

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 19/2015

Марјан З. Илић

**Преглед челика повишене јачине и оцена
њихове заварљивости
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

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

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Изврши преглед челика повишене јачине, опише њихов развој, начин добијања и поступак производње;
- Да укаже на заварљивост челика повишене јачине и да на одређеном примеру, одреди заварљивост челика, као и да предложи метод и оптималну технологију заваривања;
- На крају рада, студент треба да укаже на могућност и значај примене челика повишене јачине.

Препоручена литература:

[1] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник, друго издање*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.

[2] **Јовановић М., Лазих В., Арсић Д.:** *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.

[3] **Јовановић М., Лазих В.:** *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.

[4] **Јовановић М., Лазих В.:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Машински Факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.

Крагујевац, Октобар 2018 год.

Ментор:

Др Вукић Лазих, ред. проф.

Abstract:

In this work are considered high strength steel weldability. In theoretical part of this work the methodology for weldability determination is shown and also it is pointed to basic problems of weldability, and also it is shown the review of high strength steel. Detailed in this work is weldability analysis for steel from class WELDOX 700. In the end, are recommended optimal welding technology and optimization parameters of REL and MAG proceeding for welding of this steel.

Key words: high strength steel, weldability, WELDOX 700, welding technology.

Резиме:

У овом раду се разматрају челици повишене јачине. У теоријском делу рада утврђена је методологија за оцену заварљивости ових челика, указано је на опште проблеме заварљивости, а такође је дат и преглед челика повишене јачине. Детаљније се у раду анализира заварљивост челика класе WELDOX 700. На крају је предложена и оптимална технологија заваривања, као и оптимални параметри заваривања РЕЛ и МАГ методама заваривања.

Кључне речи: челик повишене јачине, заварљивост, WELDOX 700, технологија заваривања.

Садржај:

1. УВОД	1
2. НАЧИН ДОБИЈАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	3
2.1 Добијање сировог гвожђа	3
2.2 Добијање челика.....	5
2.2.1 Бесемеров конвертор.....	6
2.2.2 Сименс-Мартенов поступак (SM).....	7
2.2.3 Електропећи (EP).....	8
2.3 Методи додатне рафинације челика.....	9
2.4 Начин добијања челика повишене јачине класе WELDOX.....	9
3. ПРЕГЛЕД ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ.....	12
3.1 Угљенични челици.....	13
3.2 C-Mn челици	13
3.3 Умирени челици	14
3.4 Микролегирани челици	15
3.5 TMCP челици	16
3.6 Подела челика повишене јачине у аутомобилској индустрији.....	20
3.6.1 Челици отпорни на рисеве и убивотине.....	21
3.6.2 Челици повишене јачине	22
3.6.3. Ултра јаки хладно ваљани челици.....	23
4. ЗАВАРЉИВОСТ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	26
4.1 Методе за оцену заварљивости	28
4.2. Рачунске методе.....	28
4.2.1 Прорачун температуре предгревања	30
4.2.1.1 Метод Сеферијана	30
4.2.1.2 Метод BWRA (British Welding Research Association)	30
4.2.2 Параметарске једначине хладних прелина	31
4.4. Практичне методе	33
4.4.1 Пробе склоности ка лому (топлом и хладном).....	33
4.4.2 Пробе са диригованим напрезањем.....	34
4.4.3 Пробе симулирањем термичких циклуса.....	34
4.5 Процена заварљивости на основу KHZ дијаграма.....	35

4.6 Оцена заварљивости челика повишене јачине	35
4.6.1 Проблеми заварљивости С-Mn челика.....	35
4.6.2 Проблеми заварљивости микролегираних (финозрних-ТМ) челика	37
4.6.3 Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине	38
4.6.3.1 Бејнитни челици	38
4.6.3.2 Нисколегирани побољшани челици (Q + T - Quenching + Tempering).....	38
5. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	40
5.1 Заварљивост челика повишене јачине WELDOX 700	40
5.2 Предгревање и међупролазна температура	41
5.2.1 Накнадно загревање	42
5.2.2 Завршна обрада завареног споја пре настајања прслина.....	42
5.2.3 Повећан (висок) унос топлоте.....	43
5.2.4 Примена аустенитних додатних материјала.....	43
5.3 Унос топлоте.....	43
5.4 Додатни материјал.....	44
5.4.1 Додатни материјал од нерђајућег челика.....	44
5.5 Заштитни гас	45
5.6 Испитивање завареног споја.....	46
5.6.1 Врсте грешака у завареном споју	46
5.6.2 Испитивање без разарања.....	46
5.6.3 Испитивање са разарњем	46
5.6.4 Макроструктурно испитивање	47
5.6.5 Испитивање микроструктуре	47
5.6.6 Испитивање тврдоће	48
5.6.7 Испитивање ударне жилавости.....	49
5.6.8 Испитивање затезањем	51
5.7 Примери испитивања заварених узорка	52
5.7.1 Експериментално испитивање – основни материјал	52
5.7.1.1 Испитивање микроструктуре	53
5.7.1.2 Испитивање тврдоће	53
5.7.1.3 Испитивање ударне жилавости.....	53
5.7.1.4 Испитивање затезањем	55

5.7.2 Експериментално испитивање – поступак РЕЛ/МАГ	56
5.7.2.1 Испитивање макроструктуре	56
5.7.2.2 Испитивање микроструктуре	57
5.7.2.3 Испитивање тврдоће	58
5.7.2.4 Испитивање ударне жилавости.....	60
5.7.2.5 Испитивање затезањем	61
6. ПРИМЕНА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ.....	62
6.1 Ултра лаки челици за каросерије аутомобила - квантификовање економских добити због примене микролегираних челика.....	62
6.2 Смањење тежине и економска добит.....	63
6.3 Сагледавање комерцијалне добити	65
6.4 Нове могућности за произвођаче и кориснике.....	65
7. ЗАКЉУЧАК	66
8. ЛИТЕРАТУРА	68

1. УВОД

Развој материјала у најужем смислу повезан је са историјом човечанства. Управо су по материјалима који су претежно употребљавани у одређеним раздобљима, та раздобља добијала и називе (камено доба, бронзано доба, гвоздено доба итд.). Ране цивилизације су различите материјале користиле за израду алата, оруђа и оружја. С временом како је цивилизација напредовала и развијала се, тако су се развијали и материјали, чиме почиње њихова све већа примена. Квалитет живота људи почиње да зависи од материјала. Да би успели да задовоље све веће захтеве, које се траже да материјали испуне, људи су мењали својства материјала (механичка и хемијска својства). Знање о материјалима, њиховој производњи, обради, својствима и примени се углавном стицало експериментално. Случајност је играла веома важну улогу у откривању нових материјала и њиховом развоју. Тек почетком 19. века истраживања, најпре из области физике и хемије, довела су до утемељења интердисциплинарне Науке о материјалима. Ова наука се проблематиком материјала бави на научној основи.

У данашње време доминантан метални материјал је челик, који представља најјефтинији и после дрвета најраспрострањенији конструкциони материјал. Највећи развој у производњи челика, као и у многим другим областима, урађен је за последњих тридесетак година, развојем нових технологија добијања и прераде челика, а такође и развојем технологије заваривања.

Процене су говориле да ће у будућности 95% данашњих инжењерских материјала бити потпуно замењено алтернативним материјалима¹. Међутим, ове процене су се испоставиле нетачним, а главни разлог за то је супериорност челика у односу на остале материјале. Предност челика у односу на било који други материјал је у односу цена/квалитет. Развојем и освајањем нових знања из области металургије, као и развојем опреме за примарну производњу челика условило је стални развој нових врста челика. Нове врсте челика које се развијају у последњих тридесетак година настају посебним поступцима микрولةгирања, као и посебним поступцима термомеханичке обраде материјала. Ти челици називају се челици повишене јачине и до данас су потиснули многе конструкционе угљеничне челике захваљујући оптималној комбинацији механичких карактеристика, заварљивости и цене.

Циљ развоја ове врсте челика јесте подизање напона течења и повећање затезне јачине, уз задржавање повољних својства дуктилности. Ови челици су омогућили примену знатно мањих носећих пресека код истих оптерећења конструкција чиме се смањује маса и запремина. Поред тога задржан је повољан однос $R_{p0.2}/R_m$ тако да у случају преоптерећења пре долази до пластичне деформације него до лома.

Прва генерација микрولةгираних челика базирана је на челицима са високим садржајем С и Мп, којим су се додавали елементи V и Nb у стотим деловима процента за смањење металног зрна и повећање напона течења и затезне јачине, али се погоршавала жилавост и заварљивост челика. Испитивања дејства абсорбованог водоника на тим челицима у агресивним медијима, показала су лошу отпорност на водоничну кртост и због чега долази до кртих ломова и на иначе врло жилавим конструкцијама. Друга генерација

¹ У алтернативне материјале спадају полимери, стакло, композити (vlakна), керамике и др.

микролегираних конструкционих челика је пројектована тако да се избегну недостаци прве генерације. Угљеник је смањен са 0,20% на испод 0.10%, а у неким термомеханички ваљаним и контролисано хлађеним челицима чак на испод 0.05%. Главни легирајући елементи су Nb, Mo, Cr, Ni и Ti који су додавани у минималним количинама. Понекад се додаје и В у хиљадитим деловима процента. Са интензивним уситњавањем кристалног зрна поступком термомеханичког ваљања и убрзаног контролисаног хлађења одмах после завршетка ваљања, или понекад са коначним побољшањем, ови челици поред високих вредности напона течења и затезне јачине, имају због ниског хемијског еквивалентног угљеника (CE) одличну заварљивост и способност деформације на хладно. Испитивања дејства абсорбованог водоника на тим челицима у агресивним медијама потврдила су добру отпорност на водоничну кртост. Челици прве и друге генерације разликују се по жилавости и заварљивости, док су им затезна јачина и напони течења слични. Прва генерација челика мора се предгревати, док се друга заварује на хладно, без предгревања.

Микролегирани челик данас заузима значајно место у аутомобилској индустрији. Разлог томе су стални захтеви аутомобилске индустрије за смањење масе возила, јефтинијим компонентама, очувањем животне средине, као и велика конкуренција у алтернативним материјалима и тсл. Пошто је код микролегираних челика елиминисана накнадна термичка обрада, то је резултирало нижом ценом челика, смањеном броју корака прераде челика као и потпуној елиминацији преслина које могу бити последица каљења или побољшања челика. Примена најразличитијих микролегирајућих елемената, велике могућности и разноликост поступка прераде челика, повољне механичке карактеристике и релативно ниска цена добијања, учинили су да се данас ови челици лако развијају и за специфичне намене, а поред тога и према потребама наручилаца.

Челици повишене јачине данас имају велики значај. Разлог томе је њихова широка примена. Ови челици се примењују за израду: индустријске опреме, резервоара, одговорних конструкција, цеви у петрохемији, рударских и железничких возила, делова пољопривредне механизације, багера и булдозера, возила за снежне услове, косачица, путничких возила и јако оптерећених возила за транспорт и теренске услове. Мостови, приобалне конструкције, електрични стубови, грађевинске плоче и диреци, само су још неки примери коришћења поменутих челика.

Овим радом разматрају се челици повишене јачине, са посебним освртом на проблеме заварљивости, избор технологије заваривања и указивања на значај и могућност примене ових челика. Приликом избора оптималне технологије заваривања, посебна пажња биће посвећена челику повишене јачине класе WELDOX². Проблеми заварљивости и избор оптималне технологије заваривања један су од главних узрока великог броја грешака у завареном споју. Овај рад једним својим делом треба да укаже технолозима на проблеме које се јављају приликом заваривања челика повишене јачине, затим да олакша избор оптималне технологије заваривања и омогући да без великог броја практичних проба или ослањања на искуство пројектаната предвиде металуршка и механичка својства ових челика.

² WELDOX – комерцијална ознака Шведског произвођача SSAB.

2. НАЧИН ДОБИЈАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

2.1 Добијање сировог гвожђа

Многе руде гвожђа нису подесне за директну прераду у сирово гвожђе, већ се из њих најпре одстрањује влага, угљена киселина, сумпор и друге нечистоће чиме се маса руде може умањити за трећину. Овај се поступак зове обогаћивање руде (испирање, магнетна сепарација, пржење). Овако припремљена и изломљена руда убацује се у високу пећ да би се из загрејане руде одстранио кисеоник и произвело *сирово гвожђе*. То се постиже не само загревањем руде и кречњака (CaCO_3) у пећи већ и деловањем редукционог агенса, тј. супстанције која се сједињује са ослобођеним кисеоником. При спором хлађењу течног сировог гвожђа и уз додатак силицијума, угљеник се појављује у виду равномерно распоређеног графита у металу који се зове *сиво сирово гвожђе* (због боје прелома). Користи се за израду одливака у ливницама гвожђа. Супротно томе, при брзом хлађењу, и уз нижи садржај Si и већи Mn добија се *бело сирово гвожђе*, намењено за прераду у челик [1].

Основни материјали за рад високе пећи

Руде гвожђа. У природи се налазе оксидне, сулфидне и карбонатне руде гвожђа. Најчешће се користе оксидне руде и то хематит (Fe_2O_3) и магнетит (Fe_3O_4). Сулфидне и карбонатне руде се пре убацивања у високу пећ пржењем преводе у оксид. Руде гвожђа редовно садрже и оксиде других метала: силицијум-диоксид (SiO_2), глиници (Al_2O_3), креч (CaO), магнезијум-оксид (MgO) који се зову заједничким именом јаловина¹. Јаловина садржи и једињења сумпора и фосфора која се сматрају штетним примесама. Већина руда није погодна за директну прераду, па је зато неопходна њихова припрема, која углавном обухвата одстрањивање јаловине, сушење руде и дробљење или укрупњавање (брикетирање).

Топитељи². Топитељи су чврсти додаци који при топљењу руде тешко топлјиве састојке из јаловине преводе у лако топлјиве (треску). Топитељи могу да буду базни, најчешће кречњак (CaCO_3) или кисели, као што је SiO_2 , који се користи у облику кварца, шљунка или песка.

Гориво. Гориво има задатак да обезбеди потребну количину топлоте за одвијање процеса у високој пећи и неопходну количину угљеника који омогућава редукцију руде – одузимање кисеоника (дезоксидацију). Раније се као гориво користио ђумур, а сада се најчешће користи високопећни кокс³. Кокс је погоднији зато што има високу топлотну моћ, одговарајућу чврстину и потпуно сагорева јер је порозан.

Процеси у високој пећи

Висока пећ. Направљена је од челичног лима, а изнутра је обложена ватросталним опекама. Кроз горњи отвор пећи (гротло) у одређеним количинама и по одређеном редоследу убацују се кокс, руда и топитељи (кречњак). Пећ се за време рада допуњује и

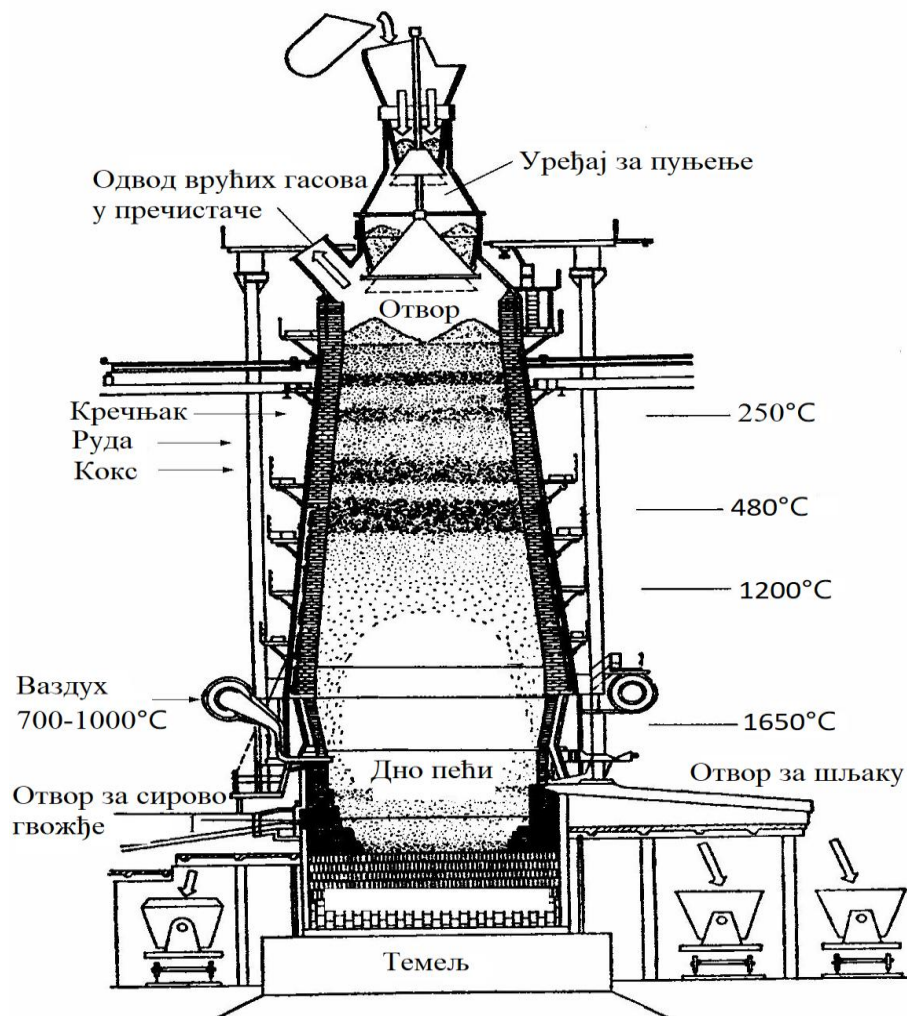
¹ Јаловином се називају земља и разни минерали који су садржани у руди.

² Топитељи потпомажу издвајање шљаке на површину растопа и смањују температуру.

³ Коксовани камени угаљ или кокс је порозна маса која садржи 90% чистог угљеника, док је остатак пепео и испарљиви састојци.

2. Начин добијања челика повишене јачине

ради непрекидно. У дну пећи се налазе отвори за испуштање растопљеног гвожђа и троске. У доњем делу пећи смештене су дувалке кроз које се удубава прегрејани ваздух, потребан за сагоревање кокса. Вишак гасова, који настају у процесу добијања гвожђа, напушта пећ кроз горњи отвор. Схема високе пећи приказана је на слици 2.1.



Слика 2.1 Схема високе пећи [1]

Течно сирово гвожђе се испушта кроз отвор на самом дну пећи, приближно на сваких $4 \div 5$ h по $400 \div 500$ тона тако да дневна производња износи $1800 \div 2000$ тона за 24 h. Претходно се кроз нешто виши отвор испушта шљака (згура састава SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и др.). Пећ се одозго повремено допуњује наизменичним убацивањем смеше гвоздене руде, топитеља и кокса. У високој пећи се постепено одвија редукција оксидних гвоздених руда, тако што најпре прелазе у ниже оксиде по шеми: $\text{Fe}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$. Сидерит (FeCO_3) се разлаже по једначини $3\text{FeCO}_3 = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{CO}_2 + \text{CO} - 238 \text{ kJ}$ било претходним пражњењем руде на ($650 \div 1000^\circ\text{C}$) или у самој високој пећи. То значи да се без обзира на врсту руде, редукција се завршава разлагањем најстабилнијег оксида гвожђа FeO према једначини: $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ и $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ [1].

За време процеса, редукују се и оксидне примесе у руди, најпре MnO на 1100°C , а затим SiO_2 на температури ($\sim 1450^\circ\text{C}$) према једначинама: $\text{MnO} + \text{C} = \text{Mn} + \text{CO} - 260 \text{ kJ}$ и

$\text{SiO}_2 + \text{C} = \text{Si} + 2\text{CO} - 620 \text{ kJ}$. Што се тиче угљеника он делимично сагорева према реакцији: $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$ и $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$, а преостали угљеник у облику графита плива изнад течног гвожђа [1].

Просечно узевши, производ високе пећи, сирово гвожђе, садржи: $4 \div 5\%$ C; 1.50% Si; 1.0% Mn; 0.60% P; 0.10% S и остало Fe. На сваку тону сировог гвожђа појављује се и тона шљаке, која се употребљава као подлога за насипање пруга, за израду минералне вуне, цемента, вештачког ђубрива. Као споредни производ добија се и гориви гас састава $25 \div 30\%$ CO; $10 \div 15\%$ CO₂; $52 \div 60\%$ N₂; $0.50 \div 4\%$ H₂ и $0.50 \div 3\%$ CH₄. Гориви гас који се из високе пећи води у суве и мокре пречистаче (*skrubber*⁴), а затим у Кауперове грејаче где служи за загревање ваздуха до температуре $600 \div 1000^\circ\text{C}$. Врео ваздух се помоћу турбокомпресора удувава на дно пећи што интензивира сагоревање кокса и повећава степен искоришћења.

Поред производње сировог гвожђа топљењем руде у високој пећи, данас се у неким земљама богатим природним гасом, руде гвожђа директно редукују у тестастом стању, тј. без топитеља. Мада је развијено више начина директне редукције, сви се они у суштини свode на разлагање природног гаса на састојке CO и H₂ који руди одузимају кисеоник. Такође се данас употребљавају и електролучне пећи за добијање сировог гвожђа из његових руда. Лук се одржава између графитних електрода уроњених у шаржу⁵. Додаје се мала количина кокса или ђумура, који служи само за дезоксидацију.

2.2 Добијање челика

Добијање челика се своди на сагоревање вишка угљеника, пречишћавање (рафинацију) белог сировог гвожђа и додавање легирајућих састојака у виду феро-легура или чистих хемијских елемената. Производња челика у већим количинама новијег је датума и сматра се да је индустријска производња челика од сировог гвожђа почела проналском Бесемеровог конвертора (1855) и Сименес-Мартенове (пламене) пећи (1865), док је прва електрична пећ конструисана 1906 године.

Данас се разликују три основна поступка добијања челика: *базни кисеонични (LD)*, *у електропећи (EP)* и *пламеној пећи (SM)*.

Према извештају из 2017. године процењено је да је у свету у 2016. години, произведено 1627.4 милиона тона челика, што представља раст у производњи челика у односу на прошлу годину за 0,4%. Данас, готово половину светске производње челика производи Кина (49.50% производње у 2016. години)⁶.

Сагоревањем вишка угљеника из белог сировог гвожђа снижава се садржај угљеника испод 2%, чиме се добија ковна легура (челик). Још у давним временима, најпре се ковно гвожђе добијало из гвоздених руда које су се загревале до тестастог стања, а не до растопа како се то данас ради. На тај начин се производило сунђерасто грумење.

⁴ Skrubber (*engl.*) – лимени цилиндар у коме је на решеткастим преградама наслагана дрвена слама; одозго се пушта вода у виду ситне кише, а одоздо протиче гас; вода упија сумпор-водоник и део CO₂ и тако хлади и пречишћава гас.

⁵ Шаржа - материјал који се убацује у високу пећ (кокс, гвоздене оксидне руде, кречњак).

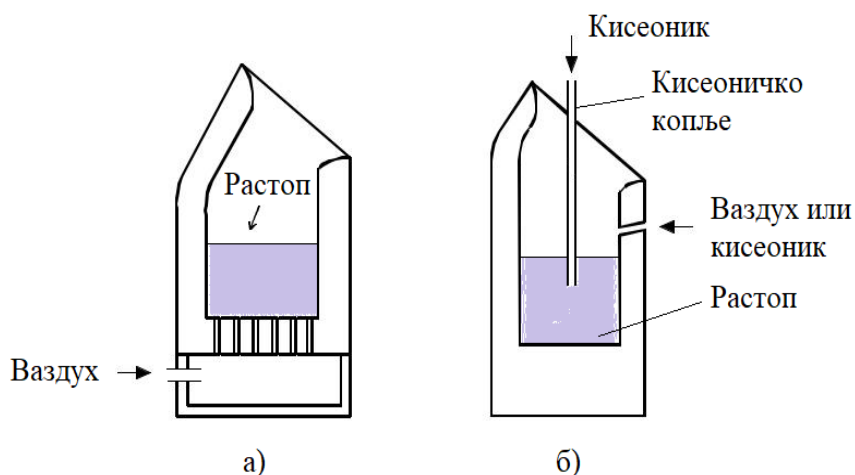
⁶ Извор: World Steel Association (www.worldsteel.org).

Накладним загревањем грумења гвожђа на ковачкој ватри и искивањем истискиване су примесе згуре и ђумура. Овакав производ зове се варен челик⁷. За прераду сировог гвожђа коришћено је отворено широко ватриштеложено ђумуром (за загревање не сме се користити угаљ, јер садржи сумпор, а на повишеним температурама гвожђе упија сумпор, па би добијени челик био изузетно крт), у коме се сунђерасто гвожђе дуго жари, а удувавањем ваздуха сагорева се вишак угљеника.

Увођењем процеса пудловања у Енглеској 1787. године (*engl. puddle* - мешати) остварен је велики напредак у продукцији челика. Процес се одвија у плиткој пламеној пећи која се ложи ситнијим каменим угљем. Дно пећи се прекрива слојем песка (топителја), а затим се у пећ сипа сирово гвожђе из високе пећи. Усијани гасови и ваздух струје преко ложишта, а радник гвозденом шипком меша растоп и повремено додаје мало песка. При томе, велики део угљеника из сировог гвожђа сагорева се, па се тако добија тзв. *пудловани челик*. Производња челика пудловањем није могла да покрије нараслу потражњу. Проблем је решен увођењем у производњу Бесемеровог конвертора⁸, чиме почиње топлење челика.

2.2.1 Бесемеров конвертор

Бесемеров конвертор⁹ је метални суд крушкастог облика обложен ватросталним материјалом. Течно бело сирово гвожђе донето из високе пећи сипа се у конвертор са горње стране, а кроз решеткасто дно се удувава ваздух (сл. 2.2а). Том приликом сагоревају С, Si, Mn и Fe. Уколико се процес спроведе до краја добија се ковно гвожђе, састава ($0.01 \div 0.03\%$ C; $0 \div 0.10\%$ Si; $0 \div 0.25\%$ Mn; $0.04 \div 0.20\%$ P; $0.02 \div 0.04\%$ S).



Слика 2.2 Бесемеров конвертор: а) удување ваздуха и б) продување кисеоника (LD-поступак) [1]

Треба напоменути да при производњи челика у Бесемеровом конвертору дување ваздуха се зауставља у тренутку када почне сагоревање гвожђа (пре него што угљеник

⁷ Варен челик - челик који се од давнина производио вишеструким искивањем гвожђа у тестастом стању.

⁸ Henry Bessemer (1813-1898) је енглески изумитељ по коме је поступак назван.

⁹ Поред оригиналног Бесемеровог конвертора обложеног изнутра киселом ватросталном облогом користи се знатно више Томасов конвертор са базном доломитном облогом (печени доломит = $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Киселе облоге се користе само за руде са малим садржајем фосфора, којих је глобално мање од 10%.

потпуно сагори). Егзотермним реакцијама¹⁰ повећава се температура тако да добијени челик остаје у течном стању и без даљег спољашњег загревања. Пораст температуре је последица сагоревања (оксидације) Si и P, затим Mn и на крају C. Због кратког процесног времена (за 20 min у конвертору може да се преради 15 ÷ 30 тона сировог гвожђа у челик), не може се контролисати, па је он променљив и садржи доста O₂ и N₂. Конверторски поступак се примењује за израду шипки (без даље машинске обраде), ваљаних плоснатих челика, бешавних цеви, жица и за примену шаржи за тзв. *dupleks proces*.

Модификација Бесемеровог конвертора – LD поступак

У новије време се уместо ваздуха, за удување користи чист кисеоник, па се овај начин добијања челика зове *LD-поступак* (сл. 2.26). Овај поступак развио је Robert Durer 1948. године¹¹. Са горње стране конвертора, кроз цев тзв. кисеоничко копље удувава се кисеоник. Поред кисеоника убацује се и око 30% челичних отпадака и врши брза хемијска анализа да би се добио челик траженог хемијског састава. Овим поступком се остварује велика продуктивност, цена постројења је ниска, а квалитет се приближава Сименс-Мартеновом челику. Поступак је такође познат и под називом базни кисеонички поступак.

2.2.2 Сименс-Мартенов поступак (SM)

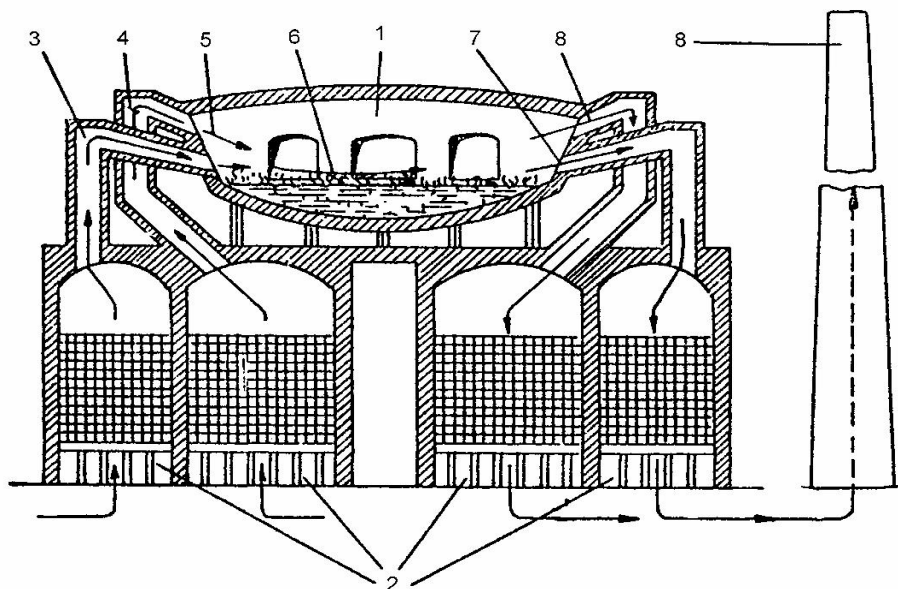
Сименс-Мартенов¹² челик добија се тако што се за оксидацију угљеника и других примеса у сировом гвожђу, поред ваздуха користе и оксиди гвожђа. Бело сирово гвожђе се меша са хематитом (Fe₂O₃), старим гвожђем и отпаcima оксидисаног гвожђа створеним при ковању и ваљању и мешавина се убацује у SM-пећ. Код Сименс-Мартеновог процеса могућа је прецизна контрола хемијског састава челика у току процеса, јер је овај процес дуготрајан (за једну шаржу, 100 ÷ 150 тона челика, потребно је 8 ÷ 15 h). Топлота за одвијање процеса потиче од горивог гаса, а делом и од сагоревања састојака (C, Mn, Si, P и S). Гориво може бити природни гас, коксни гас или мазут. Основна предност у односу на конвертор, јесте што се у току прераде сировог гвожђа у пламеној пећи може узети проба за брзу лабораторијску анализу. На овај начин се може показати шта даље треба предузети (убрзати сагоревање угљеника, елиминисати вишак S). Добијеном течном челику се додаје Al као дезоксидатор и легирајући елементи (Mn, Si и др.). У SM пећима се производи и тзв. армко гвожђе, односно ковно гвожђе са ниским садржајем C (~ 0.02%) и мало примеса (max 0.15%).

За процес у SM пећи користе се скупа горива која емитују сагореле гасове који се из еколошких разлога морају пречишћавати. Све то чине да SM челици буду скупљи од LD челика. Такође, у неким земљама удео SM челика у укупној производњи мањи је од 5%. Детаљан приказ Сименс-Мартенове пећи дат је на слици 2.3.

¹⁰ Егзотермна реакција – хемијска реакција у којој се ослобађа енергија.

¹¹ Robert Durer (1890-1978) је био швајцарски инжењер који је изумео и развио LD-поступак.

¹² Назив је добио по *Carl Wilhelm Siemens-u* (1823-1883) немачком инжењеру и изумитељу процеса и *Pierre-Emile Martin-u* (1824-1915) француском инжењеру који је процес применио и употребио.

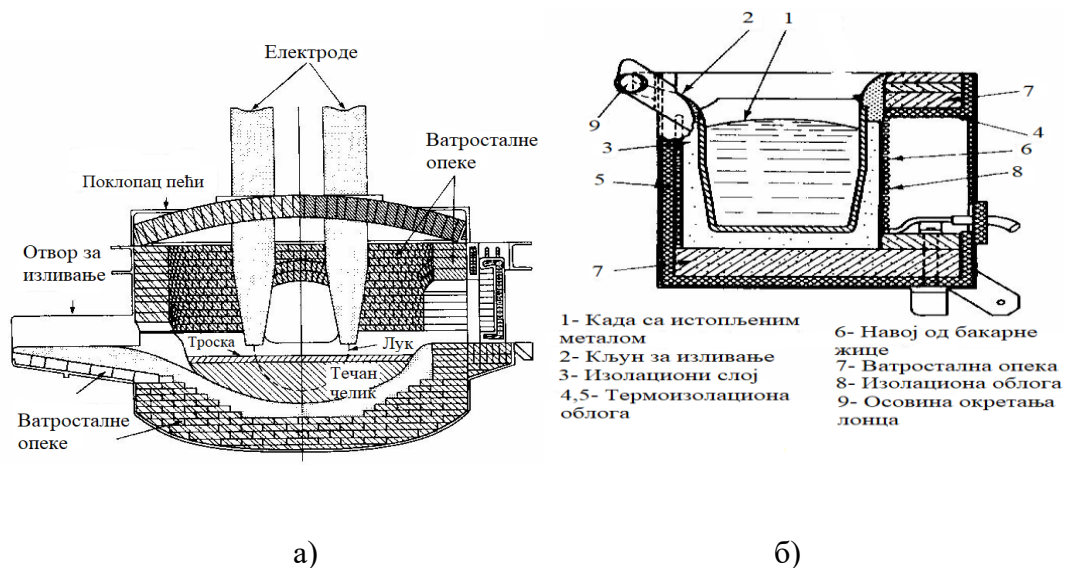


1- пламена пећ са отвореним ложиштем, 2- регенератори топлоте, 3- канал за улаз гаса, 4- канал за довођење ваздуха у пећ, 5- зона паљења смеше гаса, 6- пламен изнад метала у пећи, 7 и 8- отвори за одвод сагорелих гасова и пламена у регенераторе топлоте, 9- димњак

Слика 2.3 Схема Сименс-Мартенове пећи [1]

2.2.3 Електропећи (ЕР)

Електропећи су намењене за производњу висококвалитетних челика у којима се одржавају уске границе садржаја легирајућих елемената (високолегирани челици, алатни челици, челици за матрице, челици за лежајеве, нерђајући челици, челици за повишене температуре и др.). Данас се најчешће примењују електролучне пећи, а ређе индукционе (сл. 2.4).



Слика 2.4 Схема електричних пећи: а) електролучне и б) индукционе [1]

2. Начин добијања челика повишене јачине

Електролучне пећи имају капацитет од 200 тона, а за оксидацију се у пећ уводи кисеоник или се шаржи додају руде богате кисеоником. Брза анализа хемијског састава се обавља у току процеса и по потреби додају се одређени елементи да се постигне прецизно легирање. Једна од главних одлика електрочелика јесте мали садржај нечистоћа (S, P, H₂, N₂, O₂). Овако добијени челици имају високу цену.

Челични казан електролучне пећи обложен је ватросталним циглама, кроз рупе које се налазе на поклопцу провучени су графитни штапови (два или најчешће три) који су у ствари електроде за успостављање и одржавање електричног лука. Топлота ослобођена у луку брзо топи шаржу и поспешује хемијске реакције које пречишћавају растоп. У течну шаржу се кроз бочни отвор убацују топитељи и легирајући елементи. При крају процеса пећ се нагиње и кроз исти отвор одлива шљака, а потом се пећ нагиње на другу страну и растопљени челик излива у ватросталне лонце.

2.3 Методи додатне рафинације челика

Челици произведени у LD-конвертору, у електропећима или SM-пећима се могу додатно рафинисати, а најједноставнији начин да се прекомерни кисеоник из истопљеног челика елиминише, јесте у ливачком лонцу додавањем Si, Mn и Al. Дезоксидација растопљеног челика је знатно сложенија у овом случају. Кроз дувалке које се налазе на посудама за рафинацију продувава се растопљени челик смешом аргона и кисеоника при чему се сагорева вишак угљеника, а хром бива сачуван од оксидације. Процес је познат као *Argon-Oxygen-Decarburization* - AOD (аргонско-кисеонично разугљенисавање). На овај начин се поред веће чистоће добија и равномернији хемијски састав по пресеку крајњег производа. Међутим, поступак и опрема су изузетно скупи тако да се пречишћавају само неки челици специјалне намене.

Поступак вакуумског топљења електричним луком заснива се на убацивању у пећ челичног улошка (електроде) уз интензивно хлађење водом. Када се електрода претопи добија се хомген и чист ингот.

Процес у *вакуумској индукционој пећи* одвија се применом високофреквентне наизменичне струје, с тим што се користи вакуумска комора или пак комора испуњена инертним гасом (Ar, He). На овај начин се могу у челику сачувати елементи великог афинитета према кисеонику, док се садржај водоника, азота и кисеоника може свести на веома низак ниво.

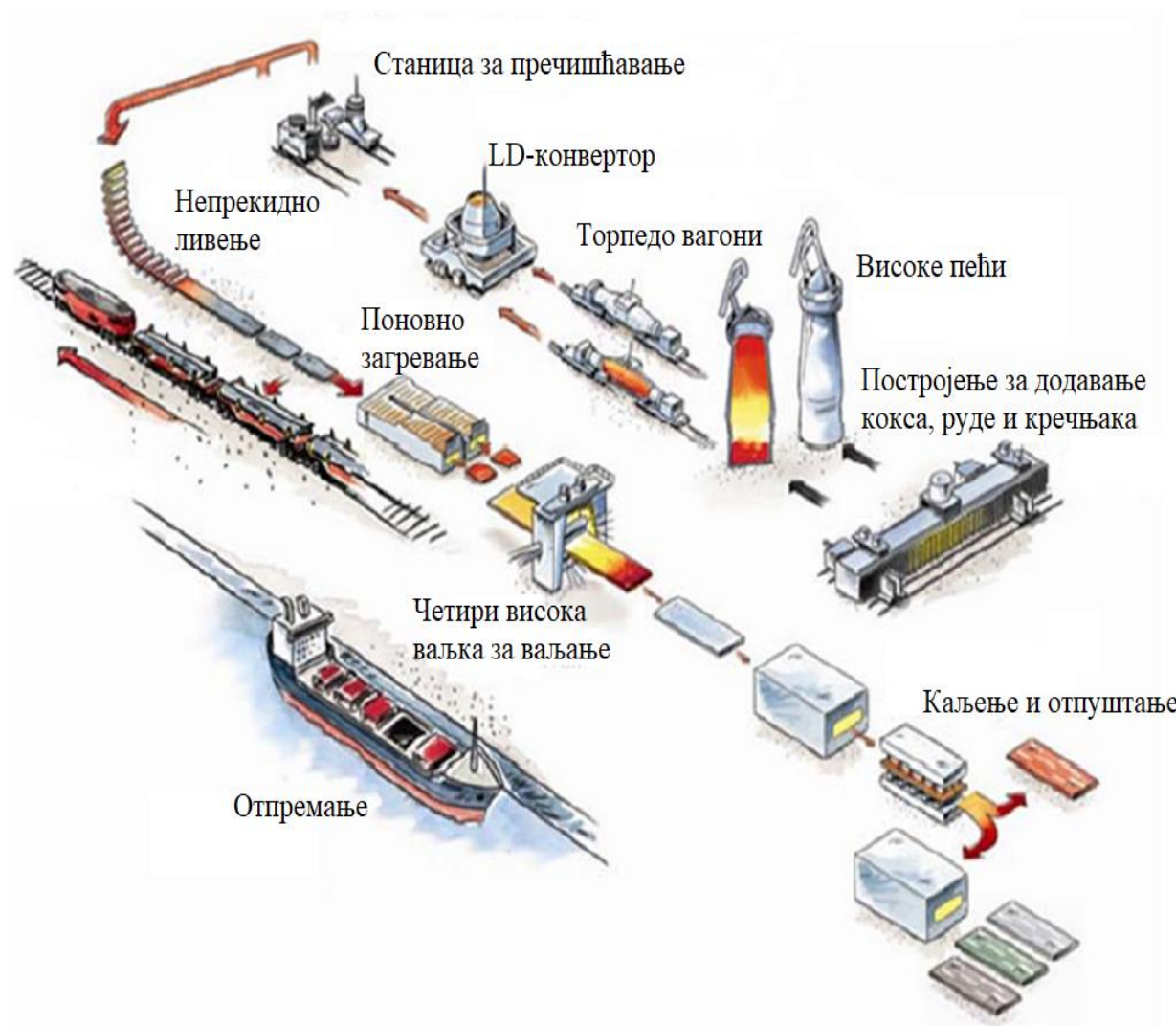
Поступак у *лончастим пећима* заснива се на претапању челика применом горивог гаса као извора топлоте. У току наредног топљења ослобађају се растворени гасови и неметални укључци, што значи да долази до рафинације шарже. Овим поступком производе се алатни челици, како од високоугљеничних челика тако и од легираних челика.

2.4 Начин добијања челика повишене јачине класе WELDOX

Челици ове класе се производе ливењем у инготе. Пре ваљања инготи се загревају на приближно 1200°C, а затим прогресивно ваљају до захтеваног коначног облика. Први део ваљања се изводи у зони рекристализационг аустенита (изнад 950°C), где се рекристализација одвија већ при ваљању, док се аустенитно зрно смањује. Затим, ваљање се наставља у подручју метастабилног аустенита где долази до хладне деформације, а

2. Начин добијања челика повишене јачине

аустенитна зрна остају деформисана. За време трансформације настаје много феритних зачетака по кристалним границама аустенитних зрна. После завршене трансформације настао је велики број феритних зрна која побољшавају својства јачине и жилавости челика. Схематски приказ производње WELDOX челика приказан је на слици 2.5.



Слика 2.5 Схематски приказ процеса производње WELDOX челика [2]

Постројење за додавање кокса, руде и топитеља. Ово постројење састављено је од око 100 пећи које испоручују угаљ. Пећи су загрејане на 1000°C и после приближно 20 h од суве дестилације угља постаје кокс. Даље се кокс пуни у вагоне и хлади водом у торњевима за гашење.

Високе пећи. Кроз горњи отвор пећи убацују се комади руде гвожђа, кокса и топитеља. Кокс служи као гориво али поред тога омогућава да гасови несметано пролазе приближно на сваких $4 \div 5$ h по $400 \div 500$ тона тако да дневна производња достигне и 2000 тона. Поред отвора за испуштање сировог гвожђа постоји и отвор за испуштање шљаке (састава SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , и др.). У зависности од хлађења растопљеног угљеника садржан у њему се може излучити у слободном облику у виду графита или у везаном као карбид

2. Начин добијања челика повишене јачине

гвожђа (Fe_3C). При спором хлађењу и додавању силицијума угљеник се излучује у виду фино распоређеног графита у металу који се зове сиво ливено гвожђе. Супротно, ако се растоп брже хлади, уз смањење силицијума и додаток мангана угљеник се излучује као цементит, а настаје бело ливено гвожђе намењено за прераду челика.

Торпедо вагони. Постоје осам торпедо вагона који се крећу по шинама и користе за транспортовање и складиштење полуга белог сировог гвожђа између високих пећи челичана. Капацитет торпедо вагона је 325 тона ливених полуга.

LD конвертор. У конвертору се истопљено ливено гвожђе продувава чистим кисеоником. Пре реакције са кисеоником додају се топителји који потпомажу издвајање троске на површину растопа. У конвертор се спушта цев кроз коју се удувава кисеоник, при чему кисеоник реагује са гвожђем, док гвожђе оксид (FeO) реагује са угљеником и примесам. Ливено гвожђе постаје челик тек када се угљеник самњи испод 2.11%.

Станице за пречишћавање. У овим станицама гвожђе се анализира и температура се завршно регулише и отклањају се преостале нечистоће (водоник, кисеоник, сумпор, фосфор итд.). Такође, овде се изводи и додавање легирајућих елемената у циљу добијања различитих типова челика.

Непрекидно ливење. После пречишћавања изливени челик се одваја у велике греде. То раде две машине које непрекидно лију челик. Очврсли челик се сече у комаде зване слабове (правоугаони попречни пресек) чија је дужина око 11 m.

Поновно загревање. При даљој преради ови полупроизводи се загревају до белог усијања (1200°C) и онда се ваљају помоћу четири висока ваљка.

Четри висока ваљка. Ова четири ваљка су поређана један изнад другог при чему су и мало покретна у вертикалном правцу. Померањем ваљака и регулисањем температуре добијају се различите дебљине плоча.

Сечење. Поселе ваљања и каљења (директног гашења) потребно је табле исећи на стандардне димензије.

Каљење и опуштање. Каљење се изводи загревањем материјала на око 900°C и наглим хлађењем најчшће млазевима воде. Овим поступком се добија тврд површински слој. Након каљења изводи се опуштање (ниско или средње). Циљ опуштања је да се поправе својства пластичности и жилавости и да се смањи ниво заосталих напона насталих у процесу каљења.

Премазивање и обележавање. На крају процеса табле се обележавају и премазују антикорозивним бојама.

3. ПРЕГЛЕД ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Основни циљ приликом избора материјала за металне заварене конструкције је да материјал буде што јефтинији, а да притом задовољи тражена механичка својства. Од избора материјала у великој мери зависи успех израде заварене конструкције. За израду заварених конструкција најчешће се примењују угљенични и легирани челици, а у последње време челици повишене јачине. Производња челика је последњих година доста напредовала, тако да конструктор данас има на располагању више врста, те могућност избора економски најповољнијег и квалитетом довољно доброг челика. Такође, класификацијом конструкције и делова с обзиром на важност и опасност која прети у случају лома конструкције иде у прилог томе да не мора цела конструкција бити израђена од квалитетног и скупог челика, већ се мање одговорни делови конструкције могу направити и од јефтинијег материјала.

Данас, када је реч о одговорним конструкцијама углавном се примењују челици повишене јачине. Главни разлог њихове употребе се огледа у релативно ниској цени, повољним механичким и металуршким својствима, лакшим конструкцијама, побољшаној заварљивости и тсл.

Челици повишене јачине се израђују у складу са стандардима било општим или стандардима произвођача. Сходно томе, ови челици су подељени према стандардима. Различите земље имају различите стандарде и на различите начине третирају поделу ових челика. Начин на који је извршена подела зависи од развоја и примене челика у овим земљама [3].

1. Према **пољском** стандарду, челици повишене јачине деле се на:
 - С-Mn челике,
 - микролегиране челике и
 - нисколегиране челике повишене јачине, који се даље деле на:
 - бејнитне челике и
 - нисколегиране побољшане челике ($Q + T - quenched + tempered$).
2. Према **чешком** стандарду, челици повишене јачине деле се на:
 - микролегиране феритно-перлитне челике и
 - нисколегиране побољшане челике.
3. Према **српском** стандарду, челици повишене јачине деле се на:
 - опште конструкционе челике, укључујући и С-Mn челике (SRPS EN 10025:2003¹) и
 - финозрне микролегиране челике (SRPS EN 10025.-056,-113²).

¹ Стандард SRPS EN 10025:2003 – топло ваљани производи од нелегираних конструкционих челика. Технички захтев за испоруку, настао је ревизијом стандарда JUS C.BO.500:1989 (опште конструкциони челик-Технички услови) и представља превод EN 10025:1990 и његове допуне A1:1993. Овај стандард се односи на топло ваљане производе од нелегираних основних и квалитетних челика намењених за елементе за израду конструкција који се спајају заваривањем, заковцима и вијцима.

² Стандард SRPS EN 10025.-056, -113- финозрни конструкциони челик, настао је развојем стандарда JUS C.BO.502.

Стандард SRPS EN 10025:2003 заменио је стандард JUS C.BO.500: 1989, док је стандард SRPS EN 10025.-056,-113 заменио стандард JUS C.BO. 502: 1979.

Напомена: У стандардима се не дају потпуни подаци о погодности челика за заваривање, већ само наводе потребе за евентуалним предгревањем.

3.1 Угљенични челици

Угљенични³ челик је комбинација два елемента, гвожђа и угљеника, где су остали елементи присутни у таквим односима да не утичу на особине легуре. Осим угљеника, у састав челика улазе и други елементи који се сматрају пратећим, скривеним или случајним примесима. Угљеник се у челицима, у ограниченој количини, налази у интерстицијском раствору гвожђе-ферит, а већим делом у облику цементита. Према томе, механичка својства угљеничних челика директно зависе од садржаја угљеника. Садржај од 0.1% C повећава затезну јачину за око 100 MPa, а напон течења за око 45 MPa.

Из овог разлога додавање угљеника челику је била прва метода за повећање јачине челика. Пораст јачине челика само преко садржаја угљеника је ограничен, због могућности настајања хладних прслина услед закаљивања у подручју ЗУТ-а⁴. Према томе, сматра се да челици са садржајем C < 0.25% нису склони закаљивању. Због раних и неразвијених технологија за прераду и добијање челика, у прво време су угљенични челици садржали и знатне количине Si, S, P и Mn. Присуство ових елемената у угљеничном челику је првенствено зависило од присуства елемента у руди. Сумпор је штетна примеса и најмањи садржај сумпора доводи до образовања сулфида гвожђа FeS. Између FeS и гвожђа образује се нискотопљиви еутектикум који се издваја на границама зрна, што може довести до лома. Фосфор је такође штетан јер са гвожђем гради фосфиде, који утичу на смањење способности деформације у хладном стању. Повећање садржаја угљеника у челику има и добре и лоше стране. Добра страна је повећање затезне јачине челика.

Насупрот томе, као лоше стране повећања садржаја угљеника, треба истаћи три негативна утицаја:

- повећање кртости челика, тј. смањење жилавости и пораст температуре преласка челика из жилавог у крто стање,
- погоршање заварљивости и
- безначајан утицај на смањење тежине конструкције.

Са повећањем садржаја угљеника преко 0.8%, поред цементита садржаног у перлиту, издваја се и слободни цементит који формира карбидну мрежу у облику ламела веома оштрих ивица. Те ламеле делују као концентратори напона, чиме се значајно умањује жилавост челика.

3.2 C-Mn челици

Повећање жилавости челика условљава смањење количине угљеника, па би то у случају угљеничних челика значило и пад затезне јачине материјала. За конструкције изложене великим напрезањима, код којих се захтева добра жилавост на сниженим

³ Данас се често користи термин нелегирани уместо угљенични.

⁴ ЗУТ – зона утицаја топлоте.

температурама, угљенични челици нису задовољавајуће решење. Да би у оваквим условима конструкција имала потребну носивост, морали би да се користе већи попречни пресеци, тј. конструкција би значајно добила на тежини. Ови проблеми су превазиђени тек развојем нове врсте челика (C-Mn челика). Манган није био замена угљенику, јер он гради супституцијски⁵, а не интерстицијски⁶ чврсти раствор. Улога мангана у челику је та што утиче на ојачавање и врши контролу сумпорних укључака. Садржај мангана у челицима се креће у границама од 1.4 до 1.7%. Сматра се да у нискоугљеничним челицима већи додатак Mn изазива појаву проеутектоидног ферита, и на тај начин подиже A_{T3} температуру. Манган са сумпором гради једињење MnS, које се формира у току очвршћавања челика. Због тога, најлакши начин за потпуно везивање сумпора за манган је додавање мангана челику у довољном вишку. Ова улога Mn је омогућила да се у конструкционим челицима значајно повећа жилавост. У току даље прераде MnS се или издужује (ваљање) или ломи и ситни (ковање). Присуство великих издужених MnS укључака у ваљаним производима је опасно, јер се MnS понаша као концентратор напона, а изазива и појаву ламеларног цепања.

3.3 Умирени челици

Присуство кисеоника у челику се сматра непожељном примесом. Вишак кисеоника у челику последица је нестехиометријског довођења кисеоника у току добијања челика LD поступком. Да би се вишак кисеоника уклонио, потребно је челику додати елементе који имају велики афинитет према кисеонику. Најчешће се користе Al и Si који се додају у количинама одређеним хемијском анализом у току производње челика. Код овако третираних челика, вишак кисеоника не производи мехуриће на површини, већ је површина мирна. Због тога су ови челици названи „умирени челици“. Посебно је повољна дезоксидација помоћу алуминијума, јер је уочено да у неким Al – умиреним челицима, долази до таложења укључака алуминијум нитрида по границама који блокирају раст металног зрна. Ово се посебно односи на челике који имају висок садржај азота. Лако стварање алуминијум нитрида је последица великог афинитета Al и N. Може се рећи да Al има двоструку улогу, од којих је једна умиривање челика везивањем кисеоника у једињење Al_2O_3 , док је друга улога контрола границе зрна таложења једињења AlN.

Дезоксидација растопа алуминијума ствара Al_2O_3 у облику fine дисперзије тако да се стварају бројни центри кристализације што после очвршћавања даје повољну ситнозрнасту структуру.

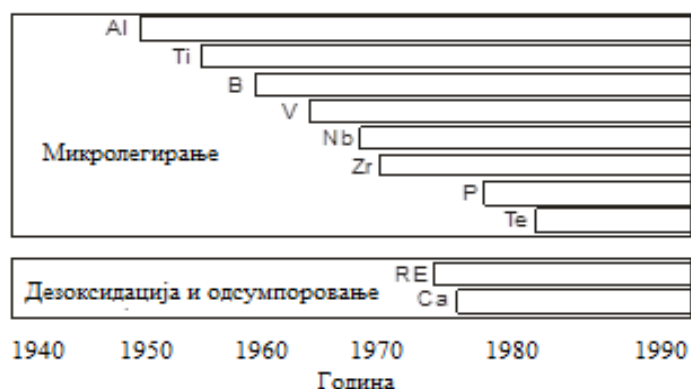
Ипак, контрола границе зрна није била од већег значаја за произвођаче челика, јер су техничке могућности биле ограничене у погледу жељеног расподела алуминијума у челику. Односно, долазило је до стварања укључака алумината што је практично претстављало губитак алуминијума.

⁵ Супституцијски чврсти раствор настаје када растворени атоми замене атоме основе (растварача).

⁶ У интерстицијским чврстим растворима атоми се смештају у међупросторе између атома основе (растварача).

3.4 Микролегирани челици

Микролегирани⁷ челици су развијени на бази С–Мп челика. Тачније, ови челици су настали као резултат истраживања која су имала за циљ проналажење нових елемената који би у челику могли да замене утицај Al. Тако су развијени потпуно нови, до тада непознати челици који се називају микролегирани челици. Одлика ових челика је повећана јачина која је последица легирања челика малим количинама легирајућих елемената (највише 0.15%), углавном следећих елемената: Nb, Ti, V, Zr и B, при чему је уобичајни садржај угљеника 0.03 до 0.12% (у челицима раније производње и до 0.20%), чиме је задржана добра заварљивост. На слици 3.1 хронолошки су приказане примене појединих микролегирајућих елемената у челицима.



Слика 3.1 Хронолошки почеци примене микролегирајућих елемената у челицима [3]

Основна карактеристика ових челика јесте што се додавањем малих количина поменутих легирајућих елемената остварује ситнозрна структура, као и ефекат таложног ојачавања услед издвајања стабилних честица карбида, нитрида и карбонитрида. Конкретније њихови преципитати⁸ делују као допунски центри рекристализације. Развој индустрије је условио развој и примену нових врста челика, наравно ту се подразумевају и микролегирани челици. Постављали су се нови захтеви које су савремене конструкције морале да испуне. Материјали који су се примењивали у индустрији морали су да задовоље захтеве као што су: повећана јачина, добра заварљивост, ниска цена производње и тсл. Претходно наведене захтеве испуњавају микролегирани челици, чијом применом је омогућено смањење тежине и повећање носивости конструкција.

Коначна структура микролегираних челика је ситнозрна и састоји се од феритних (α) зрна мале величине, хомогених по облику. Истовремено је присутна и мала количина цементита (због чега се ови челици понекад називају и нископерлитни), као и фино дисперговане честице карбонитрида, које се могу уочити само испитивањем на електронском микроскопу. У току завршног ваљања долази до појаве великог броја преферентних места, на којима је фаворизована појава клица α фазе при хлађењу челика испод A_{r3} температуре. Клице се у челику појављују на местима на којима је у већој мери нарушена енергетска баријера, као што су нпр.: дислокације, границе зрна и субзрна, двојници, деформационе тачке и тсл. Укупан број преферентних места је директна

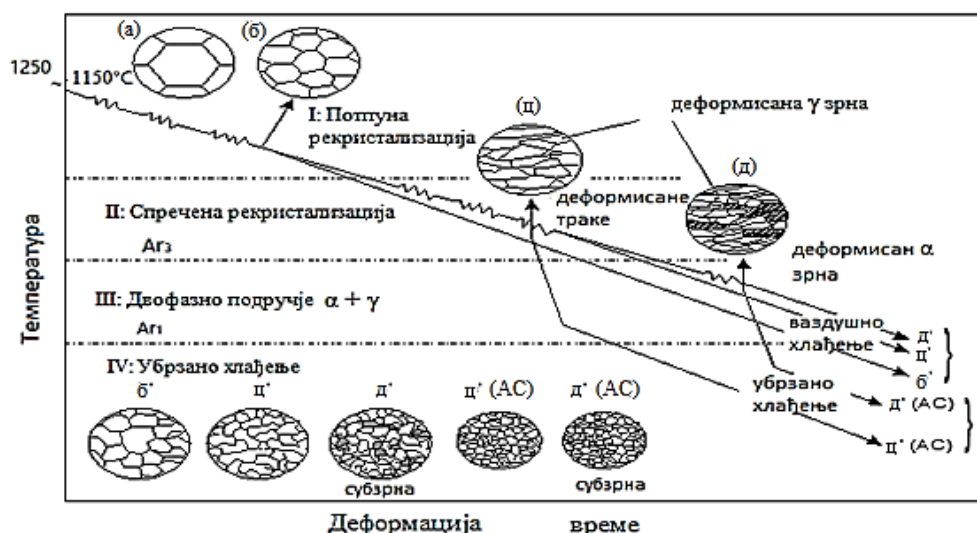
⁷ Ови челици су по перформансама и цени између угљеничних и легираних.

⁸ Преципитат или излучевина, талог. Преципитација – иулучивање, таложење.

последица примењеног поступка прераде и степена деформације. С обзиром на то да је реч о топлој преради, истовремено се одвијају и супротни процеси, тј. процеси обнављања деформисане структуре, опорављање и рекристализација. Рекристализацијом се смањује густина дислокација, а деформисана структура се замењује недеформисаном. Повећање и смањење густине дислокација су процеси који се упоредо одвијају. Рекристализација се спречава смањењем брзине настанка клица и смањењем покретљивости граница зрна и субзрна⁹ услед присуства растворених атома у чврстом раствору или честица талога.

3.5 ТМСР челици

Ова врста челика се добија применом посебне технологије топле пластичне прераде, која се још назива и термомеханичка и контролисана прерада (сл. 3.2). Ови челици се одликују тзв. „контролисаном микроструктуром“. Постоји неколико основних технологија добијања ових челика, при чему свака од њих узима у обзир хемијски састав челика и процесне параметре прераде (степен редуkcије на ваљаоничком стану, брзину деформације и температуру) [3].



Слика 3.2 Схематски приказ термомеханичке прераде микролегираних челика [3]

Рекристализационо контролисано ваљање (*Recrystallisation Control Rolling – RCR*). Представља технологију код које се топла пластична прерада челика одвија у рекристализационом подручју, тј. у подручју изнад T_{gr}^{10} температуре. Почетна структура челика је грубозрна (сл. 3.2а), коју по завршетку деформације (ваљања), а с обзиром на то да се она комплетно одвија у рекристализационом подручју, структуру чине хомогена рекристалисана зрна (сл. 3.2б), од којих се после хлађења на ваздуху добија хомогена феритна структура (сл. 3.2б'). Ова технологија се користи за прераду дебелих лимова, код којих није могуће применити конвенционално контролисано ваљање, пошто ваљаонички станови не могу да издрже јако велики отпор деформацији, тј. притисак ваљања.

⁹ Назив субзрно узето је по аналогији са растреситим материјалима који се просејавају. Зрна мања на сити зову се *субзрна*.

¹⁰ T_{nr} – температура непotpуне рекристализације.

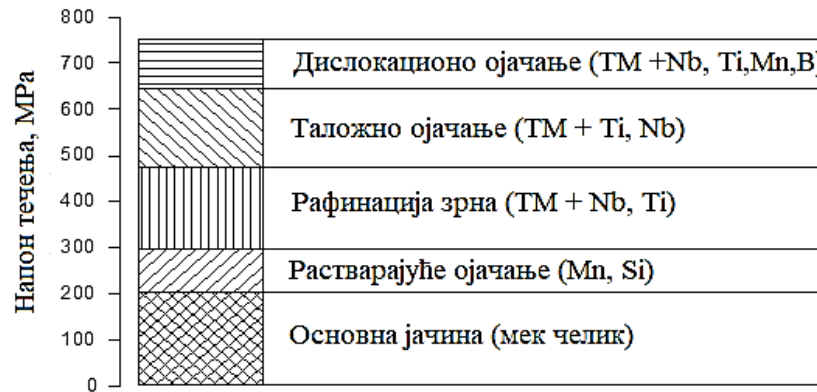
Класично контролисано ваљање (*Conventional Control Rolling – CCR*). Топла пластична прерада се делимично одвија у рекристализационом подручју (предваљање), а делимично и у подручју између температура T_{nr} и A_{r3} (завршно ваљање). У металуршком погледу, основна разлика између ваљања челика у ова два подручја јесте у томе што се предваљање изводи у температурском подручју у коме је рекристализација потпуна, а завршно ваљање се изводи у температурском подручју у коме је рекристализација између провлака спречена. По завршетку деформације у температурском подручју T_{nr} - A_{r3} , структура се састоји од деформисаних γ зрна, унутар којих се запажају траке деформације (сл. 3.2ц). Ове траке деформације, такође представљају додатна места за настанак клица феритних зрна, па се на крају хлађења добија још финија структура него код RCR ваљања (сл. 3.2ц’).

Ваљање у двофазном подручју (*Two Phase Rolling*). Ова технологија је заправо модификација CCR технологије, а разлика се огледа у томе што се завршно ваљање одвија делимично и у двофазном подручју. По завршетку ваљања, у структури се налазе деформисана аустенитна и феритна зрна (сл. 3.2д). Даљим хлађењем, из деформисаних аустенитних зрна ће настати равноосна феритна, а деформисана феритна зрна ће се рекристалисати и на тај начин још више смањити, формирајући субструктуру (сл. 3.2д’). С обзиром на то да се завршно ваљање изводи на релативно ниским температурама, отпор деформацији је велики, па се ова технологија најчешће користи за прераду лимова мањих дебљина.

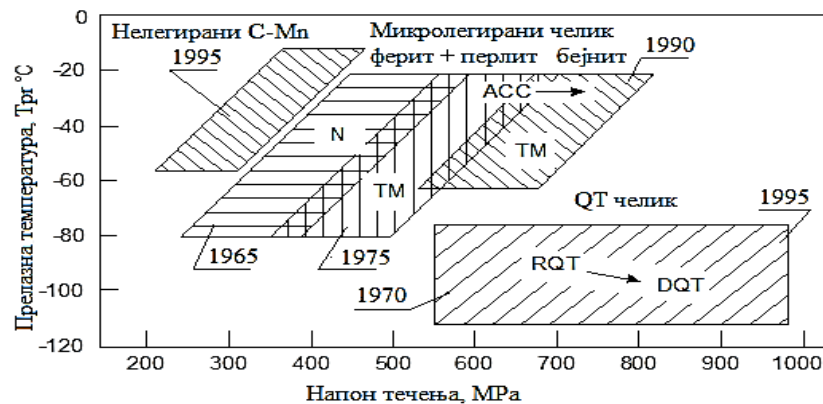
Динамичко рекристализационо контролисано ваљање (*Dinamic Recrystallisation Control Rolling*). Основна карактеристика ове технологије прераде челика је тзв. динамичка рекристализација. У питању је још једна модификација CCR технологије која има за циљ да се деформације из провлака у провлак повећавају толико, све док се укупна акумулирана деформација на завршној ваљаоничкој стази не повећа до те мере да се достигне критични степен деформације потребан за динамичку рекристализацију. Динамичком рекристализацијом се постиже највећи ефекат уситњавања аустенитног зрна, а тиме и резултујућег феритног зрна. Ова технологија за сада није комерцијализована.

Класично контролисано ваљање са убрзаним хлађењем (*Conventional Control Rolling + Accelerated Cooling – CCR + AC*). Применом ове технологије, контролисање микроструктуре челика се постиже само путем контролисања брзине хлађења. Наиме, трака се деформише било CCR или $(\gamma + \alpha R)$ технологијом, а затим се убрзано хлади до A_{r1} температуре. На овај начин, на вишим температурама долази до издвајања одређене количине ферита, док се истовремено преостали део аустенита богати угљеником и азотом, успоравајући тако даљу трансформацију. Тиме се обезбеђује да се из таквог аустенита, испод A_{r1} температуре издваја бејнит и/или мартензит. Овом технологијом се обезбеђује добијање двофазних челика који поседују веома fino феритно зрно и упоредно мартензит или бејнит.

Напон течења зависи од механизма ојачавања (сл. 3.3). Такође, различити поступци прераде различито утичу на величину напона течења. То је илустровано на слици 3.4 кроз однос напона течења и температуре преласка из жилавог у крто стање.



Слика 3.3 Доприноси појединих механизма повећању напона течења термомеханички прерађеног бејнитног челика [3]



Слика 3.4 Однос напона течења и прелазне температуре кртости челика добијених различитим поступцима прераде: N – нормализација, TM – термомеханичка прерада, ACC – убрзано хлађење, QT – каљење и отпуштање [3]

Челици повишене јачине се углавном добијају поступцима термомеханичке прераде. Да би се постигла оптимална механичка својства челика и да би се у потпуности искористиле предности термомеханичке прераде, потребно је према Танаки, пратити све фазе прераде и фабрикације челика. Процес је познат под називом „тотална термомеханичка контролисана прерада“ и састоји се у следећем:

- **Контрола чистоће челика.** На механичка својства челика и њихово побољшање, а пре свега живљивости у основном материјалу и ЗУТ-у, може се утицати чистоћом челика. Данас је могуће произвести веома чист челик, са укупним садржајем нечистоћа (N + O + S + P) мањим од 0.005%.
- **Контрола облика неметалних укључака (SSP - Sulphur Shape Control).** Посебну пажњу при производњи челика треба посветити количини сумпора у челику, јер он представља нечистоћу и показује негативан утицај, смањењем садржаја Mn у челику и градећи са њим једињење MnS и формирањем MnS укључака управо у централној зони слаба који се при каснијем ваљању издужују у траке чији се оштри крајеви понашају као концентратори напрезања који смањују живљивост челика.

На спречавање негативног утицаја MnS укључака, може се утицати пре свега контролом њиховог облика, тј. превођењем тракастих издужених укључака у сферичне, који нису деформабилни и не мењају се у току ваљања. На тај начин се директно смањује склоност челика ка ламеларном цепању. Додаци Са или елемената ретких земаља, у количини од око 0.004%, отклањају овај проблем, јер у челику служе као места за нуклеацију и раст MnS укључака у сферичне облике.

- *Контролисање микроструктуре ЗУТ-а.* При заваривању, посебно код великих уноса топлотне енергије, у ЗУТ-у се уз границу топљења често појављује прегрејана крупнозрна структура која има лоше механичке особине. Да би се омогућило добијање ситнозрне структуре и на том месту, челику се додаје Ti, у количини од око 0.015%, који омогућава таложње TiN на границама зрна и практично механичким путем блокира њихов раст услед загревања.
- *Смањење централних сегрегација¹¹ у слабу.* Карактеристика слабова добијених континуалним ливењем, јесте што је у њиховим централним зонама увек значајно повећана концентрација Mn, C, P и S, па су из тог разлога у овој зони увек нешто лошије све механичке особине. На правилнију расподелу сегрегата се може утицати на више начина, нпр. производњом чистијег челика, смањењем дебљине слаба, бржим хлађењем или комбинацијом напред наведеног.
- *Температура прогревања слаба пре топлотог ваљања.* Да би се током термомеханичке прераде добило хомогено зрно, услов је да материјал после прогревања има униформну величину зрна. Температуру у пећима треба контролисати тако да се не дозволи раст или чак превелики раст зрна. Најједноставнији начин којим се тај раст спречава, јесте већ поменути додатак од 0.015% Ti.
- *Контролисано ваљање.* Један од основних захтева предваљања, јесте да се не дозволи пораст зрна, тј. да по завршетку предваљања челик задржи хомогену ситнозрну рекристалисану структуру, јер је управо она услов за добијање униформног ситног феритног зрна по извођењу завршног ваљања. Завршним ваљањем се степен деформације повећава, а то доводи до повећања густине деформационих трака, двојника, који служе као додатна места нуклеације феритних зрна, па се коначно добија још ситнозрнија структура.
- *Текстура.* У току завршног ваљања долази до усмеравања и формирања текстуре топлотог ваљања која изазива анизотропију¹² својстава челика. Поједине компоненте текстуре смањују жилавост у попречном правцу, те се мора водити рачуна о њиховом присуству, пошто утичу и на простирање ултразвука, а тиме и на поузданост испитивања без разарања.
- *Убрзано хлађење.* Смањење феритног зрна се постиже и убрзаним хлађењем чиме се добијају веће потхлађење и већа брзина стварања клица. Једна од последица убрзаног хлађења јесте и изостајање јасно изражене границе течења због образовања бејнита.
- *Модификација контролисаног ваљања.* Најинтензивнија рафинација аустенитног зрна се постиже рекристализацијом, која је последица достизања критичног степена

¹¹ Сегрегација представља неравномерну расподелу хемијских елемената легуре што узрокује неуједначеност хемијског састава.

¹² Анизотропија – различитост особина (својстава) материјала у зависности од правца ваљања.

деформације при завршном ваљању. Ово је изводљиво само у ретким, савремено опремљеним ваљаоницама. Критични степен деформације доводи до значајног повећања укупне површине граница зрна, која даље представљају места на којима ће се формирати нова феритна зрна.

„Тотално термомеханички контролисана прерада“ је највећи квалитативни помак у побољшању заварљивости, снижењу прелазне температуре, као и смањењу склоности челика ка настанку прслина, пре свега због снижавања садржаја угљеника (самим тим и ниже вредности СЕ), снижавања укупне количине сумпора, формирања глобуларних сулфидних укључака, легирања титаном итд.

3.6 Подела челика повишене јачине у аутомобилској индустрији

Због својих карактеристика, изузетна јачина и жилавост уз одличан однос тежине и цене, челици повишене јачине су врло погодни за примену у индустрији. Поред тога, показују одличну корозивну отпорност кад су пресвучени (превучени) заштитним превлакама, добро подносе велика оптерећења, имају добру отпорност на ломове и старење и врло су погодни за бојење. Може се закључити да челици повишене јачине поседују све оне карактеристике које се захтевају у аутомобилској индустрији. Поменуте карактеристике, практично су наметнуле ове челике као логичан избор за примену у ауто-индустрији.

Удружење инжењера ауто-индустрије (SAE – Society of Automotive Engineers¹³), извршило је нову поделу челичних лимова, како нискоугљеничних лако деформабилних (SAE J2329), тако и челика повишене јачине (SAE J2340). У табели 3.1, приказани су типови челика повишене јачине са одговарајућим SAE ознакама и оквирно датим вредностима напона течења и/или затезне јачине.

Табела 3.1 Челици повишене јачине намењени за примену у аутомобилској индустрији [4]

Опис челика	SAE ознака	R_{eH} или R_m , MPa
Отпоран на рисеве и убивотине (не ојачава при печењу заштитне боје)	A	180, 210, 250, 288 (R_{eH})
Отпоран на рисеве и убивотине (ојачава при печењу заштитне боје)	B	180, 210, 250, 280 (R_{eH})
Повишене јачине са образовањем чврстих раствора	S	300, 340 (R_{eH})
Нисколегирани повишене јачине	X & Y	300, 340, 380, 420, 490, 550 (R_{eH})
Повишене јачине добро жарен	R	490, 550, 700, 830 (R_{eH})
Ултра јак двофазни	DN & DL	500, 600, 700, 800, 950, 1000 U (R_m)
Трансформацијом индукована пластичност (TRIP)	-	600, 700, 800, 1000 U (R_m)
Ултра јаки мартензитни	M	800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 U (R_m)

¹³ Извор: SAE International (www.sae.org).

3.6.1 Челици отпорни на рисеве и убивотине

Челици отпорни на рисеве и убивотине се деле у две групе:

- Обични и
- ВН-челици (*Bake Hardenable*).

По САЕ спецификацији носе ознаке „*Tin A*“ и „*Tin B*“ при чему имају минимални напон течења од 180 МПа. То су обично дезоксидисани челици са 0.01 ÷ 0,08% С. Ова врста челика се производи базним кисеоничким поступком или у електро пећима, при чему хемијски састав мора обезбедити механичке и пластичне карактеристике за одређени тип челика. У табели 3.2, је дат приказ челика који по САЕ J2340 спецификацији припадају типовима „*A*“ и „*B*“ [4].

Табела 3.2 Захтеване минималне вредности механичких карактеристика хладно ваљаних челика отпорних на рисеве и убивотине (типови *A* и *B* према спецификацији САЕ J2340) [4]

SAE J2340 Ознака и тип	R_{eH} , МПа	R_m , МПа	R_{eH} после деформације од 2%, МПа	R_{eH} после деформације од 2% и печења, МПа
180 A	180	310	215	-
180 B	180	300	-	245
210 A	210	330	245	-
210 B	210	320	-	275
250 A	250	355	285	-
250 B	250	345	-	315
280 A	280	375	315	-
280 B	280	365	-	345

Челик типа А је отпоран на ударна оптерећења, који своју јачину достиже деформационим ојачањем у току израде делова за каросерију. Овом типу челика додају се фосфор, манган и/или силицијум ради повећања почетне вредности напона течења. Такође, у неким случајевима се додају ниобијум, ванадијум или титан. Ови елементи се додају у малим количинама јер утичу на смањење дуктилности.

Челик типа В спада у релативно нове производе. Карактеристика овог типа челика је добра комбинација пластичности и повећања напона течења за услове у којима се конвенционални челици повишене јачине не могу применити. Такође, додатно ојачава за време печења заштитне боје (на приближно 170 ÷ 175°C у току 20 ÷ 30 min) којом је офарбана каросерија аутомобила. Ови челици су посебно погодни за обраду извлачењем и развлачењем, као и за радне услове где се захтева отпорност на ударна оптерећења, улегнућа и тсл.

3.6.2 Челици повишене јачине

У групу челика повишене јачине, (*HSLA – High Strenght Low Alloy*), спадају сви челици са напоном течења у опсегу $300 \div 830 \text{ MPa}$. Челици повишене јачине су нискоугљенични, обично дезоксидисани и континуално ваљани челици. Ови челици добијају се основним кисеоничким, електро или другим поступком, тако да се добије материјал који ће задовољити постављене захтеве. Хемијски састав мора бити такав да у потпуности обезбеди жељене механичке и остале карактеристике које се захтевају за одређени тип и јачину челика.

С обзиром на хемијски састав, разликује се неколико типова челика повишене јачине. Челици повишене јачине са ојачаним чврстим раствором су они челици који садрже мале додатке фосфора, мангана или силицијума, и наравно мали садржај угљеника ($0.02 \div 0.13\%$). Нисколегирани челици повишене јачине садрже и елементе који лако формирају карбиде, као што су Ti, Nb и V. Отпуштени челици повишене јачине имају хемијски састав сличан претходној групи, али се подвргавају и специјалном жарењу да би се спречила рекристализација хладно ваљаног челика.

Подела се заснива на величини минималног напона течења, који се креће од 300 до 830 MPa. Постоји неколико типова челика који задовољавају ове захтеве [4]:

- *Tun S (HSS – High Strenght Steel)*. Код ових челика C и Mn у комбинацији са P или Si ојачавају чврст раствор и на тај начин повећавају напон течења. Да би се обезбедиле добра пластичност и заварљивост, садржај угљеника се ограничава на максималних 0.13%. Садржај фосфора је ограничен на максималних 0.10%, а сумпора на максималних 0.02% (таб. 3.3).
- *Tun X*, нисколегирани челици повишене јачине (*HSLA – High Strenght Low Alloyed*). Представљају микролегиране елементе који лако граде карбиде и нитриде и обично су то Nb, Ti и V, било самостално, или у комбинацији. Поред угљеника ($< 0.13\%$), у хемијском саставу се налазе још и Mn, Si, P ($< 0.06\%$) и S ($< 0.015\%$). Минималне количине Nb, V или Ti су ограничене на по 0.005%. Према спецификацији, разлика између минималне вредности напона течења и затезне јачине је 70 MPa (таб. 3.3).
- *Tun Y* је исти челик као и *Tun X*, само што је разлика између захтеване минималне вредности напона течења и затезне јачине 100 MPa (таб. 3.3).
- *Tun R* су отпуштени челици повишене јачине, тј. жарени ради смањења заосталих напона, ојачавају пре свега путем деформисања на хладно. Легирајући елементи поменути код челика *Tun S* и *X* се такође могу додати и овом челику. Ради побољшања пластичности и заварљивости, садржај угљеника се ограничава на максимално 0.13%, фосфора на максимално 0.10% и сумпора на максимално 0.015%. Ови челици су најпогоднији за савијање и ваљање, пошто су им својства пластичности веома ограничена (таб. 3.4).

Табела 3.3 Захтеване механичке карактеристике топло ваљаних и хладно редукованих нисколегираних челика повишене јачине (типови S, X и Y) [4]

SAE J2340 Ознака и тип	R _{eH} , МПа		R _m , МПа	min. укупно издужење (ASTM.L), %	
	min.	max.	min.	Хладно ваљани	Топло ваљани
300 S	300	400	390	24	26
300 X	300	400	370	24	28
300 Y	300	400	400	21	25
340 S	340	440	440	22	24
340 X	340	440	410	22	25
340 Y	340	440	440	20	24
380 X	380	480	450	20	23
380 Y	380	480	480	18	22
420 X	420	520	490	18	22
420 Y	420	520	520	16	19
490 X	490	590	560	14	20
490 Y	490	590	590	12	19
550 X	550	680	620	12	18
550 Y	550	680	650	12	18

Табела 3.4 Захтеване механичке карактеристике хладно ваљаних и додатно жарених челика повишене јачине (тип R) [4]

SAE J2340 Ознака и тип	R _{eH} , МПа		R _m , МПа	min. укупно издужење (ASTM.L), %
	min.	max.	min.	
490 R	490	590	500	13
550 R	550	650	560	10
700 R	700	800	710	8
830 R	830	960	860	2

3.6.3. Ултра јаки хладно ваљани челици

Ултра јаки хладно ваљани челици (DP–Dual Phase), спадају у челике који имају минималну затезну јачину у опсегу од 500 до 1500 МПа. Производе се контролисаним хлађењем из аустенитне у феритну фазу. Због процеса производње мале количине бејнита и задржаног аустенита могу бити присутне. Коначна структура DP челика састоји се од ферита и нискоугљеничног мартензита.

3. Преглед челика повишене јачине

Специјалним термичким обрадама, који укључују каљење и отпуштање, добија се мартензитна фаза у микроструктури. Запремински удео мартензита и садржај угљеника одређују јачину челика. Ови челици су углавном легирани манганом. У неким случајевима, додаје се и бор. У DP челицима, угљеник омогућава стварање мартензита, а такође омогућава и његово отврдњавање. Елементи попут мангана, хрома, молибдена, ванадијума и никла, који се додају појединачно или у комбинацији, такође помажу у отврдњавању.

Подела ових челика се заснива на минималној затезној јачини [4]:

1. Двофазни челици (тип D)

Микроструктура ових челика се састоји од ферита и нискоугљеничног мартензита, при чему јачину челика примарно одређује количина мартензитне фазе. Постоје два типа двофазних челика:

- DH (*high yield ratio dual phase*) - са мањом резервом пластичности (већи однос „напон течења“/„затезна јачина“) и
- DL (*low yield ratio dual phase*) - са већом резервом пластичности (мањи однос „напон течења“/„затезна јачина“).

У табели 3.5 су приказане захтеване механичке карактеристике за двофазне челике (тип D) према спецификацији SAE J2340.

Табела 3.5 Захтеване механичке карактеристике топло ваљаних и хладно редукованих ултра јаких двофазних челика [4]

SAE J2340 Ознака и тип	min. R_{eH} , MPa	min. R_m , MPa	min. укупно издужење на дужини од 50 mm (ASTM.L), %
500 DH	300	500	22
600 DH	500	600	16
600 DL1	350	600	16
600 DL2	280	600	20
700 DH	550	700	12
800 DH	500	800	8
950 DH	650	950	8
1000 DH	700	1000	5

2. Челици код којих је трансформацијом индукована пластичност (TRIP)

Ови челици имају побољшану моћ затезања због специјалног легирања и термичке обраде после ваљања. Микроструктура TRIP челика се састоји од заосталог аустенита распоређеног у феритно-бејнитној матрици. Заостали аустенит се под дејством обраде деформисањем преображава у мартензит.

3. Мартензитни челици (тип M)

Микроструктура је нискоугљенично-мартензитна, при чему садржај угљеника одређује затезну јачину челика. Добијају се базним кисеоничким, електро, или неким

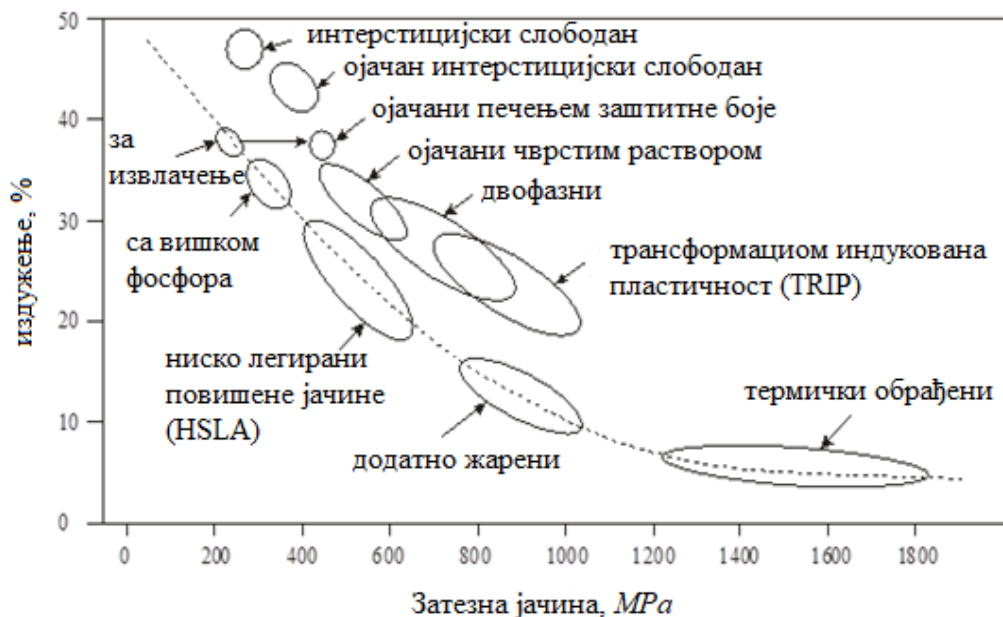
3. Преглед челика повишене јачине

другим поступком, који ће дати материјал жељених карактеристика. Ови челици имају веома ограничену истегљивост. У табели 3.6 су приказане механичке карактеристике за *Тип М* по спецификацији SAE J2340.

Табела 3.6 Захтеване механичке карактеристике топло ваљаних и хладно редукованих ултра јаких нискоугљеничних челика [4]

SAE J2340 Ознака и тип	min. R_{eH} , MPa	min. R_m , MPa	min. укупно издужење на дужини од 50 mm (ASTM.L), %
800 М	600	800	2
900 М	750	900	2
1000 М	750	1000	2
1100 М	900	1100	2
1200 М	950	1200	2
1300 М	1050	1300	2
1400 М	1150	1400	2
1500 М	1200	1500	2

На слици 3.5 прегледно је дат приказ механичких карактеристика (затезна јачина и издужења) лимова израђених од различитих челика повишене јачине, које су од посебног значаја за пројектовање каросеријских делова у аутомобилској индустрији.



Слика 3.5 Поређење затезних јачина и издужења за различите типове челика који се користе као платинирани лимови у аутомобилској индустрији [4]

4. ЗАВАРЉИВОСТ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Заварљивост је комплексна карактеристика везана за материјал, технологију и конструкцију којом се изражава утицај процеса заваривања на заварени спој, као и на његово понашање у топлотом и деформационом смислу у току и после заваривања. Заварени спој мора испуњавати захтеве тражених особина. Које се особине траже зависе првенствено од намене завареног споја. Могу се захтевати равномерност завареног споја, поседовање корозивних особина, електричне особине и тсл. [5].

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

Металуришка заварљивост материјала (метала) зависи од низа фактора: хемијског састава, почетне структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. На ову заварљивост утичу све металуршке промене у материјалу које настају под дејством топлоте унете при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног снижења механичких и технолошких особина споја, нарочито у зони око шавова, што значи да код материјала лоше заварљивости могу настати знатне промене хемијског састава, односно могу се појавити тврде и крте структурне компоненте, прслине и тсл., све зависно од датог случаја. Утврђено је да су метали и легуре незаварљиви са металуршке тачке гледишта ако се њихови саставни хемијски елементи међусобно не растварају у чврстом агрегатном стању већ образују тврда и крта хемијска једињења (нпр. карбиде). Насупрот томе, заварљиви су сви хомогени метални материјали који образују чврсте растворе и нееутектичке или еутектичке смеше, односно сви материјали који поседују металуршку заварљивост могу се успешно заварити, ако се одабере одговарајући метод, поступак и технологија заваривања.

Конструкциона заварљивост показује утицај низа параметара на пројектовање заварене конструкције, нпр. дебљине, врсте, броја и распореда шавова итд., које конструктор поставља пројектним захтевом за дату конструкцију у зависности од оптерећења и радних услова.

Технолошка заварљивост обухвата технолошке параметре који утичу на заварени спој, нпр. додатни материјал, метод и поступак заваривања, унос топлоте, брзину хлађења, итд. При томе се цени да ли се технолошки поступак изводи без тешкоћа или се морају применити посебне мере (предгревање, жарење у току и после заваривања, рад у специјалној атмосфери), а оцена се доноси на основу предузетих мера и добијеним резултатима. Са оперативног становишта које се односи на понашање неких материјала у току заваривања или наваривања, они се оцењују као „добро заварљиви“ када је шав чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал стапају у хомогену легуру, а при томе се топе без тешкоћа, без прштања и појаве прслина, гасних мехурова и других грешака.

Нечистоће као што су: прљавштине, масти, уља и тсл., погоршавају оперативну заварљивост па је препорука да се споменуте нечистоће одстране и оквиру припреме за заваривање.

Општа заварљивост представља глобалну оцену појединачно објашњених компонената заварљивости при чему се за коначну оцену процењује већи број фактора

(основни и додатни материјал, заваривачки рад, врста напрезања у шавовима и у близини концентратора напона и др.).

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

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

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

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

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

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

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

„Метални материјал се сматра, на одређени начин заварљив, ако помоћу заваривања, при коришћењу одговарајуће технике спајања, настају јединствени метални спојеви, који испуњавају захтеве, који се постављају за својства локалних шавова и њихов утицај на чврстину конструкције“ [5].

Заварљивост је комплексан појам и зависи од материјала и његовог понашања у току и после заваривања, а такође и од технолошког поступка заваривања, као и од врсте заварене конструкције. Из наведеног се запажа да за оцену заварљивости треба увек узимати у обзир узајамну везу конструкције (крутост, дебљина, врста споја), материјала (способност заваривања) и технологије (могућност заваривања).

У пракси су уобичајна два приступа за оцену заварљивости:

1. процена задовољавајућих вредности показатеља заварљивости за испитани облик споја, материјал и начин заваривања (тестирање материјала) и
2. избор услова и других мера при заваривању да би се постигли задовољавајући резултати (потврда технологије).

Најважнији критеријум за оцену заварљивости је непрекидност тј, одржавање металног континуитета завареног споја, што може бити нарушено присуством прслине одређене величине и распореда. Према механизму настајања прслине могу бити: *вруће (топле), хладне, ламеларне и прслине жарења*.

Такође су битне и граничне механичке особине:

- тврдоћа завареног споја (укључујући метал шава, ЗУТ и ОМ),
- својстава отпорности и
- ударна жилавост.

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

4.1 Методе за оцену заварљивости

Ниједном методом заваривања се не може добити спој који има исте особине у шаву, основном материјалу и ЗУТ-у. Због разлика у особинама насталих заваривањем, заварљивост се своди на процењивање граничних величина неких показатеља заварљивости. Одређивање хемијског састава и механичких особина полазна је основа за процену заварљивости, и у том смислу користе се: *рачунске методе, лабораторијске методе, практичне пробе, технолошке пробе и KHZ дијаграми*.

Подаци потребни за оцену заварљивости наведеним методама су: хемијски састав материјала, дебљина, тип и понекад крутост завареног споја и начин заваривања.

4.2. Рачунске методе

Оцена заварљивости према хемијском саставу челика је метода која се заснива на израчунавању тзв. *хемијског еквивалента угљеника* (CE), који исказује познату чињеницу да се са повећањем садржаја угљеника погоршава заварљивост. При томе се утицај неког хемијског елемента садржаног у челику, на заварљивост, изражава коефицијентом еквивалентности у односу на угљеник [5].

Тако се за закаљиве челике CE израчунава помоћу израза:

$$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}, \% . \quad (4.1)$$

Овај образац показује, да повећање садржаја угљеника утиче на погоршање заварљивости четири пута више од пратећих елемената Si и Mn.

За угљеничне челике који још имају додатке Cr и Mo испод граничног садржаја за легиране елементе ($Cr < 0.30\%$, $Mo < 0.08\%$), а при том повећавају склоност ка закаљивању и погоршавају заварљивост, користи се израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}, \% . \quad (4.2)$$

У пракси се најчешће примењује формула Међународног института за заваривање (МИЗ-а) познатија као PW-формула која служи за испитивање заварљивост угљеничних

(нелегираних) челика и угљенично-манганских челика (C-Mn), али не и за нисколегирание челике повишене јачине или нисколегирание Cr-Mo челике:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% . \quad (4.3)$$

Испитивањем утицаја CE на тврдоћу у ЗУТ-у установљена је корелациона веза:

$$HV_{\max} = 1200 \cdot CE - 200 \text{ и } HV_{\min} = 1200 \cdot CE - 200 \quad (4.4)$$

Ова веза важи у границама $0.2\% < CE < 0.6\%$, јер за веће вредности CE веза није више линеарна. Уз велика упрошћавања и занемаривањем низа утицајних фактора, може се сматрати да је челик заварљив ако тврдоћа у ЗУТ-у не пређе вредност од 350 HV, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензитна структура. Ова гранична тврдоћа одговара вредности $CE = 0.45\%$, па се усваја да су челици са $CE < 0.45\%$ заварљиви без примене посебних мера, док су челици са $CE > 0.45\%$ заварљиви уз примену посебних мера (предгревање, жарење, посебни атмосферски услови и тсл.) [5].

Садржај водоника, тврдоћа, дебљина и крутост имају знатан утицај на појаву хладних прслина, па се због међусобног дејства не може одредити максимална дозвољена тврдоћа ЗУТ-а без узимања у обзир дифундованог водоника. Према томе се вредност максималне тврдоће повезује са садржајем дифундованог водоника према табели 4.1.

Табела 4.1 Зависност граничне тврдоће ЗУТ-а од садржаја заосталог водоника у металу шава [5]

Садржај водоника у ml/100 g металу шава	20	10 ÷ 20	5 ÷ 10	1 ÷ 5
Гранична тврдоћа ЗУТ-а у HV	350	375	400	450

Количина дифундованог водоника у металу шава одређује се одговарајућим пробама, нпр. глицеринским тестом (SRPS C.НЗ.018). Грубо се може усвојити да се садржај дифундованог водоника, за разне поступке заваривања, налази у границама датим у табели 4.2.

Табела 4.2 Садржај водоника у металу шава [5]

Начин заваривања	Садржај водоника у ml/100 g
<i>У смеши гасова, CO₂ или Ar</i>	
- чиста жица	2 ÷ 7
- прљава жица	6 ÷ 12
<i>Ручно електролучно</i>	
- базичне сушене електроде при 400 ÷ 500°C	3 ÷ 7
- базичне несушене електроде	12 ÷ 20
- базичне електроде сушене при 100 ÷ 150°C	6 ÷ 12
- рутилне електроде	20 ÷ 35
<i>Заваривање под троском</i>	
- чиста жица и сушени прах	5 ÷ 10
- прљава жица и несушени прах	10 ÷ 25

4.2.1 Прорачун температуре предгревања

Већина челика, а нарочито челици повишене јачине, склони су ка појави хладних прслина, па се предузимају мере да се оне спрече. То су углавном односи на примену таквих технологија заваривања које искључују трансформациону кртост. Хладне прслине се појављују ако у ЗУТ-у настане мартензитна или доња бејнитна структура и истовремено се појаве велике количине дифундованог водоника и сопствени напони. Два задња фактора условљена су конструкционо технолошким решењима, те се на њих не може значајније утицати. Стога, остаје могућност да се избегну структуре каљења при трансформацији аустенита, што се углавном постиже повећањем уноса топлоте (линијске енергије заваривања) или предгревањем, у оба случаја смањује се брзина хлађења при температурној стабилности аустенита. За одређивање температуре предгревања, користе се метод Сеферијана и метод BWRA.

4.2.1.1 Метод Сеферијана

Као што је већ наглашено, брзина хлађења зависи од дебљине делова нпр., за исти основни материјал предгрејан до 200°C, брзина хлађења износи 5°C/s за дебљину од 12 mm и 28°C/s за дебљину од 25 mm. Израз по Сеферијану за укупан еквивалентан угљеник је:

$$[C] = [C]_h + [C]_s, \text{ где су:} \quad (4.5)$$

$$[C]_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 \cdot Mo}{90}, \%, \quad (4.6)$$

$[C]_h$ – хемијски еквивалентан угљеник,

$$[C]_s = 0.005 \cdot s \cdot [C]_h, \text{ mm} \quad (4.7)$$

$[C]_s$ – еквивалентни угљеник дебљине s у mm, па се добија:

$$[C] = [C]_h \cdot (1 + 0.005 \cdot s), \% . \quad (4.8)$$

За условно заварљиве челике прорачун температуре предгревања по Сеферијану:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{[C] - 0.25}, \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (4.9)$$

4.2.1.2 Метод BWRA (British Welding Research Association)

Одређивање температуре предгревања по методи BWRA је знатно сложеније од методе по Сеферијану. Ова метода полази од хемијског састава челика (CE), фактора облика споја (BTS) и параметара РЕЛ заваривања који се односе на заваривање рутилним или базичним електродама различитих пречника.

У табели 4.3 су дати показатељи заварљивости. У табели је такође приказана формула за израчунавање CE. Израчунатој вредности CE, зависно од типа облоге, додаје се показатељ заварљивости (A, B, C, D, E, F, G).

Табела 4.3 Показатељи заварљивости [5]

Еквивалентни угљеник $CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$, %		Показатељ заварљивости
Заваривање рутилно електродом	Заваривање базичном електродом	
≤ 0.20	≤ 0.25	A
$0.21 \div 0.23$	$0.26 \div 0.30$	B
$0.24 \div 0.27$	$0.31 \div 0.35$	C
$0.28 \div 0.32$	$0.36 \div 0.40$	D
$0.33 \div 0.38$	$0.41 \div 0.45$	E
$0.39 \div 0.45$	$0.46 \div 0.50$	F
> 0.45	> 0.50	G

Утицај облика завареног споја и дебљине делова у споју на брзину одвођења топлоте, изражава се бројем термичке строгости (BTS).

$$BTS = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{s_1}{6} + \frac{s_2}{6} + \dots + \frac{s_n}{6} \right) \cdot BTS_{2-4} \quad (4.10)$$

где су: BTS_{2-4} – број смерова одвођења топлоте ($BTS_{2-4} = 2$ – за двосмерно, $BTS_{2-4} = 3$ – за тросмерно и $BTS_{2-4} = 4$ – за четворосмерно одвођење топлоте),

$s_1, s_2, \dots, s_n$ – дебљине лимова у завареном споју у mm (база $s = 6 mm$),

n – број делова у завареном споју.

Напомена: Израчунато BTS се заокружује на први већи цео број.

На основу BTS, показатеља (индекса) заварљивости и пречника електроде, одређује се температура предгревања из одговарајућих табела.

4.2.2 Параметарске једначине хладних прслина

За оцену склоности ка хладним прслинама C-Mn челика, нисколегираних и нелегираних челика са границом течења од 272 до 870 MPa примењују се једначине које узимају у обзир хемијски састав основног материјала, садржај дифундованог водоника и критичну дебљину завареног споја.

Према чешким изворима дају се следеће једначине [5]:

$$P_{hp} = P_{cm} + \frac{K}{40000} + 0.015 \cdot \log \frac{H}{2.77}, \text{ за } K \leq 1300, \quad (4.11)$$

$$P_{hp} = P_{cm} + \frac{K}{40000} + 0.075 \cdot \log \frac{H}{2.77}, \text{ за } K > 1300, \quad (4.12)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + 5 \cdot B, \quad (4.13)$$

где је: $K = 70 \cdot s$ – фактор крутости сучених спојева,

s – дебелина завареног материјала, mm и

H – садржај дифундованог водоника у металу шава, $ml / 100 g$.

За заварени спој за који се добије $P_{hp} \leq 0.24$ сматра се отпорним према хладним прслинама, док је за вредност $P_{hp} > 0.24$ потребно предгревање на температури:

$$T_p = 1600 \cdot P_{hp} - 308, \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (4.14)$$

Један од основних задатака при електролучном заваривању јесте спречавање настанка хладних прслина у завареном споју и добијање заварених спојева са траженим механичким особинама.

За решење овог задатка потребна је примена таквих температурских циклуса заваривања који обезбеђују одређену брзину хлађења споја у температурској области преображаја аустенита и за то време не доводе до предугог задржавања изнад A_{c3} температуре. Максимална брзина хлађења зависи од хемијског састава и дебелине завареног челика и такође од садржаја водоника у растопљеном металу.

Одређивање температуре предгревања према јапанским ауторима.

По аналогiji са формулом еквивалентног угљеника, предложене је од стране јапанских аутора (Ото и Bessyo) показатељ склоности нисколегираних челика ка стварању хладних прслина при заваривању:

$$P_c = CE + \frac{s}{600} + \frac{H}{60}, \text{ } \%, \quad (4.15)$$

$$P_w = CE + \frac{K}{4 \cdot 104} + \frac{H}{60}, \text{ } \%, \quad (4.16)$$

где је: CE – показатељ којим се узима у обзир утицај хемијског састава челика (основног материјала) и који се израчунава у зависности од процентуалног садржаја легирајућих елемената по формули:

$$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B, \text{ } \%, \quad (4.17)$$

где је: s – дебелина челика у mm .

H – количина дифундованог водоника у $ml/100 g$ метала шава измерен јапанском глицеринском методом (или методом живе).

Ако је за мерење употребљена метода испитивања живом, тада важи: $H_{jap} = 0.64 \cdot H_{DW} - 0.39$, $K = 69 \cdot s$ – интензитет крутости у N/mm^2 ; важи и за суочено заварене лимове дебелине $s < 150 mm$ (Suzuki и Yurioka су за $s < 38 mm$ дали тачнији израз: $K = 1352 \cdot s - 14.75 \cdot s^2$).

Осим наведених параметарских једначина, у литератури се може наћи и следећа једначина:

$$P_{CE} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0.0024 \cdot s, \text{ } \%. \quad (4.18)$$

Предгревање, ради спречавања појаве хладних прслина, препоручује се ако су вредности израчунате према параметарским једначинама P_C , P_W , P_{CE} веће од 0.3. Потребна температура предгревања би била:

$$T_p = 1440 \cdot P_c - 392, ^\circ\text{C} . \quad (4.19)$$

4.4. Практичне методе

Одређивање заварљивости практичним методама заснива се на прорачуну појаве прслина у завареном спој и то:

- у току процеса,
- непосредно после процеса и
- после одређеног времена (~ 48 сати).

Процена заварљивости применом практичних метода је проширена и на испитивање појава прслина услед накнадног загревања (термичке обраде), као и на одређивање напона при коме долази до појаве прслина. Напонско-деформационо стање је главни узрок настајања хладних прслина. Критеријуми за оцену заварљивости, односно способности материјала да се одупру настајању прслина могу бити различити, а заснивају се на одређивању критичне деформације у функцији температуре при заваривању, као и на одређивању критичног напона при коме долази до настанка прслина.

Постоје велики број практичних метода за испитивање заварљивости, око 900, које није могуће овде појединачно образложити, али је битно напоменути да све оне утврђују врсту и степен промене испитиваног узорка. Степен насталих промена утврђује се познатим методама испитивања (затезањем, савијањем, мерењем тврдоће, жилавости и тсл.), пре и после термичког дејства, а по потреби се металографски испитују шав и околина.

4.4.1 Пробе склоности ка лому (топлом и хладном)

Ове врсте проба имају велики значај и најзаступљеније су при освајању нових метода и поступака заваривања. Највећу примену имају пробе склоности ка појави хладних прслина, јер се при испитивању може узети у обзир и утицај параметара заваривања тј. уноса топлоте. Пробе хладног лома, тј. пробе склоности ка хладним прслинама, деле се на две групе:

1. Пробе слободних (неукрућених) спојева и
2. Пробе укрућених спојева.

У групи 2 разликују се:

- *Пробе са самоукљештењем* које се изводе погодном монтажом елемената пробног споја тако да долази до самоукљештења шави или споја и
- *Пробе са насилним укљештењем* помоћу посебних алата и уређаја којима се елементи споја фиксирају. При томе, код неких проба постоји могућност промене степена укрућења или брзине хлађења односно термичке строгости. Тако да се може оценити појединачни утицај на хладни лом како укрућења тако и брзине хлађења.

4.4.2 Пробе са диригованим напрезањем

Пробе са диригованим напрезањем примењују се за оцену склоности ка хладном лому после заваривања, тако што се епрувете одмах након заваривања излажу дејству спољашњих оптерећења. Предност ових проба је свакако могућност избора врсте и величине оптерећења, које највише утичу на хладни лом.

4.4.3 Пробе симулирањем термичких циклуса

Ова врста проби се изводе на симулаторима и по методи BWRA. У симулаторима се пробни незаварени узорци излажу загревању и хлађењу, према циклусима који копирају заваривачке температурске циклусе у појединим тачкама различито удаљеним од осе шави. На тај се начин могу утврдити промене својстава отпорности и пластичности у ЗУТ-у, зависно од режима загревања или хлађења.

Испитивање по методи BWRA користи технику која се заснива на загревању узорка у пећима до 950°C и затим хлађењу, након чега се врши испитивање узорка затезањем и/или ударним затезањем. Неке од практичних метода за испитивање дате су у табели 4.4.

Табела 4.4 Преглед практичних проба за оцену заварљивости челика [5]

Критеријум		Врста пробе	Назив пробе	Оцена
Склоност ка прлинама	Хладним	Самоукурћене	CTS, крстаста, Fisco, Tekken, кружна	Прслине се појављују или не појављују
		Са регулисаним напоном	TRC, RRC, IMPLANT, LTP	
		Са симулираним техничким циклусима	- BWRA и имитација загревања: - електричним отпором, - индукцијом	
	Топлим	Укрућена	Tekken, Fisco, кружна	
		Са регулисаним напоном	Varestraint, Bauman	
	Ламеларним	- металографска - механичка	Испитивање затезањем у правцу дебљине лима	
	Жарења	Изотермичка краткотрајног течења	-	
Механичка својства	Тврдоћа	Мерење тврдоће	Метод Викерс	$HV < HV_{max}$
	Својства чврстоће	Испитивање затезањем	Затезање	$R_m^{OM} \approx R_m^S$
	Ударна жилавост	Испитивање жилавости	Метод Шарпи	Прелазна температура

На основу резултата аналитичке процене заварљивости и њене провере применом практичних проба, на основу табеле 4.4 може се донети оцена о заварљивости и могу се предложити мере да се она побољша. То јест, критичне величине усвојеног показатеља заварљивости (тврдоћа, жилавост, прслине и тсл.) могу се остварити заваривањем:

- 1) Без посебних мера, када је материјал добро заварљив,
- 2) Са применом посебних мера, када је материјал условно заварљив и
- 3) Са применом таквих мера које су неоправдане са техно-економске тачке гледишта за случај да је материјал тешко заварљив.

4.5 Процена заварљивости на основу KHZ дијаграма

Поред поменутих метода, у новије време, користе се и трансформациони KHZ дијаграми. За неке конструкционе челике се могу наћи најчешће у страној литератури, дијаграми хлађења у условима заваривања, тј. дијаграми разлагања потхлађеног аустенита под утицајем различитих брзина хлађења које одговарају различитим температурским циклусима. Ова врста дијаграма се даје у полуалгоритамском координатном систему температура – време или температура – време хлађења од 800 до 500°C. Ово време се означава са $t_{8/5}$ и такође у логаритамској подели се наноси на апсцисну осу дијаграма.

4.6 Оцена заварљивости челика повишене јачине

Савремене заварене конструкције морају испунити одређене захтеве, међу којима су најбитније: смањење тежине и повећање носивости конструкције. Прве заварене конструкције су користиле челике који су имали напон течења од 250 MPa. Касније су развијани све квалитетнији и јачи челици, као што су [3]:

- угљенично-мангански (C-Mn) челици, умирени алуминијумом, $R_{eH} = 300 \div 360$ MPa,
- микрелегирани (*финозрни* - ТМ) челици, који су добијени металуршко-механичким поступком (микрелегирањем и нормализацијом, односно контролисаним ваљањем), чиме им је напон течења повећан до приближно 450 MPa,
- нисколегирани бејнитни челици (први пут произведени у Енглеској), са напоном течења не већим од 550 MPa и
- нисколегирани побољшани челици чији напон течења може бити и 700 MPa.

Треба напоменути да се у литератури могу наћи различите поделе ових челика, које се разликују у појединим земљама. Према чешким стандардима разликују се микрелегирани феритно-перлитни челици, бејнитни нисколегирани нормализовани и отпуштени челици, као и нисколегирани побољшани челици, док у немачким стандардима ови челици су обухваћени стандардима DIN 17100 и DIN 17200. У нашем стандарду SRPS EN 10025:2003 даје се преглед општих конструкционих C-Mn челика, док стандард SRPS EN 10025 укључује и микрелегиране финозрне челике повишене јачине.

4.6.1 Проблеми заварљивости C-Mn челика

Ова врста челика има перлитно-феритну структуру, а ојачање својства отпорности настаје због пораста удела перлита у структури, ојачања ферита манганом (који образује чврст раствор у α -гвожђу и уситњавања металних зрна).

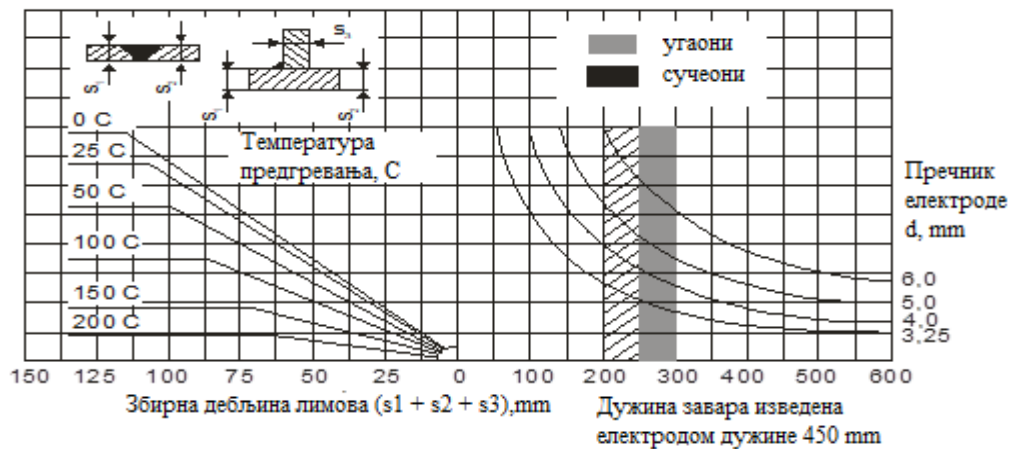
Примењују се за мостоградњу, хидроградњу, грађевинарство, резервоаре и тсл., а испоручују се као шипке, профили и лимови. Челици са дебелином лимова $s < 25$ mm и хемијски еквивалентни угљеник $CE < 0.45\%$, могу се добро заваривати и без предгревања. За веће дебљине, као и при заваривању на сниженим температурама, неопходно је

предгревање или заваривање кратким заварима. Еквивалентни угљеник се за С-Мн челике израчунава на основу израза:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% . \quad (4.20)$$

Челици Š0370, Š0460 и Š0561, користе се за заварене конструкције код којих нема опасности од појаве кртог лома. За конструкције које су изложене затезању, примењују се челици Š0461 и Š0562. Уколико у већој мери постоји реална опасност од појаве кртог лома, препоручују се челици Š0471 и Š0563.

При заваривању С-Мн челика, јавља се проблем појаве хладних прелина. Разлог овог проблема је перлит, који се на температурама вишим од A_{c1} трансформише у аустенит, а при брзом хлађењу у зони утицаја топлоте (ЗУТ-у) може се трансформисати у мартензит. Да би се у овом случају спречила појава хладних прелина, врши се потпуно или локално предгревање, а заваривање се изводи са што већом погонском енергијом. Присуство велике количине дифундованог водоника може довести до појаве хладних прелина. Из овог разлога заваривање се врши искључиво поступцима и технологијама које се одликују ниским садржајем водоника, што код РЕЛ поступка одговара коришћењу базичних сушених електрода. За одређивање температуре предгревања може се применити формула Сеферијана или дијаграм на слици 4.1.



Слика 4.1 Дијаграм за избор температуре предгревања С-Мн челика, РЕЛ поступком, базичним електродама [3]

Примена дијаграма, заснива се на одређивању типа споја, дебљине лима (плоче), као и пречника базичне електроде. Такође је потребно усвојити, или израчунати, дужину зава l , на основу технолошких параметара заваривања. Препоруке за дужину зава су:

- $l = 200 \div 250 \text{ mm}$ код сучеоних спојева и
- $l = 250 \div 300 \text{ mm}$ код угаоних спојева.

Тачније се та дужина одређује по формули:

$$l = 0.04 \cdot \frac{N_3^2 \cdot k_2 \cdot q^2}{s^2 \cdot v_z \cdot (T_w - T_0)}, \text{ cm, где су:} \quad (4.21)$$

k_2 - коефицијент непрекидности лука, (за РЕЛ, $k_2 = 0.6 \div 0.8$),

$T_w = M_s + 50 \div 100$ - допуштена температура хлађења завара у °C,

N_3 - фактор облика споја (за сучеоне спојеве $N_3 = 1.5$, за угаоне спојеве $N_3 = 0.9$, за угаони шав у Т-споју $N_3 = 0.8$),

$q = U \cdot I \cdot \eta$ - ефективна снага (моћ) лука у J/s,

s - дебљина лима у mm,

v_z - брзина заваривања у cm/s и

T_0 - почетна температура у °C.

Да би се верификовали усвојени технолошки параметри заваривања, потребно је израчунати време хлађења између 800 и 500°C ($t_{8/5}$) и унети га у KHZ дијаграм. Из KHZ дијаграма се тада читава да ли се добија тражена структура са одговарајућим излазним механичким особинама (оптимална жилавост и одговарајућа тврдоћа).

4.6.2 Проблеми заварљивости микролегираних (финозрних-ТМ) челика

Карактеристика микролегираних челика јесте да је садржај угљеника мањи од 0.2%, при чему се додају мале количине микролегирајућих елемената (Nb, Ti, V, Al, Ta, Zr) чији збирни садржај не прелази 0.2%. Микролегирањем се стварају фина зрна, чиме се повећава јачина челика, али не на рачун пораста садржаја угљеника (јер би то погоршало заварљивост), већ путем уситњавања металних зрна, односно стварањем нитрида, карбида и карбонитрида микролегирајућих елемената који се издвајају на границама металних зрна и спречавају њихов раст у аустенитном подручју. Уситњавање зрна се постиже нормализационим жарењем или контролисаним ваљањем и хлађењем полуфабриката.

Микролегирани челици повишене јачине су посебно склони ка појави хладних прслина, што зависи од величине еквивалентног угљеника, дебљине и типа споја. У циљу спречавања настанка ових прслина примењује се предгревање које утиче не само на образовање тражене структуре ЗУТ-а већ и на снижење заосталих напона и количине дифундованог водоника из шаву у ЗУТ-у.

Челици из ове групе према стандарду SRPS EN 10025 у ознаци садрже словни симбол ČRP, ČRN и ČRV и број који представља најмању гарантовану границу течења.

Заварљивости финозрних микролегираних челика може се одредити на основу следеће формуле за еквивалентни угљеник, при чему је садржај C (0.1 ÷ 0.18%), Mn (1.0 ÷ 1.6%) и Nb (0.025 ÷ 0.095%):

$$CE = C + \frac{Mo}{10} + 3 \cdot Nb, \% . \quad (4.22)$$

Ако финозрни челик има и додатке ванадијума и азота, израз би гласио:

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + \frac{V}{3} + 3 \cdot N, \% . \quad (4.23)$$

Уколико се прорачуна да је $CE < 0.35\%$ челици се могу заваривати без посебних мера, а ако се прорачуна да је $CE = 0.35 \div 0.45\%$ потребно је предузети посебне мере при заваривању под прахом и у заштити CO_2 . Посебне мере се пре свега односе на повезивање температуре предгревања са погонском енергијом и међупролазном температуром заваривања.

4.6.3 Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине

4.6.3.1 Бејнитни челици

Даљи развој челика повишене јачине у односу на микролегиране условио је појаву ових бејнитних челика. Производња овог челика почела је у Енглеској, под називом *FORTYWELD*, где је и заштићен британским патентом бр. 611.598 [5]. Садржај угљеника није већи од 0.18% , при томе су нешто повећани садржаји Mn и Si , док су легирајући елементи присутни у количинама Mo (0.5%) и B ($\approx 0.003\%$). Легирајући елементи у наведеним количинама и при малим брзинама хлађења (чак и хлађењем на ваздуху) омогућавају стварање бејнитне структуре. Додацима мангана и хрома снижава се температура бејнитне трансформације на $600 \div 300^\circ C$, чиме се постиже уситњавање металних зрна и већа дисперзија карбида, што за последицу има повећање јачине. Даље се, после нормализације може добити напон течења $R_{eH} = 460 \div 600 MPa$.

Овако висок напон течења, омогућава примену бејнитних челика за најразличитије конструкције. Неки од примера примене су: дизалице, железничке платформе, транспортне цистерне, грађевинске машине и тсл. Треба напоменути да се не примењују за конструкције које раде на сниженим температурама.

Бејнитни челици спадају у групу челика повишене јачине, па код њих основни проблем при заваривању представља појава хладних прслина у металу шави и ЗУТ-у, као и пад жилавости у ЗУТ-у. Решавање проблема се постиже смањењем брзине хлађења после заваривања, а смањење брзине се практично постиже предгревањем или повећањем погонске енергије.

4.6.3.2 Нисколегирани побољшани челици ($Q + T$ - *Quenching + Tempering*)

Ови челици, иако су нискоугљенични ($C < 0.2\%$), склони су закаљивању, чак и при релативно спором хлађењу. Највеће вредности својстава отпорности могу се добити каљењем на мартензитну структуру при чему тада напон течења достиже вредност од $400 \div 800 MPa$. Посебно је значајан утицај бора, јер он доводи до уситњавања примарних зрна, дезоксидације и денитрирања металног купатила, као и до великог повећања прокаљивости.

Каљење и отпуштање челика подразумевају обраду у специјалној и скупој технолошкој опреми. Каљење се изводи млазевима текуће воде са температуре од око $900^\circ C$ до температуре око $300^\circ C$ директно после топлог ваљања, или се лимови после ваљања хладе до температуре околине и накнадно загревају ради каљења. После тога

изводи се операција отпуштања у проточним пећима на температурама $500 \div 700^{\circ}\text{C}$, са задржавањем од једног пута, а затим се лимови хладе на ваздуху. На температури отпуштања од 500°C , добија се тврдоћа од 350 HV , $R_{\text{eH}} = 490\text{ MPa}$ и жилавост од 3.5 J , док се при температури отпуштања од 700°C постиже 230 HV , $R_{\text{eH}} = 320\text{ MPa}$ и жилавост 11 J . Ови челици су финозрни, јер се кале са температуре при којој су настала ситна аустенитна зрна. Тако се добијају челични полупроизводи велике јачине и добре заварљивости.

При прописивању технологије заваривања, треба имати у виду да су особине нисколегираних побољшаних (Q + T) челика добијене оптималном термичком обрадом, па ће се због дејства температурских циклуса заваривања оне променити на месту споја. Значи, поред хемијског састава челика, при избору режима заваривања, треба рачунати са чињеницом да су корисне особине челика добијене термичком обрадом побољшања. Из овог разлога за сваки челик из ове класе мора се дефинисати опсег варирања брзине хлађења, одакле произлазе и граничне вредности погонске енергије, као и време задржавања ЗУТ-а изнад A_{C3} температуре. Доња гранична вредност погонске енергије треба да је довољна да се спречи појава хладних прслина. Горња вредност погонске енергије, као и време задржавања изнад A_{C3} температуре, одређује се из услова да се пад јачине у ЗУТ-у сведе на најмању могућу меру.

За разлику од других конструкционих челика, код ових челика је боље примењивати технологије које дају ниже погонске енергије, као што су РЕЛ и заваривање у заштити гасова. Нарочито за ове челике важи препорука да се технологија заваривања прописује повезано са траженим излазним карактеристикама завареног споја. Препоруке су: да за РЕЛ заваривање q_1 треба да буде у границама $8 \div 12\text{ kJ/cm}$, а за ЕПП поступак од $13 \div 30\text{ kJ/cm}$.

5. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Челици повишене јачине су квалитетни челици са изузетним механичким својствима, нарочито у погледу затезне јачине. Ограничена и отежана заварљивост представљају мане ових челика. Постоје низ фактора који условљавају успешност заваривања. Један од њих је и технологија заваривања. Правилним избором технологије заваривања могу се успешно превазићи проблеми заварљивости челика повишене јачине и битно утицати на карактеристике добијеног споја.

У овом делу биће разматрани проблеми заварљивости нисколегираног челика класе WELDOX 700 произведен у Шведској железари SSAB Oxelösund и она даје следеће податке о њему: $R_m = 760 \text{ MPa}$ као и хемијски састав дат у табели 5.1. Интерна ознака произвођача садржи још и суфиксе D, E и F који се односе на гарантовану ударну жилавост ЗУТ-а: D на -20°C , E на -40°C и F на -60°C . Сви челици класе WELDOX имају гарантовану ударну жилавост од 40 J , одређену на 3 mm од ЗУТ-а најближе линији спајања, при собној температури.

Постоје три модификације овог челика, а разлика је само у погледу ударне жилавости:

- Weldom 700D = S690Q,
- Weldom 700E = S690QL и
- Weldom 700F = S690QL1

Табела 5.1 Прописан хемијски састав челика WELDOX 700 [6]

Ознака	Захтев	Садржај хемијских елемената, %														
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	B	Cu	Ti	Nb	
WELDOX 700	Прописан max	0.20	1.50	0.60	0.020	0.010	0.70	0.70	2.0	0.09	0.015	0.005	0.30	0.040	0.010	0.040

5.1 Заварљивост челика повишене јачине WELDOX 700

Квалитет заваривања споја зависи од особина основног материјала (ОМ), додатног материјала (ДМ) као и од геометрије жлеба, вештине заваривача и стања заваривачке опреме. Заварљивост челика класе WELDOX 700 је релативно добра, једини проблем заварљивости челика ове класе односи се на хладне (водоничне) прслине. Углавном се овај проблем може решити коришћењем аустенитних електрода, контролисаним уносом топлоте и посебним условима предгревања или накнадном термичком обрадом. При томе се подразумева коришћење нисководоничних додатних материјала. Да би се постигла добра заварљивост споја, потребно је придржавати се следећих препорука које ће бити објашњење у даљем тексту.

5.2 Предгревање и међупролазна температура

Правилно предгревање и међупролазна температура (engl. *interpass*¹) су само неке од мера за спречавање хладних прслина. Поред тога потребно је придржавати се и следећих препорука [6]:

- Снизити садржај водоника у споју ($H < 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$ метала шави);
- Одабрати одговарајућу температуру предгревања (T_p) и интерпас температуру (T_{interpas});
- Применити нисководоничне електроде (обавезно чување и сушење електрода према препорукама произвођача);
- Одстранити све нечистоће из зоне заваривања (влажу из електроде или са жице, влагу или рђу из жлеба и околних површина, влагу из масти и емулзија садржаних у жлебу), заваривати при малој влажности ваздуха и заштитног гаса;
- Предузети све мере за смањење заосталих напона у завареном споју;
- Не користити додатне материјале веће јачине од потребне и прописане;
- Одабрати најповољнији редослед заваривања који умањује заостале напоне и деформације;
- Усвојити правилан зазор у жлебу ($\max 3 \text{ mm}$ и код сучеоног и угаоног жлеба);
- Без обзира да ли је прописано предгревање, гасним гориоником пажљиво загрејати непосредну зону споја и његову околину, водећи рачуна да се делови не загреју изнад препоручене температуре предгревања/отпуштања (од 150 до 200°C);
- Одржавати максималну међупролазну температуру у границама $T_{\text{interpas}} \approx 200$ до 225°C , зависно од крутости/дебљине завариваних делова;
- Ако је спољашња влажност повишена или је температура испод 5°C , најнижа препоручена температура предгревања мора бити повећана за 25°C . Ово доприноси чврстини припојних шавова који се изводе са уносом топлоте око $10 \text{ kJ}/\text{cm}$;
- Усвојене температуре предгревања и међупролазне температуре не важе за случај да је унос топлоте већи од $17 \text{ kJ}/\text{cm}$ (заваривање релативно малом брзином);
- Усвојена је претпоставка да се заварени спој хлади на ваздуху собне температуре ($23 \pm 5^\circ\text{C}$);
- Захтеване температуре предгревања могу бити остварене на различите начине. Електрични грејни елементи око припремљеног споја често су најбољи избор, јер они омогућавају равномерно грејање свих површина.
- Температуре морају бити приказане помоћу контактеног (или бесконтактеног) термометра;
- Време прогревања износи $2 \text{ min}/\text{mm}$ дебљине (па чак до $5 \text{ min}/\text{mm}$ према препорукама произвођача челика). Делови се притом споро загревају и споро хладе;

¹ Међупролазна (*interpass*) температура је прелазна температура до које се хлади једнопролазни завар и при којој се почиње са полагањем другог.

- Ако је дебљина плоче 25 mm температура се мери 2 min после загревања. Ако је плоча дебела 12.5 mm, температура се мери после 1 min. Међупролазна температура може бити измерена на металу шави или на основном материјалу у непосредној близини шави;
- Пре заваривања у околини зоне споја (не и у самој зони споја) нанети заштитни спреј за лакше скидање капљица метала (које знатно прште на основни материјал, посебно при МАГ/МИГ заваривању);
- Припојне заваре извести према технолошкој документацији (за први завар), зависно од врсте споја и дебљине плоче, а дужина припоја треба да се креће у границама 40 ÷ 50 mm. Препоручује се да додатни материјал припоја буде исти као и материјал коренског завара;
- После наношења сваког завара детаљно очистити површину гусенице од треске;

Препоручена температура предгревања, за нормалне услове крутости, нарочито су битне за припојне шавове и коренски пролаз. За строже услове крутости препоручују се више температуре. На температуру предгревања утиче и дебљина плоче. Код челика WELDOX 700 се препоручује температура предгревања од 150 ÷ 200°C, а максимална међупролазна температура 250°C с циљем да се сперчи порозност у металу шави изазвана турбуленцијом ваздуха.

Препоручене радне температуре предгревања треба да спрече појаву хладних прслина које се односе на линију топљења основног материјала. Међутим, хладне (водоничне) прслине могу настати и у металу шави, нарочито код додатног материјала велике јачине, са напоном течења око 600 МПа. Повишене радне температуре треба избегавати, зато што оне представљају проблем заваривачу. Такође, потреба за предгревањем се може смањити помоћу неких мера као што су:

- Накнадно загревање,
- Завршна обрада завареног споја пре настанка прслина (у року од 48 сати),
- Повећан унос топлоте и
- Примена аустенитних додатних материјала.

5.2.1 Накнадно загревање

Накнадно загревање завара представља алтернативну допуну вишој радној температури која убрзава дифузију водоника из шави и ЗУТ-а. Нарочито је велики ризик настајања водоничних прслина када температура падне испод 150 до 100°C, па и на собној температури после 48 сати од заваривања. Из овог разлога не треба се дозволити да температура падне испод 150°C, већ је потребно подићи на 200°C и на њој држати најмање 1 h на сваких 10 mm дебљине. За челик WELDOX 700 температура накнадног загревања не треба да надмаши 200°C јер то није економски оправдано.

5.2.2 Завршна обрада завареног споја пре настајања прслина

Водоничне прслине могу настати за време од 48 h од заваривања, али је највећа вероватноћа за то у року од неколико сати од завршетка процеса заваривања. Са даљим протоком времена, када се приближава рок од 48 сати, вероватноћа за њихову појаву знатно опада.

Потреба за предгревањем може се смањити ако се припоји изведу са високим уносом топлоте, а коренски пролази се испуне са што више краћим заварима – један за другим. Тиме ће најкритичније време настанка ових прслина истећи на $150 \div 100^\circ\text{C}$. Односно, претходни пролаз својом топлотом делује као да је извршено предгревање на наредни пролаз.

5.2.3 Повећан (висок) унос топлоте

Потребно предгревање се може знатно редуковати применом високог уноса топлоте, а на основу препорука произвођача додатног материјала. Висок унос топлоте се може остварити за припојне шавове, као и за заваре испуне и покривне заваре, при чему дужина припојних шавова при заваривању ових челика треба да буде око 50 mm.

5.2.4 Примена аустенитних додатних материјала

Аустенитни (нерђајући) депозит шава је материјал у коме се водоник увелико раствара па се тако веома смањује штетан утицај водоника. Поред тога, аустенитни додатни материјали дају веома жилав и истегљив метал шава са ниским напоном течења. Стога се ризик од водоничних прслина знатно умањује, јер се контракција заваривачких делова при хлађењу смањује истезањем дуктилног² метала аустенитног шава, што умањује ниво заосталих напона у ЗУТ-у. Аустенитни додатни материјали се могу наћи у виду базичних електрода за РЕЛ заваривање или пуњене жице за МАГ и МИГ поступке заваривања.

5.3 Унос топлоте

Челици калсе WELDOX се заварују уносом топлоте која варира у уским границама да би се добиле добре механичке особине завареног споја. Тај унос топлоте се рачуна по формули:

$$q_l = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_z} \cdot \eta, \text{ kJ/cm}, \quad (5.1)$$

где су: U – радни напон у V , I – јачина струје у A , v_z – брзина заваривања у cm/s и η – степен искоришћења.

Мањи или већи унос топлоте утиче на: жилавост ЗУТ-а, својства отпорности, заостале напоне завареног споја и величину ЗУТ-а.

Све горе наведено проистиче из повезаности уноса топлоте (q_l) и времена хлађења између 800 и 500°C ($t_{8/5}$) које дефинише структурне промене у критичној зони ЗУТ-а.

За конструкциони челик типа WELDOX 700, проблеми заварљивости се углавном свode на спречавање настанка хладних (водоничних) прслина и постизање минималне вредности жилавости ЗУТ-а од $40 J$ на собној температури и $27 J$ на температури од -40°C . Посебну пажњу треба обратити на извођење вишепролазних заварених спојева, код којих се може повећати радна температура, односно повећати унос топлоте. Зато се препоручује прецизна контрола међупролазне температуре која се регулише дужином завара попуте. Краћи завари повећавају унос топлоте у односу на рачунску вредност (q_l).

² Дуктилан – истегљив, жилав.

5.4 Додатни материјал

За заваривање материјала WELDOX 700 требало би применити базичне сушене електроде или уопштено речено поступке заваривања који гарантују да садржај водоника у металу шава неће прећи 5 ml/100 g.

Нисколегирани и високолегирани додатни материјали могу се употребити за заваривање овог челика. Применом додатних материјала мање јачине од основног материјала постиже се већа жилавост завареног споја, већа отпорност на водоничне прслине и нижи заостали напони у завареном споју, посебно у ЗУТ-у.

Код вишеслојних спојева код WELDOX 700, нарочито је корисно заваривање са додатним материјалима различитих јачина (сл. 5.1). Припојни шавови и први пролаз заварују се са додатним материјалом мање јачине, а затим остали пролази се изводе са додатним материјалом веће јачине. Ова се техника примењује кад се техничким условима траже приближно иста својства отпорности у свим деловима завареног споја.

За извођење угаоних шавова на челику WELDOX 700 се препоручују додатни материјали нижег напона течења у односу на основни материјал.



Слика 5.1 Вишеслојно заваривање различитим додатним материјалима [7]

Приликом заваривања ове класе челика треба строго водити рачуна о количини дифундованог водоника у металу шава. У том смислу, „хигијена“ заваривања је од изузетног значаја. Код МАГ и ТИГ заваривања додатним материјалом у облику пуних жица може се постићи овако низак садржај водоника у металу шава. Садржај водоника у металу шава за друге типове додатних материјала, као што су прашком пуњене жице (МАГ/МИГ), износи онолико колико произвођачи додатног материјала гарантују.

5.4.1 Додатни материјал од нерђајућег челика

Додатни материјали од нерђајућег челика могу бити употребљавани за заваривање скоро свих конструкционих челика. Они омогућавају заваривање при собној температури без предгревања. Код ових, нерђајућих додатних материјала, водоник не утиче на перформансе у толикој мери као код нелегираних и нисколегираних додатних материјала.

Смањење напона у завареним спојевима

Нижи напон течења додатног материјала у односу на основни доводи до мањег напона у завареним деловима него при заваривању са додатним материјалом веће јачине, јер, по правилу, материјал мање јачине даје дуктилнији спој него материјал веће јачине.

Ниво заосталих напона у завару се повећава са порастом степена укривљења. Ако је термичко скупљање завара ометено у свим правцима настаје вишеосно напонско стање. Ово стање повећава ниво заосталих напона. Концентрација напона настаје на местима

локалне промене геометрије или структурне нехомогености (металуршки фактор). Пример су места са променом попречног пресека површина.

Најпростији начин да се делује на расподелу заосталих напона јесте примена додатног материјала што мање јачине. Ако се спој мора извести тако да има равномерну тврдоћу на површини, завари попуне се изводе са додатним материјалом мање чврстоће, а покривни завари додатним материјалом веће јачине. После хлађења споја надвишење шава се најчешће бруси до нивоа основног материјала. Завари попуне се изводе рутилном електродом INOX В 18/8/6 која има напон течења око 350 МПа. Његова улога је да апсорбује вибрације које спој трпи у експлоатацији и да неутралише постојеће напоне. Ово има позитиван утицај на шав док се проблем тврдоће решава наношењем покривног заваара веће тврдоће.

5.5 Заштитни гас

При неким поступцима заваривања заштитни гас има веома важну улогу. Та важност се нарочито запажа при МАГ/МИГ заваривању. Заштитни гасови који су најчешће у примени су: аргон, хелијум, угљен-диоксид и њихове мешавине. Препоручује се мешавина следећег састава: $Ar + 1 \div 3\% O_2$ или $Ar + 2.5\% CO_2$, за припојне и коренске заваре. За заваре испуне и покривне заваре препоручује се мешавина инертног и активног гаса: $82\% Ar + 18\% CO_2$.

Интерни гасови: Код нас се углавном користе аргон и његове мешавине док се хелијум више користи у Америци и у Европи. Аргон као заштитни гас мора бити чист, без примеса, јер оне погоршавају квалитет шава.

Аргон је једноатомни гас, инертан и нерастворљив у течном стању и око 38% тежи од ваздуха што је посебно повољно за заваривање у хоризонталном положају. Хелијум је такође инертни гас, знатно лакши од ваздуха па то узрокује његову већу потрошњу него аргона при заваривању у хоризонталном положају. Поред тога аргон има нижи степен јонизације од хелијума, што значи да је потребан нижи напон за успостављање и одржавање електричног лука при истој дужини. На основу овога може се закључити, да се у заштити аргона ослободи мања количина топлоте него у заштити хелијума. Због тога је заштита у аргону погоднија за заваривање танких лимова док је хелијум погоднији за заваривање делова већих пресека.

Предности инертних гасова су: олакшава се успостављање електричног лука, смањује прштање, смањује могућност оксидације, омогућава ефикасну заштиту и тсл.

Активни гасови: Од активних гасова највећу примену има угљен-диоксид (CO_2). Угљен-диоксид је гас без боје мириса и киселастог је укуса. Дозвољени садржај у ваздуху се ограничава на 3% јер преко тог садржаја има штетан утицај на људски организам. Његова чистоћа износи 99.8%, без садржаја примеса у виду уља, H_2S , HCl , са дозвољеним садржајем воде од 0.2%. испорука се врши у челичним боцама под притиском од 150 bara и запремине од 40 l. У оваквим условима је у течном стању, јер већ при 73 bara CO_2 прелази у течност, а при испуштању из боце без загревања, прелази у чврсто стање стварајући тзв. „суви лед“.

Предности активног гаса су: даје стабилан лук, смањује порозност шава, повећава уваривање, док је мана велико прштање растопљених капљица метала.

5.6 Испитивање завареног споја

5.6.1 Врсте грешака у завареном споју

Приликом заваривања у завареним спојевима се јављају мање или веће грешке. Испитивање завареног споја има задатак да утврди облик, распоред, врсту и величину грешке и то како она утиче на сигурност конструкције. Постоји следећи квалитет заварених спојева:

1. Класа В – висок ниво квалитета,
2. Класа С – средњи ниво квалитета и
3. Класа D – низак ниво квалитета.

Класа В се односи на најодговорније спојеве и конструкције које су изложене цикличним динамичким оптерећењима или високим притисцима, а чији би лом могао да угрози људске животе или да изазове велике материјалне губитке. У конструкције ове класе спадају: парни котлови, друмски и железнички мостови, бродови и др.

Класа С се односи на статички оптерећене конструкције, као и за остале конструкције чија хаварија не угрожава људске животе нити изазива веће материјалне штете. У ову групу спадају: постоља машина алатки, цевоводи, носеће конструкције итд.

Класа D обухвата мање значајне заварене конструкције типа малих резервоара или цевовода без притиска, металне ограде и тсл.

Контрола која се може спровести је: *претходна, текућа (процесна) и завршна*.

Претходна контрола има за циљ да провери својства основног и додатног материјала, припрему за заваривање, исправност опреме за заваривање и мерних инструмената, исправност опреме и инструмената као мера заштите на раду.

Текућа (процесна) контрола утврђује да ли се одржавају предвиђена технологија и режим заваривања, исправност опреме и инструмената као и мере заштите на раду.

Завршна контрола обухвата димензовану контролу и спољни изглед шави, контролу унутрашњих грешака и структуре, као и контролу механичких својства (тврдоћа, жилавост).

5.6.2 Испитивање без разарања

Испитивања без разарања се користе за откривање површинских, подповршинских и дубинских грешака у завареном споју.

За откривање површинских и подповршинских грешака у завареном споју користе се: *визуелна метода, метода течних пенетраната и магнетофлуksна метода*. За откривање грешака по дубини завареног споја користе се: *ултразвучна метода и радиографска метода (γ ; x зраци)*.

5.6.3 Испитивање са разарњем

Методe испитивања са разарањем подразумевају израду одговарајућих епрувета направљених из плоча за испитивање. За верификацију нове технологије заваривања потребно је да се изведу следећа испитивања:

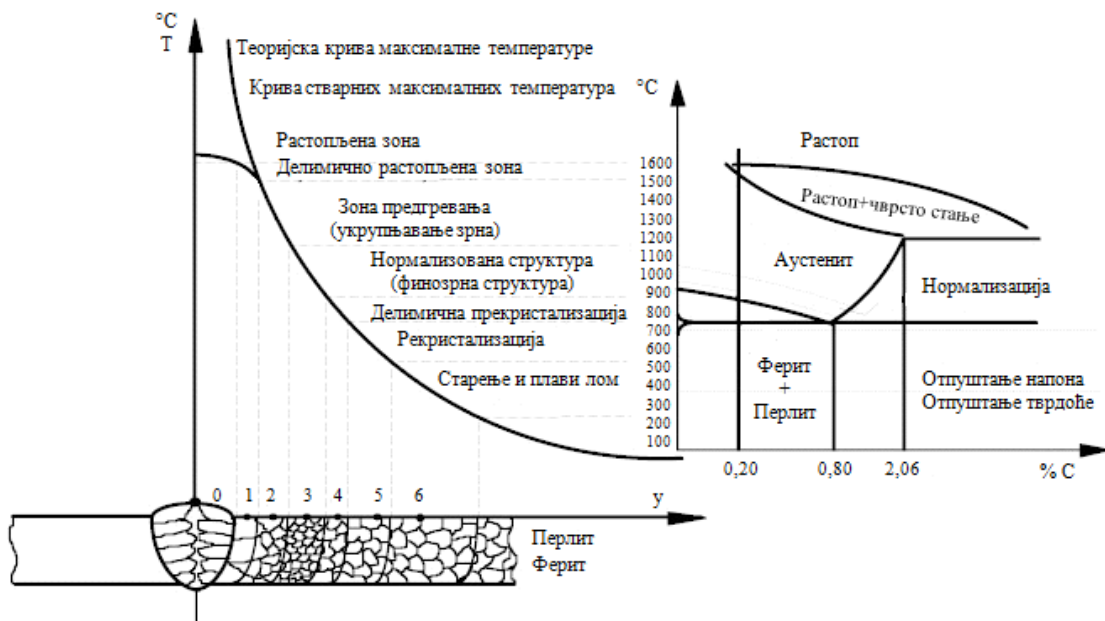
- макроструктурно испитивање,
- микроструктурно испитивање,
- испитивање тврдоће,
- испитивање ударне жилавости и
- испитивање затезањем.

5.6.4 Макроструктурно испитивање

Макроструктурно испитивање завареног споја је стандардно испитивање које се обавља приликом квалификације технологије заваривања. Испитивање макроструктуре се изводи на истој епрувети на којој се изводи и испитивање микроструктуре и мерење тврдоће. Бочне стране епрувете се брусе брусним средствима и нагризају. Нагризање се изводи петопроцентним ниталом (HNO_3 – раствор азотне киселине у алкохолу) који помаже да се јасније уочи структура завареног споја. При овом испитивању утврђује се да ли у завареном споју постоје грешке типа укључака и прелина.

5.6.5 Испитивање микроструктуре

Испитивање микроструктуре је стандардно металографско испитивање узорка припремљених из завареног споја. Ова метода се изводи после макроструктурног испитивања. За овај поступак неопходно је да се епрувете нагризу дванаестопроцентним раствором нитала или, у зависности од структуре, раствором пикрала (HCl - раствор хлороводоничне киселине у алкохолу). Припремљени узорци се посматрају под микроскопом са увећањем $200 \div 500$ пута. Зоне испитивања су: основни материјал, зона утицаја топлоте (ЗУТ), линија стапања и метал шав. Анализирањем тих зона утврђује се њихова микроструктура, такође може да се одреди и величина зрна, присуство мартензита, бејнита, аустенита и осталих микроструктура. Структурне зоне за челик приказане су на слици 5.2.



Слика 5.2 Структурне зоне за челик са 0.2% C [8]

5.6.6 Испитивање тврдоће

Под појмом тврдоће метала и легура подразумева се отпор који тај материјал пружа продирању неког тврђег тела у њега. Усвојена ознака за тврдоћу је H (*Hardness*). Постоје статичке и динамичке методе за испитивање тврдоће. Статичке методе су: Бринелова (HB), Викерсова (HV) и Роквелова (HR), а динамичке методе су: метода Полдијевог чекића (HP) или метода упоређивања, склероскопска метода (HSh) и дуроскопска метода (HD).

Код статичких метода, тврдоћа се изражава односом силе по јединици површине отиска или мерењем дубине отиска који направи утискивач у материјалу изражен у одговарајућим јединицама за тврдоћу.

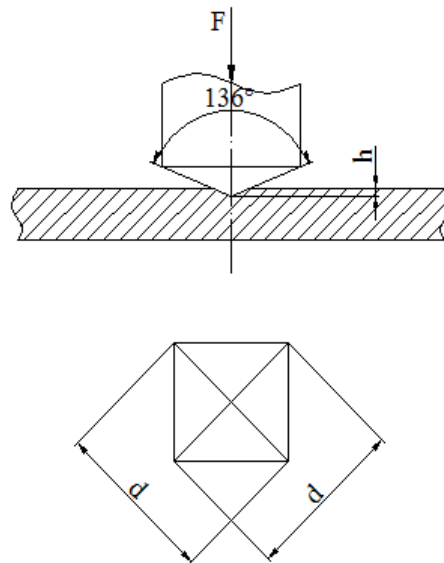
Тврдоћа заварених спојева мери се методом Викерс, силом утискивања нпр. од 10 daN , (HV_{10}) уз тежњу да сила утискивања буде што мања.

$$HV = 1.854 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad (5.2)$$

где су: HV – тврдоћа по Викерсу, F – сила утискивања и d – средња дужина дијагонале отиска.

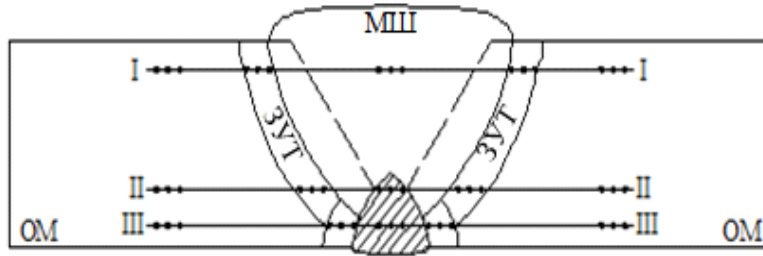
Испитивање тврдоће према Викерсу спроводи се на унапред припремљеном узорку. Припрема узорка се најчешће изводи брушењем и полирањем. После испитивања макроструктуре исти узорак се користи за испитивање тврдоће. На постављени узорак делује се силом преко утискивача у облику пирамиде.

Викерсова тврдоћа рачуна се из односа силе притиска F (N) и површине отиска омотача пирамиде A (mm^2), који се одређује мерењем дијагонала d_1 и d_2 (mm) (сл. 5.3).



Слика 5.3 Викерсова метода – утискивача и отисак [8]

Тврдоћа се мери на више места по пресеку узорка тако да се обухвати основни материјал леве плоче, зона утицаја топлоте, метал шави и основни материјал десне плоче у правцу једне линије (сл. 5.4).



Слика 5.4 Правци мерења тврдоће за вишепролазни суочени спој [8]

У зависности од дебљине материјала мерење се изводи у различитом броју линија. Тврдоћа је један од веома значајних фактора за оцену заварљивости.

5.6.7 Испитивање ударне жилавости

Испитивање ударне жилавости, методом Шарпи, употребом епрувета са зарезом, јесте једна од најважнијих механичких метода испитивања материјала, а служи за утврђивање његове отпорности према кртом лому.

Енергија утрoшена за лом епрувете (изражена у цулима, Ј) је мера жилавости материјала, а захтева се и код развоја нових материјала, код провере готових материјала и код анализе лома услед разних дефеката у пракси. Зарез на епрувети може да буде у облику слова U, V, итд.

Епрувете са V-зарезом обавезно се користе за одређивање ударне жилавости општих конструкционих челика, а епрувете са U-зарезом код испитивања својстава квалитетнијих челика. Ударна жилавост металних материјала се испитује на стандардизованим епруветама квадратног или правоугаоног попречног пресека са зарезом у облику слова U (ознака KU) или слова V (ознака KV).

За утврђивање жилавости материјала испитују се по три исте епрувете на прописаној температури, при чему не сме бити веће расипање добијених вредности од 30% у односу на минималну прописану вредност (само једна од њих може имати нижу вредност). У стандардима за пријем и испоруку металних материјала прописане су минималне средње вредности ударне жилавости. На слици 5.5 је приказан крти и жилав лом.



Слика 5.5 Крти и жилави лом под електронским микроскопом 1000x [8]

5. Избор најповољније технологије заваривања

На жилавост материјала утиче низ фактора као што су:

- температура испитивања,
- микроструктура (нарочито величина зрна),
- облик и димензије зареза,
- димензије епрувете и
- брзина удара.

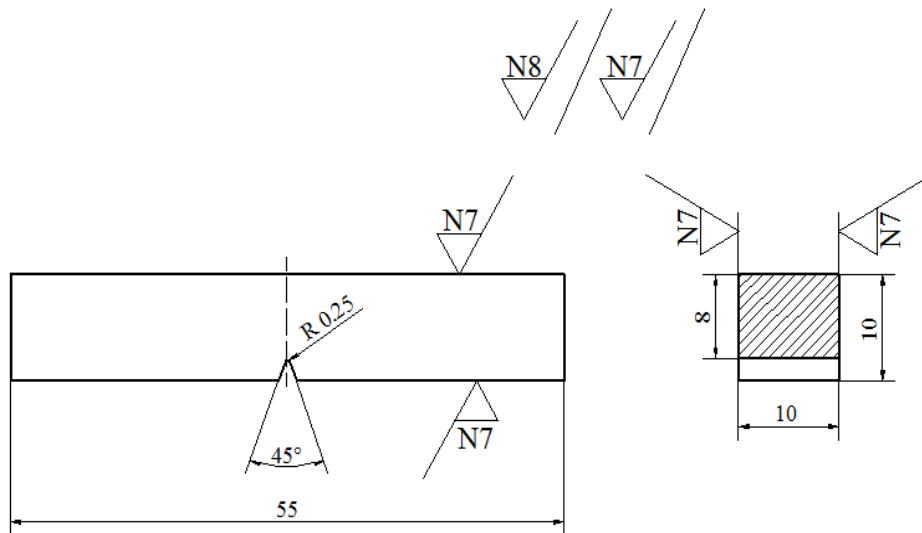
Температура испитивања има највећи утицај на жилавост. Жилавост материјала опада са снижавањем температуре испитивања, јер са снижавањем температуре снижава и пластичност, односно деформабилност материјала.

Микроструктура има велики утицај на жилавост материјала. Нарочито повољно утиче на жилавост смањивање величине зрна.

Облик и димензије зареза знатно утичу на жилавост. Зареzi изазивају концентрацију тродимензионалних напрезања, нормална напрезања при томе, делују на затезање, док тангенцијална изазивају клизање.

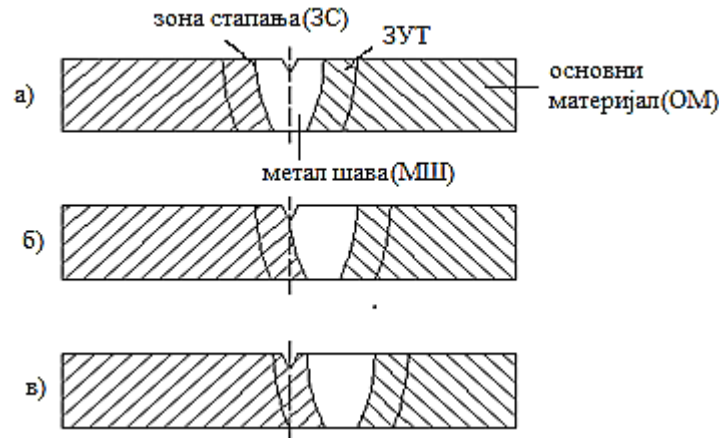
Димензије епрувете различито утичу на жилавост материјала (сл. 5.6). Најмање утиче дужина епрувете, док ширина и дебљина утичу слично на смањивање жилавости.

Брзина удара Шарпијевог клатна нема значајнијег утицаја на жилавост материјала ако је у распону 3 до 7 m/s, док знатно веће брзине $20 \div 50$ m/s смањују жилавост због смањеног удела пластичне деформације.



Слика 5.6 Епрувета за испитивање жилавости са V-зарезом [8]

Енергија удара је важно механичко својство материјала, које најбоље дефинише његову отпорност према нестабилном расту прслине у њему под прецизно одређеним условима. Другим речима, енергија удара је критична вредност концентрације напона на врху прслине при којој наступа њен нестабилни раст у условима равanske деформације.



Слика 5.7. Распоред зареза на епруветама: а) зарез у МШ, б) зарез у ЗС, в) зарез у ЗУТ-у [8]

Рад утрошен за прелом епрувете добија се као разлика између расположивог рада и неутрошеног рада, док се ударна жилавост израчунава као енергија удара по јединици површине испод V зареза стандардне епрувете, а изражава се у J/cm^2 .

Испитују се сучеони спојеви (сл. 5.7) при чему се одређује жилавост у металу шаву (а), на линији стапања (б) и у зони утицаја топлоте (в).

5.6.8 Испитивање затезањем

Испитивање затезањем је најзначајнији начин испитивања материјала у циљу одређивања његових механичких својстава: напона течења ($R_{p0,2}$) и затезне јачине (R_m). Истовремено, са испитивањем својстава јачине могу се добити и подаци о способности деформације материјала:

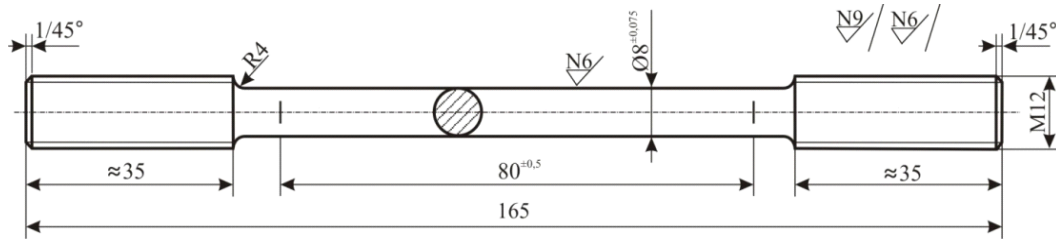
- издужење (A) и
- сужење (Z).

Испитивање затезањем се заснива на спором затезању узорка стандардног облика и димензија. Универзална машина за испитивање (кидалица) је опремљена динамометром за мерење силе и писачем који у сваком моменту записује зависност издужења од силе. Помоћу података добијених при испитивању и измерених на прекинутом узорку одређују се:

- затезна јачина, R_m , МПа,
- напон течења, $R_{p0,2}$, МПа (горња граница течења, R_{eH}),
- издужење $A_{5,65}$, $A_{11,3}$, % (индекси се односе на мерну дужину),
- сужење Z, % (контракција) и
- модул еластичности E, МПа.

Епрувете за испитивање затезањем основног материјала (сл. 5.8) и завареног споја се по облику и геометрији не разликују. Једина разлика је у томе што код епрувете за испитивање завареног споја у средини постоји заварен спој.

5. Избор најповољније технологије заваривања



Слика 5.8 Изглед епрувете за испитивање затезањем [8]

5.7 Примери испитивања заварених узорка

Испитивање заварених спојева извршена је од стране акредитоване институције. Вршена су експериментална испитивања на основном материјалу и на завареном споју (поступком РЕЛ и МАГ заваривања). Резултати испитивања су помоћу слика, табела и дијаграма приказана у даљем тексту.

5.7.1 Експериментално испитивање – основни материјал

Основни материјал је челик повишене јачине WELDOX 700 произведен у Шведској железари SSAB Oxelösund. Хенијски састав, механичке карактеристике, ударна жилавост и еквивалент угљеника (CE) приказани су у табелама 5.2 до 5.5.

Табела 5.2 Хемијски састав челика WELDOX 700 (max. %) [8]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
0.20	0.80	1.70	0.020	0.010	1.50	0.50	2.0	0.70	0.005

Табела 5.3. Механичке карактеристике челика WELDOX 700 [8]

Дебљина, mm	Напон течења (R_{eH}), MPa	Затезна чврстоћа (R_m), MPa	Издужење, $A_{5,65}$, %
3 ÷ 50	690	770 ÷ 940	14
50 ÷ 100	650	760 ÷ 930	14
100 ÷ 150	630	710 ÷ 900	14

Табела 5.4. Ударна жилавост челика WELDOX 700 у попречном правцу [8]

Температура испитивања	- 40°C	- 20°C	0°C
Минимална енергија удара	27 J	30 J	35 J

Табела 5.5 Еквивалент угљеника CE (max) челика WELDOX 700 [8]

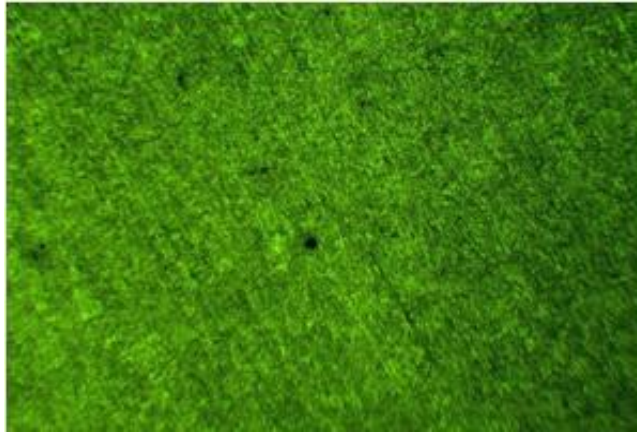
Дебљина, mm	3 ÷ 50	50 ÷ 100	100 ÷ 150
CE	0.65	0.77	0.83

Напомена: Хемијски еквивалент угљеника (CE) је рачунат по формули Међународног института за заваривање.

5. Избор најповољније технологије заваривања

5.7.1.1 Испитивање микроструктуре

Експерименталним испитивањем микроструктуре потврђена је сорбитна структура основног материјала (сл. 5.9).



Слика 5.9 Микроструктура ОМ увећана 200x [8]

Напомена: Макроструктурно испитивање основног материјала није рађено.

5.7.1.2 Испитивање тврдоће

Сви поступци су имали по два узорка са изузетком РЕЛ/МАГ и МАГ/МАГ са по једним узорком. Број тачака на којима је мерена тврдоћа кретао се од три до седам. Вредности тврдоће основног материјала приказани су у табели 5.6.

Табела 5.6 Вредности тврдоће ОМ измерене методом Викерс (HV_{10}) [8]

Тврдоћа ОМ испитивана у поступку:	Линија I-I		Линија II-II		Линија III-III	
	Прва тачка	Последња тачка	Прва тачка	Последња тачка	Прва тачка	Последња тачка
РЕЛ/МАГ узорак 1	260	279	279	276	276	276
РЕЛ/МАГ узорак 2	181	279	279	270	279	279
РЕЛ/МАГ	258	258	245	258	268	222
МАГ/МАГ узорак 1	287	279	279	279	279	279
МАГ/МАГ узорак 2	276	279	281	279	279	281
МАГ/МАГ	260	266	245	268	264	264
МИГ/МАГ узорак 1	241,6	254,8	-	-	259,4	259,2
МИГ/МАГ узорак 2	262,1	259	-	-	254,5	269,6

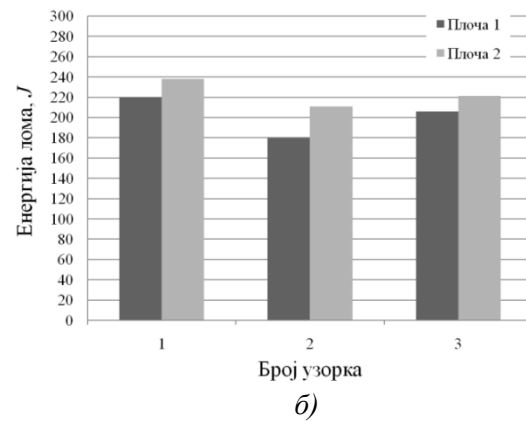
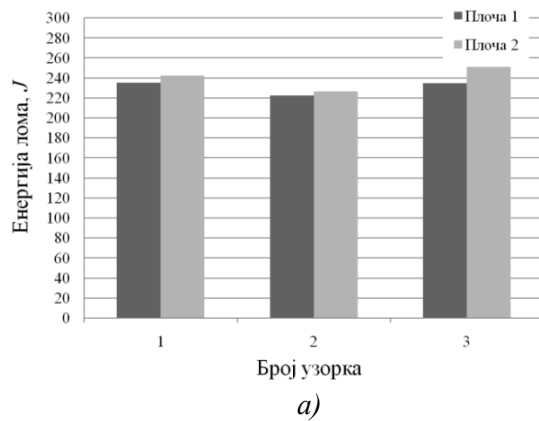
5.7.1.3 Испитивање ударне жилавости

Испитивање ударне жилавости основног материјала рађено је само код РЕЛ/МАГ и МАГ/МАГ поступка са по три узорка чији су резултати приказани у табелама 5.7 и 5.8, а на сликама 5.10 и 5.11 приказан је упоредни приказ вредности енергије лома и ударне жилавости.

5. Избор најповољније технологије заваривања

Табела 5.7 Енергија лома и ударна жилавост основног материјала на собној и сниженој температури прве испитне плоче [8]

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Енергија лома, J	Ударна Жилавост, J/cm ²	Жилав лом, %
WELDOX 700	+20	1.	51,87	183,30	235,17	293,96	91,04
		2.	53,45	168,99	222,44	278,05	93,54
		3.	43,79	190,88	234,68	293,34	96,02
	-40	1.	54,65	164,94	219,59	274,49	89,05
		2.	50,22	129,56	179,78	224,72	78,50
		3.	41,04	165,04	206,08	257,60	80,58

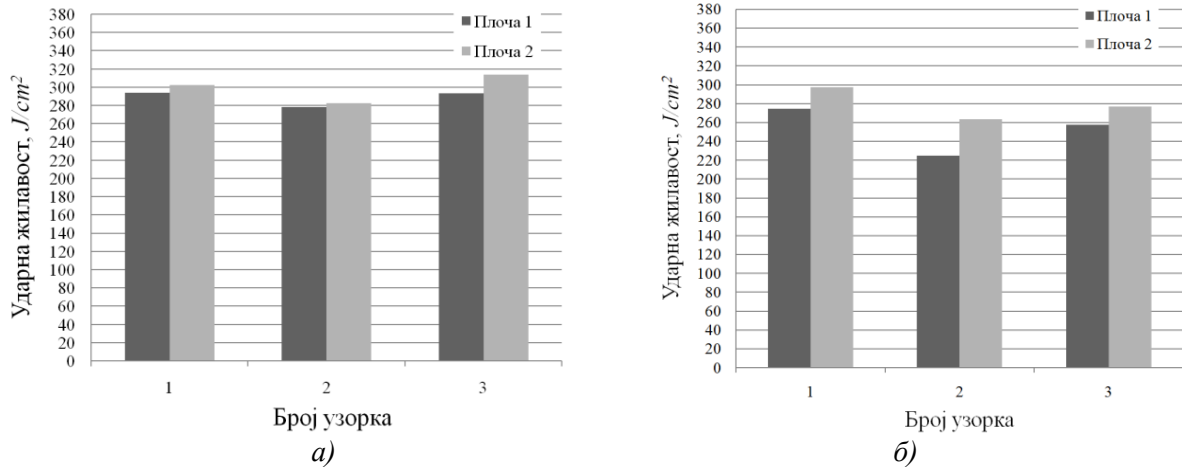


Слика 5.10 Упоредни приказ вредности енергије лома – ОМ: а) $T = 20^{\circ}\text{C}$ и б) $T = -40^{\circ}\text{C}$ [8]

Табела 5.8 Енергија лома и ударна жилавост основног материјала на собној и сниженој температури друге испитне плоче [8]

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Енергија лома, J	Ударна жилавост, J/cm ²	Жилав лом, %
WELDOX 700	+20	1.	55.59	168.43	242.02	302.52	91.79
		2.	53.61	172.58	226.19	282.74	92.83
		3.	52.34	198.55	250.89	313.61	94.81
	-40	1.	42.30	195.80	238.10	297.62	92.96
		2.	48.97	161.87	210.84	263.55	95.31
		3.	54.80	166.59	221.39	276.74	95.70

5. Избор најповољније технологије заваривања



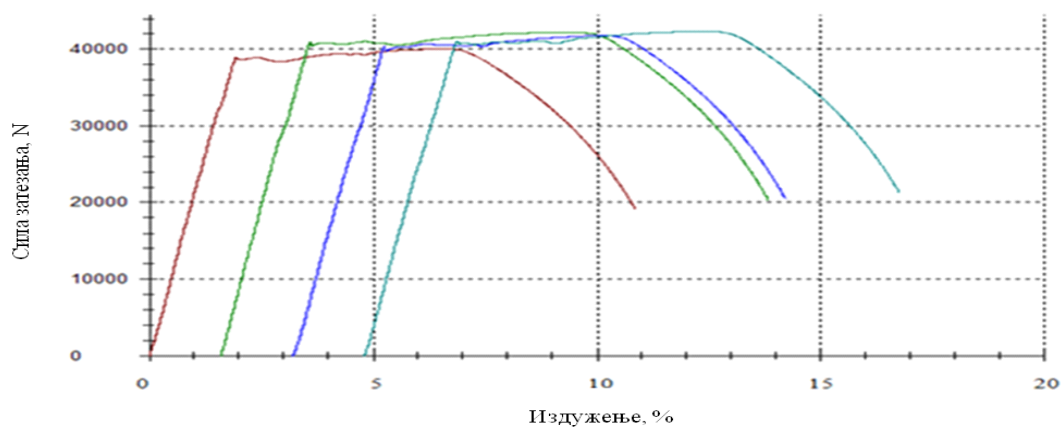
Слика 5.11 Упоредни приказ вредности ударне жилавости – ОМ: а) $T = 20^\circ\text{C}$ и б) $T = -40^\circ\text{C}$ [8]

5.7.1.4 Испитивање затезањем

Испитивање затезањем рађено је на епруветама које су израђене из плоча које су заварене поступцима РЕЛ/МАГ и МАГ/МАГ са по два узорка. Припремљене епрувете су затезане на кидалици ZWICK/ROELL Z 100 са мерним опсегом од $1 \div 100\text{ kN}$. Брзина деформисања је износила 100 mm/min . Резултати испитивања дати су у табели 5.9 и приказани на слици 5.12.

Табела 5.9 Експериментални резултати испитивања затезањем – ОМ [8]

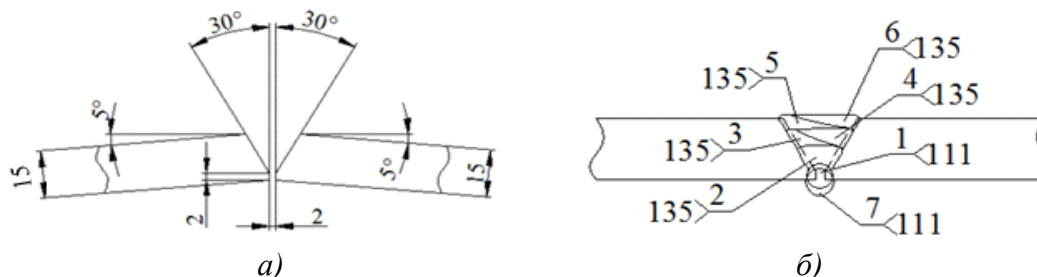
Број епрувете	l_0, mm	S_0, mm^2	$R_{p0.2}, \text{MPa}$	R_m, MPa	$A_{11.3}, \%$
1.	89.28	50.27	781.94	797.81	14.19
2.	89.28	50.27	809.40	839.92	11,3
3.	89.42	50.01	800.41	835.52	9.98
4.	88.29	50.27	811.95	842.45	10.92



Слика 5.12 Збирни дијаграм затезања за четири епрувете – ОМ [8]

5.7.2 Експериментално испитивање – поступак РЕЛ/МАГ

Плоча је заварена коришћењем РЕЛ/МАГ поступка са електродом INOX В 18/8/6 пречника 3,25 mm (коренски пролаз) и пуном жицом МИГ 75 пречника 1,2 mm (пролази попуне) у заштити мешавине гасова $Ar + 18\% CO_2$ (сл. 5.13). Параметри заваривања приказани су у табели 5.10.



Слика 5.13 а) Припрема плоча за заваривање и б) распоред уношења пролаза [8]

Табела 5.10 Параметри заваривања [8]

Завар бр.	Поступак	Додатни материјал / пречник	Струја, А	Напон, V	Брзина заваривања, cm/min	Погонска енергија, kJ/cm
1.	111	INOX 18/8/6 / 3,25	110	22	18.5	6.28
2.	135	MIG 75 / 1.2	145	28	30.77	5.94
3.	135	MIG 75 / 1.2	145	28	28.57	6.39
4.	135	MIG 75 / 1.2	145	28	28.57	6.39
5.	135	MIG 75 / 1.2	165	24	24.75	7.20
6.	135	MIG 75 / 1.2	165	24	24.75	7.20
7.	111	INOX 18/8/6 / 3.5	110	22	18.5	6.28

За време заваривања изведено је предгревање гасним грејачем на температуру $T_p = 200^\circ C$, а температура међупролаза (interpass) одржавана је у интервалу од $200 \div 225^\circ C$. Контрола ових температура вршена је бесконтактним термометром.

Припрема жлеба испитиване плоче извршена је машинским путем на глодалици. Пре почетка заваривања плоче су закошене (сл. 5.13а) у циљу смањења деформација које настају при заваривању услед унете количине топлоте. Параметри заваривања који су коришћени одабрани су тако да је унета количина енергије у препорученим границама.

За заваривање припојних и коренских пролаза коришћена је аустенитна, базична електрода, према појединим стандардима: EN 1600 E 18 8 Mn B 22; DIN 86 56 E 18 8 Mn B 20 +; AWS A5.4 $\approx$ E 307–15.

5.7.2.1 Испитивање макроструктуре

На узорцима нису откривене грешке типа заједа, непровара и прслина. Узорци задовољавају класу квалитета „В“ према стандарду EN ISO 5817.

5. Избор најповољније технологије заваривања

5.7.2.2 Испитивање микроструктуре

Испитивање микроструктуре код овог поступка рађено је оптичким микроскопом са увећањем 200 пута у свим карактеристичним зонама на два узорка (сл. 5.14).



ОМ - мартензитно-бејнитна структура



Основни материјал у зони ЗУТ-а



Прелаз ОМ и материјал лица шава



МШ - феритно-мартензитна структура и карбиди



Прелаз ОМ и материјал корена шава



Корен МШ - аустенитно-феритна структура са финим карбидима

Слика 5.14 Микроструктура карактеристичних зона узорак – 1 увећана 200x [8]

5.7.2.3 Испитивање тврдоће

Испитивање тврдоће рађено је на два узорка у три линије са деветнаест тачака код првог и двадесет тачака код другог узорка (таб 5.11). Тврдоћа је мерена методом Викерс. Приказ мерних тачака дат је на слици 5.15, а расподела тврдоће на сликама 5.16 и 5.17.

Табела 5.11 Вредности тврдоће узорка измерене методом Викерс (HV_{10}) [8]

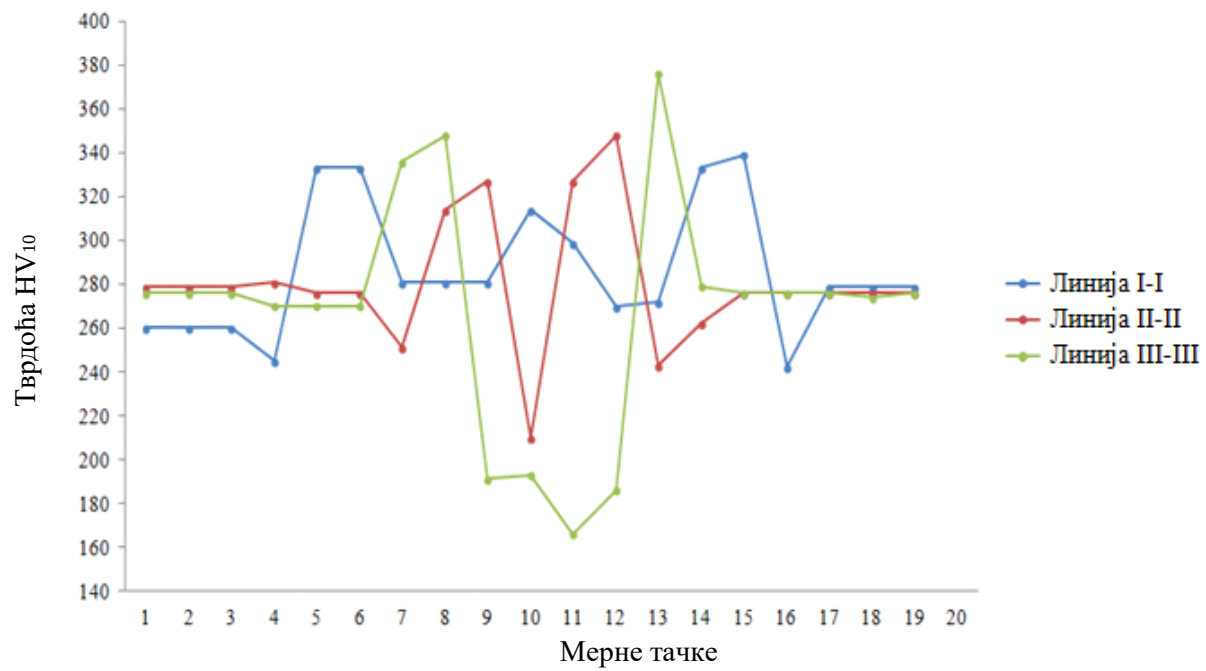
Број мерне тачке	Поступак РЕЛ/МАГ					
	Узорак 1			Узорак 2		
	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III
1	260	279	276	281	279	279
2	260	279	276	274	276	279
3	260	279	276	279	279	279
4	245	281	270	254	276	279
5	333	276	270	251	276	279
6	333	276	270	342	276	279
7	281	251	336	289	254	266
8	281	314	348	287	256	262
9	281	327	191	281	339	336
10	314	210	193	276	317	336
11	299	327	166	390	319	198
12	270	348	186	299	191	183
13	272	243	376	268	333	186
14	333	262	279	266	325	197
15	339	276	276	294	236	336
16	242	276	276	325	258	342
17	279	276	276	351	281	245
18	279	276	274	276	276	281
19	279	276	276	279	276	279
20	-	-	-	279	270	279

■ основни материјал, ■ ЗУТ, ■ метал шав

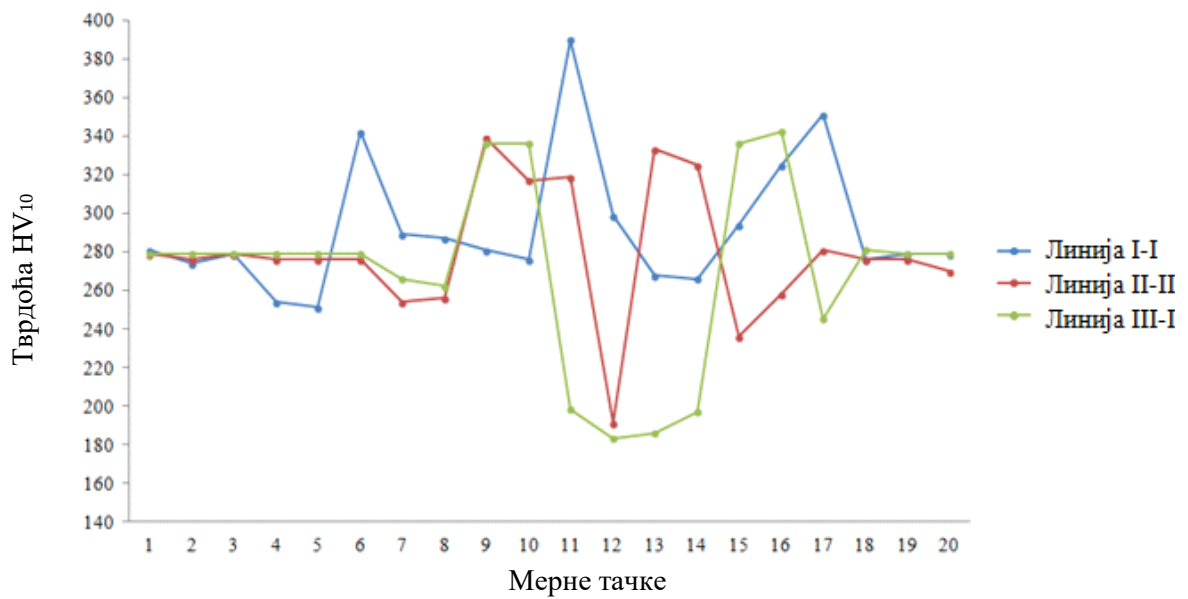


Слика 5.15 Металографски узорак - I за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће сучеоно завареног споја [8]

5. Избор најповољније технологије заваривања



Слика 5.16 Збирни дијаграм расподеле тврдоће узорак – 1 [8]



Слика 5.17 Збирни дијаграм расподеле тврдоће узорак – 2 [8]

5. Избор најповољније технологије заваривања

5.7.2.4 Испитивање ударне жилавости

Испитивање енергије лома и ударне жилавости вршено је на собној температури и то: на лицу шава, корену шава и линији стапања. Резултати су дати у табелама 5.12, 5.13 и 5.14.

Табела 5.12 Енергија лома и ударна жилавост лица шава на собној температури [8]

Челик	Температура, °C	Број узорка	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Енергија лома, J	Ударна жилавост J/cm^2	Жилав лом, %
WELDOX 700	+20	1.	34.63	9.92	44.54	55.68	1.82
		2.	32.09	19.96	52.05	65.06	13.58
		3.	27.15	20.16	47.31	59.14	8.20
		4.	33.05	16.16	49.21	61.51	6.20
		5.	24.58	11.37	35.95	44.94	1.08

Табела 5.13 Енергија лома и ударна жилавост корена шава на собној температури [8]

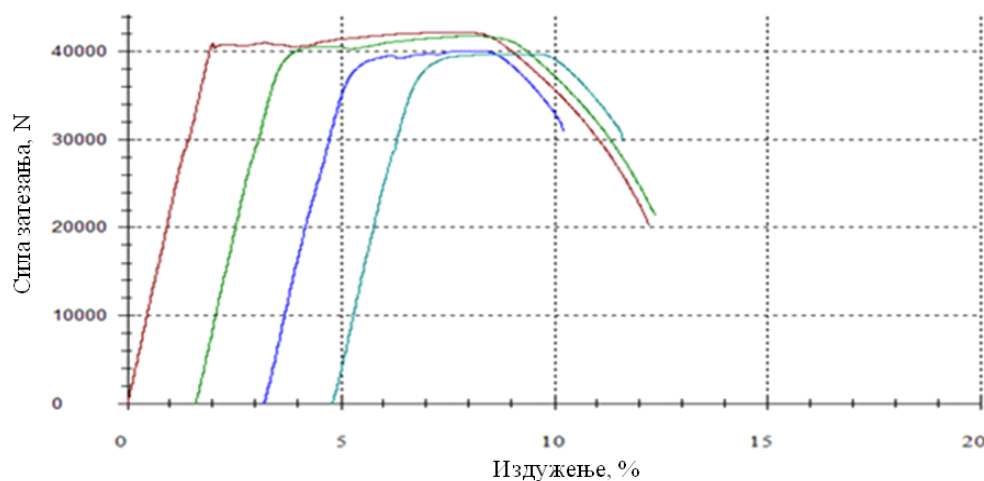
Челик	Температура, °C	Број узорка	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Енергија лома, J	Ударна жилавост, J/cm^2	Жилав лом, %
WELDOX 700	+20	1.	21.08	9.59	30.67	38.34	0.64
		2.	15.48	11.85	27.33	34.16	0.88
		3.	14.77	30.26	45.03	56.29	27.53
		4.	14.52	11.60	26.12	32.65	4.89

Табела 5.14 Енергија лома и ударна жилавост корен шава – линија стапања, на собној температури [8]

Челик	Температура, °C	Број узорка	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Енергија лома, J	Ударна жилавост, J/cm^2	Жилав лом, %
WELDOX 700	+20	1.	15.53	34.99	50.53	63.16	15.43
		2.	8.41	19.88	28.29	35.36	12.96
		3.	19.41	15.43	34.84	43.55	2.36
		4.	13.28	21.38	34.66	43.32	21.67
		5.	17.82	17.12	34.93	43.66	2.34

5.7.2.5 Испитивање затезањем

Испитивање затезањем завареног споја извршено је на четири узорка (сл. 5.18).



Слика 5.18 Збирни дијаграм затезања за четири епрувете – ЗС [8]

Лом епрувета се у свим случајевима дешавао у основном материјалу, што указује на то да су зоне завареног споја јаче од основног материјала. Резултати испитивања дати су у табели 5.15.

Табела 5.15 Експериментални резултати испитивања затезањем [8]

Број епрувете	l_0, mm	S_0, mm^2	$R_{p0,2}, MPa$	R_m, MPa	$A_{11,3}, \%$
1.	89.28	50.27	809.40	839.92	11.30
2.	88.42	50.27	763.52	831.08	9.77
3.	86.96	49.39	760.36	812.00	5.49
4.	86.96	49.39	739.68	804.47	5.38

6. ПРИМЕНА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Челици повишене јачине имају изузетно широку примену. Примењују се за израду: индустријске опреме, дизалица, резервоара, одговорних конструкција, цеви у петрохемији, делова пољопривредне механизације, рударских и железничких возила, багера и булдозера, возила за снежне услове, косачица, путничких возила и јако оптерећених возила за транспорт и теренске услове. Мостови, приобалне конструкције, централе за пренос енергије, електрични стубови, грађевинске плоче и диреци, само су још неки примери коришћења поменутих челика.

Пресудан фактор за избор челика повишене јачине, јесте однос његове јачине и тежине, у поређењу са истим односом који имају обични угљенични челици. Избор одговарајућег челика повишене јачине зависи од бројних захтева везаних за њихову примену, од којих су неки: смањење дебљине попречног пресека, добра својства корозивне отпорности, пластичности и заварљивости. Добре карактеристике челика повишене јачине, довеле су до њихове повећане примене при изради аутомобилских компонената.

Економски аспект је од изузетне важности и често при избору конструкционог материјала игра битнију улогу од техничког аспекта. На срећу, велики број челика повишене јачине се одликује одличним односом цена/квалитет, тако да са те стране њихова примена није ограничена. Наиме, њихова ионако повољна цена је учињена још повољнијом са напретком производње челика у електро пећима и процесом континуалног ливења танких слабова.

Репрезентативан пример успешне примене челика повишене јачине јесте већ реализовани пројекат који се односи на израду ултра лаких челичних каросерија аутомобила.

6.1 Ултра лаки челици за каросерије аутомобила - квантификовање економских добити због примене микролегираних челика

Челици повишене јачине су се практично наметнули као избор за пројектовање модерних аутомобила. Разлог томе су сталан притисак да се смањи укупна тежина аутомобила, као и стална конкуренција челику у виду других лакших материјала, као што су легуре алуминијума или магнезијума.

Пројекат „Ултра лака челична каросерија аутомобила“ (ULSAB – Ultra Light Steel Auto Body) је имао следећа три циља [9]:

- 1) Пројектовати јачу и сигурнију каросерију у поређењу са најбољим доступним моделима,
- 2) Смањити тежину каросерије и
- 3) Учинити цену производње каросерије истом или мањом у поређењу са тренутним ценама.

Пројекат је успешно изведен и сва три циља су са успехом испуњена.

У погледу материјала, најважнија промена била је замена јефтиног угљеничног челика скупљим челиком повишене јачине. Челици повишене јачине, који су имали напон течења у опсегу од 210 до 420 МПа, примењивали су се за израду више од 90% конструкције нових каросерија. Половина од укупне количине челика је имала напон

течења од 350 МПа. Употреба челика са напонам течења већим од 420 МПа, била је занемарљива.

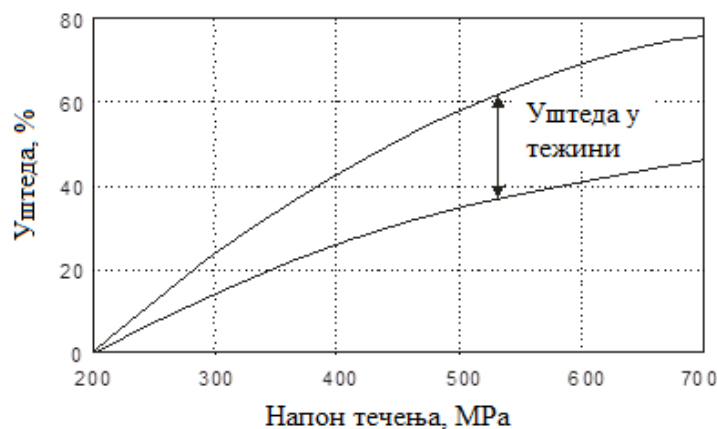
Иако су челици повишене јачине скупљи од обичних угљеничних челика, ипак су се показали као исплативо решење за аутомобилску индустрију.

ULSAB пројекат је показао, како се нпр. заменом јефтинијег угљеничног челика челиком повишене јачине, смањује тежина аутомобилске каросерије уз истовремено повећање њене јачине, док њена цена остаје иста, па чак постоје услови да се она и додатно смањи.

6.2 Смањење тежине и економска добит

Смањење тежине челика представља кључни фактор за економску добит. Један од начина смањења тежине се односи на замену угљеничних челика челицима повишене јачине. Челици повишене јачине могу имати напон течења који је и за 2 до 3 пута већи него код топло ваљаних заварљивих угљеничних челика. С тим што смањење тежине које се добија заменом угљеничних челика челицима повишене јачине, не зависи само од разлике у величини напона течења, већ и од начина оптерећења.

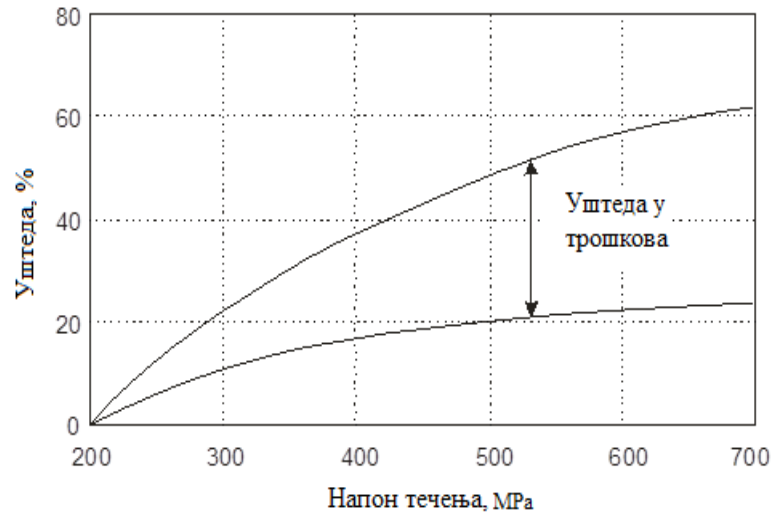
При оптерећењу затезањем, смањење тежине је пропорционално разлици у јачини, тј. повећање напона течења два пута смањује тежину потребног челика такође два пута (овај случај се јавља код нпр. арматурног гвожђа бетонских греда). Код других типова оптерећења (нпр. савијања), двоструко повећање напона течења доводи до смањења тежине од 34%, па и више. Имајући у виду степен сигурности, а будући да су челици повишене јачине бар дупло јачи од угљеничних челика, могуће је смањити тежину конструкције за најмање 25%. Величина уштеда на тежини због примене челика повишене јачине приказана је на слици 6.1.



Слика 6.1 Уштеда у тежини применом микролегираних челика [9]

Такође, додатне повољности су и што се микролегирани челици карактеришу и добром обрадивошћу, побољшаним свеукупним механичким карактеристикама (нпр. повећана жилавост и истегљивости) и нижим трошковима транспорта. Уштеда у трошковима због коришћења челика повишене јачине су приказане на слици 6.2.

6. Примена челика повишене јачине



Слика 6.2 Уштеда у трошковима применом микролегираних челика [9]

Заменом угљеничних челика челицима повишене јачине постиже се економска добит која је приказана следећом рачуницом:

Већа зарада за произвођаче челика (у US доларима по тони челика)

	Угљенични челици	Микролегирани челици
Продајна цена	350	415
Трошкови микролегирања	-0	-15
Остали трошкови производње	-300	-300
Зарада произвођача челика	50	100

Нижа цена за кориснике (у US доларима по тони челика)

Угљенични челик (1 тона x \$350)	350
Микролегирани челик (0.75 тона x \$415)	-311
Уштеда	39

На основу претходног рачуна можемо закључити да је замена челика економски привлачна и за произвођаче и за потрошаче. Произвођачи могу да очекују душло увећан профит од производње микролегираних челика, док са друге стране, потрошачи плаћају \$39 мање за овај материјал. Такође, додатне повољности су и што се микролегирани челици карактеришу и добром обрадивошћу, побољшаним свеукупним механичким карактеристикама (нпр. повећана жилавост и истегљивости) и нижим трошковима транспорта.

6.3 Сагледавање комерцијалне добити

Замена обичног угљеничног челика скупљим челиком повишене јачине доноси побољшање и у економском погледу и у погледу карактеристика и квалитета конструкције. Један од начина за достизање ових циљева су управо разни демонстрациони пројекти у којима ће главни акценат бити стављен на могућност и оправданост примене челика повишене јачине. Ови пројекти морају да укључе пре свега репрезентативне и пажљиво одабране производе са потпуним сагледавањем могућих добити за произвођаче, прерађиваче и кориснике челика.

Као пример, може се навести замена најчешће коришћеног угљеничног челика микролегираним челиком за спирално заварене водоводне цеви. Произвођачима челика ће ова замена повећати њихов удео у производњи нових производа, што ће се засигурно и исплатити. За прерађиваче, због ниског садржаја угљеника ($0.04 \div 0.06\%$ C) заваривање микролегираних челика не представља проблем, па је са те стране и те како подстицајно, јер се смањују трошкови уложеног рада. И на крају, корисници не само да добијају јефтинији производ, већ је он квалитетнији, јачи и поузданији.

Због тога је потребно да сваки показни пројекат буде потпуно документован са комплетном проценом свих побољшања и са детаљном анализом трошкова. Пројекат такође мора да буде усклађен са свим обавезујућим законским прописима и стандардима. Коначно, резултати сваког показног пројекта би требало да буду укључени у одговарајуће инжењерске спецификације.

6.4 Нове могућности за произвођаче и кориснике

Челици повишене јачине, због своје велике јачине у поређењу са топло ваљаним угљеничним челицима нуде практично велике могућности за значајно смањење тежине конструкција. Иако је цена производње ових челика виша од цене производње угљеничних челика, смањење тежине конструкције је толико, да је у коначној рачуници коришћење челика повишене јачине исплативије од коришћења угљеничних челика. Примена челика повишене јачине у аутомобилској индустрији се показала као веома исплатива и дала је подстрек и другим гранама индустрије да се окрену овом материјалу. Економска добит лежи истовремено и на страни произвођача (већа цена и побољшана конкурентност у односу на произвођаче лаких материјала) и на страни потрошача (смањена тежина материјала, боље карактеристике, олакшана прерада и нижи трошкови транспорта).

Могућност примене мање количине челика за задовољење инжењерских потреба, такође је погодност и за националну економију. Нису потребне велике инвестиције за замену застареле опреме новом. Осим тога, сваки недостатак у капацитетима за производњу челика здружених произвођача, може се балансирати јефтинијим и флексибилнијим електричним пећима.

Пут од теоријски атрактивног концепта замене угљеничних челика челицима повишене јачине, до комерцијалне реалности, захтева не мали напор, пре свега у индустрији производње челика. При томе, напредак постигнут у последњих 40-ак година, у науци, у технологији и у примени челика повишене јачине, створио је услове за прихватање економског изазова замене поменутих челика. Економска предност се заснива на ситуацији где сви добијају, што је управо можда и највећа иницијатива даљем развоју челика повишене јачине.

7. ЗАКЉУЧАК

Челици повишене јачине су се наметнули као општеприхваћени конструкциони материјал за израду одговорних заварених конструкција. Главни разлог томе су њихове веома повољне механичко-металуршке особине и одличан однос цена/кавалитет, смањење тежине, побољшана заварљивост и тсл. Применом микролегирајућих елемената (Nb, Ti, V, Zr и B) омогућили су челицима повишене јачине значајно смањење масе конструкције, а да притом носивост и јачина конструкције остане иста, у неки случајевима чак и већа.

Заваривање челика повишене јачине се може извести применом уобичајних поступака заваривања топљењем, при чему се добијају заварени спојеви одговарајуће јачине, тврдоће и жилавости који се не могу упоређивати са својствима основног материјала, али се те особине могу приближити особинама основног материјала, што је и главни циљ заваривања.

Примена челика повишене јачине посебно место заузима у аутомобилској индустрији, односно наметнули су се као логичан избор, с обзиром да показују одличну корозивну отпорност кад су пресвучени (превучени) заштитним превлакама, добро подносе велика оптерећења, имају добру отпорност на ломове и старење и врло су погодни за бојење. Поред тога, ови челици налазе широку примену и у другим областима индустрије. Индустријска опрема, резервоари, одговорне конструкције, цеви у петрохемији, делови пољопривредне механизације, рударска и железничка возила, багери и булдозери, возила за снежне услове, косачице, путничка возила и јако оптерећена возила за транспорт и теренске услове, само су неки примери коришћења поменутих челика.

У овом раду дата су општа објашњења везана за проблематику заварљивости челика повишене јачине, а нарочито се указује на:

- поступак и начин добијања челика,
- преглед и развој челика повишене јачине,
- заварљивост и проблеми заварљивости челика повишене јачине, са посебним освртом на заварљивост челика класе WELDOX 700,
- избор најповољније технологије заваривања челика класе WELDOX 700,
- избор најповољнијих параметара заваривања МАГ и РЕЛ методама,
- контрола и испитивање основног материјала, као и завареног споја и
- примена челика повишене јачине.

Посебан значај у овом раду, дат је оцени заварљивости челика повишене јачине класе WELDOX 700. Ова класа челика намењена је за израду конструкција изложених великим статичким и динамичким оптерећењима и због тога мора да задржи добре механичке особине у што ширем дијапазону радних температура, тврдоћу, јачину, жилавост на собним и сниженим температурама. Поред свих тих услова јавља се и условна заварљивост самог челика. С обзиром на то да се челици повишене јачине добијају додавањем микролегирајућих елемената и посебним поступцима термомеханичке прераде, при заваривању се мора водити рачуна да услед загревања и хлађења појединих зона не дође до нарушавања повољне структуре основног материјала.

После детаљне анализе основног материјала и завареног споја, избора најповољније комбинације додатних материјала, метода и технологије заваривања и спроведених испитивања утврђена је најповољнија технологија заваривања.

Заварена конструкција предложеном технологијом, подвргнута је ригорозним тестовима на којима се показала као врло поуздана.

Да би својства завареног споја имала приближно иста својства основног материјала, поред наведеног, потребно је придржавати се препорука произвођача, као и сазнања других истраживача из ове области.

Сагледана је економска и комерцијална добит применом челика повишене јачине, из које се може закључити да применом ових челика корист имају и произвођачи челика али и сами потрошачи. Произвођачи остварују предност већом ценом и побољшаном конкурентношћу у односу на произвођаче лаких материјала, док потрошачи економску добит остварују смањењем тежине материјала, бољим карактеристикама, олакшаном прерадом и нижим трошковима транспорта.

8. ЛИТЕРАТУРА

- 1) **Јовановић М., Лазих В., Арсић Д.:** *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- 2) **Арсић Д.:** *Оцена заварљивости челика повишене јачине S690 QL* - завршни рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- 3) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник, друго издање*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- 4) **Интернет страница:** <https://www.sae.org/>, приступљено: август 2018.
- 5) **Јовановић М., Лазих В.:** *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- 6) **Јовановић М., Лазих В., Маринковић П., Недељковић Б., Александровић С., Милосављевић Д.:** *Оцена заварљивости и избор најповољнијег поступка и технологије заваривања челика повишене јачине Weldom 700*, 26 Саветовање са међународним учешћем ЗАВАРИВАЊЕ 2010, Тара. Рад усмено изложен, објављен у целости на CD-и (ред. бр. 55) и у Зборнику резимеа радова, стр. 82.
- 7) **Јовановић М., Лазих В.:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- 8) **Милановић В.:** *Експериментално испитивање заварљивости и одабир оптималне технологије заваривања челика повишене јачине S690 QL* – мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- 9) **Интернет страница:** www.worldautosteel.org, приступљено: август 2018.