање, као технолошки поступак заваривања, неизоставан процес репаратуре многих делова машинских конструкција. Иако се готово сви поступци наваривања могу применити за наваривање, може се закључити да не постоји једна одређена метода наваривања за све врсте материјала. У зависности од примене додатног материјала може се рећи да највећи асортиман, у погледу особина које се траже, имају обложене електроде за РЕЛ-наваривање као и пуњене жице и шипке за наваривања применом ЕПП-поступка и отвореним луком.

РЕЛ-поступак наваривања је несумњиво најбољи поступак за појединачно наваривање. Велику већину метала и легура је могуће заварити овим поступком, поступак не захтева посебно припремање површине која се наварује, цена опреме је ниска, руковање опремом је једноставно, опрема је лако преносива... Треба имати у виду да сваки електролучни заваривач треба прво да научи да заварује обложеним електродама, па тек онда другим методама, јер готово 50% заваривачких радова отпадне на РЕЛ-заваривање. За серијско наваривање делова или делова већих габарита може се рећи, да су поступци ЕПП-наваривања и наваривања отвореним луком у погледу цена производње и потрошње,

најбољи избор. Овим поступцима добијају се навари високог квалитета, цена опреме је приступачна, процес је аутоматизован, брз, продуктиван, брзина депоновања је висока.

У раду нису разматране могућности комбиновања различитих додатних материјала за одређене поступке наваривања са другим методама, јер би то захтевало додатне експерименталне анализе које би превазилазиле оквире мастер рада.

### 9.1 Питања која мастер рад отвара

Свакако да је једно од највећих питања развијање оптималних метода наваривања конструкцијских делова. У раду се јавља питање оптимизације поступка наваривања како би се добио навар задовољавајућег квалитета.

Показано је да квалитет шава зависи од степена мешања додатног и основног материјала. На степен мешања утиче дубина уваривања која директно зависи од врсте основног и додатног материјала, брзине наваривања, јачине струје, пречника електроде или жице, нагиба под којим се депонује додатни материјал, врсте струје (једносмерна, наизменична) и слично. За све ове утицајне факторе требало би да се нађе оптимално решење, то јест оптимална технологија за сваки поступак наваривања. Поред ових заједничких утицајних фактора за све поступке наваривања, на степен мешања јављају се и други утицајни фактори за сваки поступак понаособ. На пример, режими ЕПП наваривања усвајају се узимајући у обзир два противуречна захтева: за већу продуктивност потребна је што јача струја наваривања, а за мањи однос мешања тражи се супротно. У зависности од сваког конкретног случаја бирају се оптимална решења. Затим код гасног наваривања утицајни фактори су још и нагиб под којим делује горионик, нагиб под којим делује додатни материјал и бирање технике наваривања удесно или улево. Исти ови утицајни фактори јављају се и код ТИГ-наваривања, с тим што се услед повећања брзине наваривања може смањити деловање заштитног гаса, што се регулише појачавањем дотока инертног гаса или наваривањем у одговарајућем смеру. На дубину наваривања код ТИГ-поступка утиче и облик врха електроде. У зависности од сваког конкретног случаја неопходно је наћи оптимално решење.

У зависности од облика производње потребно је наћи одговарајуће оптимално решење у зависности од степена механизације поступка, брзине депоновања, минималног слоја наношења, цене опреме, цене додатних и потрошних материјала и слично. Такође, у зависности од функције који машински део извршава, потребно је наћи, на основу врсте основног материјала, најповољнији избор поступка и додатног материјала.

Са аспекта економије технолошке операције треба да се обављају што јефтиније и брже са одговарајућим квалитетом. Свака заваривачка операција се мора изводити оптимално уз што мење трошкове. То значи што мања количина додатног, помоћног и потрошног материјала, што мања количина електричне енергије, мања вредност зараде заваривача, мања вредност рада опреме, уз што бржу израду и што квалитетнији наварени слој.

## Литература

- [1] Јовановић М. и В. Лазић, *Технологија заваривања и ливења - скрипта*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [3] <http://www.scribd.com/doc/109396186/Pred-01-Tehnologija-Zavarivanja-Uvodno-Predavanje>, приступљено у мају 2013.
- [3] Мајсторовић А. и М. Јовановић, *Основи заваривања, лемљења и лепљења*, Научна књига, Београд, 1990.
- [4] Марковић С. и Д. Јосифовић, *Регенерација зупчаника*, монографија, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1998.
- [5] Седмак А., *Примена механике лома на интегритет конструкција*, Машински факултет Београд, Београд 2003.
- [6] Јовичић Г., Ж. Мирослав и С. Вуловић, *Proračunska mehanika loma i zamora*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [7] Ђулафић, В., *Увод у механику лома*, Универзитет Црне Горе, Машински факултет, Подгорица, 1999.
- [8] Шумарац, Д. и Д. Крајчиновић, *Основи механике лома*, Научна књига, Београд, 1990.
- [9] Јовановић М., В. Лазић, Д. Адамовић и Н. Ратковић, *Машински материјали*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [10] Ивковић Б. и А. Рац, *Трибологија*, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1995.
- [11] Јовановић М., Д. Адамовић и В. Лазић, *Технологија заваривања - приручник*, Крагујевац, 2011.
- [12] Ракин М., *Заваривање и сродни поступци*, Техничка књига, Београд, 1976.
- [13] Антић М., *Класификација додатних материјала за наваривање*, Заваривање и заварене конструкције, 2011, vol. 56, бр. 3, стр. 119-126.
- [14] <http://solair.eunet.rs/~mmitic/>, приступљено у мају 2013.
- [15] Милотић М., *Приручник за завариваче*, Собраћајни факултет Добој, Добој, 2008.
- [16] Седмак А., В. Шиљачки-Жеравчић, А. Милосављевић, В. Ђорђевић и М. Вукићевић, *Машински материјали II део*, Машински факултет Универзитета у Београду, 2000.

[17] Toit Du M., van Niekerk B.J., Повећање радног века ваљака за континуално ливење ЕПП наваривањем мартензитним челиком легираним азотом, Заваривање и заварене конструкције, vol. 56, бр. 3, стр. 107-113, 2011.

[18] Бајић Н., М. Ракин и С. Слободан, *Наваривање ЕПП-поступком истрошеног дела точка дизалице применом пуњене жице*, Заваривање и заварене конструкције, 2006, vol. 51, бр. 4, стр. 147-150.

[19] Мутавџић М., В. Лазић, М. Јовановић, Д. Јосифовић и Б. Крстић, *Избор оптималне технологије репаратурног наваривања ударних греда ротационих дробилица*, Заваривање и заварене конструкције, 2007, vol. 52, бр. 2, стр. 55-67.

[20] Јовановић М., М. Мутавџић, В. Лазић и Д. Адамовић, *Избор оптималне технологије репаратурног наваривања зуба утоварне кашике*, Заваривање и заварене конструкције, 2005, vol. 50, бр. 1, стр. 11-20.

[21] Одановић З., В. Грабулов, М. Арсић, М. Ћурђевић и Б. Катавић, *Избор оптималног додатног материјала за репаратурно заваривање вратила турбине хидроцентрале на лицу места*, Заваривање и заварене конструкције, 2011, vol. 56, бр. 4, стр. 149-166.

[22] Вучковић В., *Техничко-технолошки и економски показатељи оправданости наваривања моноблок точкова квалитета ER7 железничких возила за брзине кретања до 120 km/h*, Докторска дисертација, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет „Михаило Пупин” Зрењанин, Нови Сад, 2013.

[23] Ћурић С., Љ. Ћорђевић и С. Весић, *Примена заваривања-наваривања у одржавању пољопривредне механизације*, Трактори и погонске машине, 2005, vol. 10, бр. 4, стр. 115-119.

[24] Радојевић З., *Организација и економика заваривачких радова*, Друштво за унапређење заваривања у Србији, Београд, 2008.

[25] Каталози:

<http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/e110.pdf>, приступљено у јуну 2013.

[http://www.stokker.ee/files/kataloogid/EQUIPMENT\\_CATALOGUE\\_2010\\_eng.pdf](http://www.stokker.ee/files/kataloogid/EQUIPMENT_CATALOGUE_2010_eng.pdf), приступљено у мају 2013.

[http://www.czweld.cz/soubory/welding\\_consumables\\_product\\_catalogue\\_09\\_10.pdf](http://www.czweld.cz/soubory/welding_consumables_product_catalogue_09_10.pdf), приступљено у мају 2013.

<http://www.welding-alloys.com/products-services/wa-welding-consumables/hardfacing-cored-wires.html>, приступљено у јуну 2013.

[http://www.findotek.com/Hardfacing\\_Electrodes.html](http://www.findotek.com/Hardfacing_Electrodes.html), приступљено у мају 2013.

[http://www.fep.co.me/mat\\_za\\_zavarivanje.htm](http://www.fep.co.me/mat_za_zavarivanje.htm), приступљено у јулу 2013.

[http://www.findotek.com/uploads/Hardfacing\\_and\\_Joining\\_Welding\\_Electrode\\_XE\\_Line\\_Catalogue.pdf](http://www.findotek.com/uploads/Hardfacing_and_Joining_Welding_Electrode_XE_Line_Catalogue.pdf), приступљено у мају 2013.

<http://encribd.net/read-file/c7-710-hardfacing-guide-pdf-pdf-153183/>, приступљено у јулу 2013.

<http://olimpiacommerce.rs/index.php/proizvodi/oerlikon/elektricno-zavarivanje/571-proizvodi/oerlikon/elektricno-zavarivanje/3-saw-punjene-zice/348>, приступљено у јулу 2013.

<http://www.lokring.rs/files/kat-VARSTROJ-aparati-za-varenjeSRB.pdf>, приступљено у јулу 2013.

<http://www.vecowelding.com/dodatni-materijali>, приступљено у јулу 2013.

[26] [http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar1/9\\_1\\_diplomski\\_radovi\\_files/Baotic.html](http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar1/9_1_diplomski_radovi_files/Baotic.html), приступљено у јулу 2013.

[27] Јовановић М., Р. Чукић, Лазић В., Ратковић Н. и М. Мутавџић, *Техно-економска анализа репаратурног заваривања и наваривања оштећених зуба зупчаника*, 31. саветовање производног машинства Србије и Црне Горе са међународним учешћем, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2006, стр. 217-224.

[28] Мутавџић М., Лазић В., М. Јовановић, Р. Чукић и С. Ракић, *Производно и репаратурно наваривање делова грађевинске механизације*, 31. саветовање производног машинства Србије и Црне горе са међународним учешћем, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2006, стр. 225-234.

[29] Јовановић М. и В. Лазић, *Практикум РЕЛ и МАГ/МИГ заваривања*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.

[30] Јовановић М. и В. Лазић, *Практикум гасног (ГПЗ) и аргонског (ТИГ) заваривања*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.

[31] Танасијевић С., *Основи трибологије машинских елемената*, Научна књига, Београд, 1989.

[32] Милосављевић М., М. Радојковић и Б. Кузмановић, *Основи челичних конструкција*, грађевинска књига, Београд, 1986.

[33] Предузећа:

<http://www.mt-komex.co.rs/pages/sr/pocetna/pocetna.html>, приступљено у јулу 2013.

<http://www.weldmold.com/>, приступљено у јулу 2013.

<http://www.afrox.co.za/en/index.html>, приступљено у јулу 2013.

<http://www.treatrade.hr/default.asp>, приступљено у августу 2013.

[http://www.elvaco.net/loc/index.php?option=com\\_content&view=frontpage&Itemid=1&lang=sr](http://www.elvaco.net/loc/index.php?option=com_content&view=frontpage&Itemid=1&lang=sr), приступљено у августу 2013.

[34] <http://www.engarena.com/production-engineering/hardsurfacing-electrodes.html>, приступљено у априлу 2013.

[35] [http://www.vizijadanas.com/mig\\_zavarivanje.html](http://www.vizijadanas.com/mig_zavarivanje.html), приступљено у марту 2013.

[36] [http://www.termozavar.com/kupovina\\_varilackih\\_aparata.html](http://www.termozavar.com/kupovina_varilackih_aparata.html), приступљено у априлу 2013.

[37] <http://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/index.html>, приступљено у априлу 2013.