

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустријски инжењеринг

Предмет: Производне технологије (Технологија заваривања)

Број индекса: 111/ 2012

Тина Н. Михајловић

Преглед челика повишене јачине и оцена њихове заварљивости на основу трансформационих дијаграма 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 :

- 1) Наведе и опише врсте челика повишене јачине као и њихов историјски развој, примену и поступак производње.
- 2) Укаже на значај примене KHZ дијаграма и одређивање заварљивости на основу тих дијаграма.
- 3) На крају рада треба дати пример одређивања заварљивости за челик S690QL.

Препоручена литература:

- [1] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В. Ратковић Н.:** *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [2] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања- приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1996.
- [3] **Јовановић, М., Лазих, В.:** *Упутство за заваривање челика WELDOX 700*, Машински факултет, Крагујевац, 2008.
- [4] **Арсић Д.:** *Оцена заварљивости и избор најповољније технологије заваривања челика повишене јачине класе S690QL*, – мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2013.

Крагујевац, октобар 2015.

Ментор:
Проф. др Вукић Лазих

РЕЗИМЕ

Предмет овог рада су челици повишене јачине, посебно нисколегирани побољшани челици. У раду су приказани и поступци добијања микролегираних челика, као и могућности за повећање напона течења и утицај одређених хемијских елемената на структурне трансформације. У раду је такође утврђена методологија за оцену заварљивости челика повишене јачине. На крају је дата оцена заварљивости једне врсте челика повишене јачине (S690QL) на основу KHZ дијаграма и општи закључак о челицима повишене јачине и њиховој примени за израду одговорних заварених конструкција.

Кључне речи: челици повишене јачине, заварљивост, трансформациони дијаграми, тврдоћа, јачина.

ABSTRACT

Subject of this paper are high strength steels, especially low alloyed Q + T steels. There are also information about production processes of microalloyed steels, and possibilities for improving yield stress and influence of some specified chemical elements on structural transformations in steel. This paper gives the methodology for optimal high strength steel weldability estimation. In the end there is weldability estimation for special kind of high strength steel (S690QL) based on CCT diagrams and general conclusion about high strength steels and their use for responsible welded structures.

Key words : high strength steels, weldability, transformation diagrams, hardness, strength.

Садржај

Увод	1
1. ПРЕГЛЕД ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	3
1.1 Врсте челика повишене јачине	4
1.1.1 Угљенични челици	5
1.1.2 С-Мп челици	6
1.1.3 Умирени челици	6
1.1.4 Микролегирани челици	7
1.1.5 ТМСР челици	8
1.2 Нисколегирани челици повишене јачине	12
1.2.1 Бејнитни челици	12
1.2.2 Нисколегирани побољшани челици (Q+T–quenching + tempering)	13
2. НАЧИНИ ЗА ПОВЕЋАЊЕ НАПОНА ТЕЧЕЊА	15
2.1 Технолошки поступци повећања напона течења	15
2.1.1 Прерада на хладно	15
2.1.2 Прерада на топло	16
2.2 Металуршки поступци повећања напона течења	16
2.3 Утицај хемијских елемената који улазе у састав легура на промене структура челика	17
3. ТРАНСФОРМАЦИОНИ ДИЈАГРАМИ	20
3.1 Дијаграми изотермичког распада аустенита (ИРА)	20
<i>Слика 3.1.2 Дијаграм изотермичком преображаја аустенита еутектоидног нелегираног челик (IRA – дијаграм)</i>	<i>23</i>
3.2 Дијаграми континуалног разлагања аустенита (АРА, КН)	23
4. ПРОБЛЕМИ ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ И ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ	25
4.1 Појам заварљивости	25
4.2 Проблеми у заваривању челика повишене јачине	27
4.3 Проблеми при заваривању Q+T челика повишене јачине	29
4.4 Методе за испитивање заварљивости челика повишене јачине	30
4.5 Процена заварљивости на основу КНЗ дијаграма	30
5. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	31
5.1 Проблеми заварљивости С- Мп челика	31
5.2 Проблеми заварљивости микролегираних челика	32
5.3 Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине	33
5.3.1 Бејнитни челици	33
5.3.2 Нисколегирани побољшани челици (Q+T)	33

6. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА S690QL И ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА НА ОСНОВУ KHZ ДИЈАГРАМА	35
6.1 Добијање челика S690QL.....	35
6.2 Избор најповољније технологије заваривања челика S690QL на основу КН дијаграма	38
6.2.1 Избор технологије заваривања.....	38
6.2.2 Технолошки поступак РЕЛ заваривања	38
6.2.3 Технолошки поступак МАГ заваривања.....	39
6.2.4 Технологија и параметри РЕЛ/ МАГ заваривања	39
6.2.5 Теоријско одређивање заварљивости челика S690QL на основу КН дијаграма	41
7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА И КОНТРОЛА ЗАВАРЕНОГ СПОЈА	46
7.1 Експериментална испитивања основног материјала.....	46
7.1.1 Испитивање затезањем	46
7.1.2 Мерење тврдоће.....	47
7.1.3 Испитивање микроструктуре	48
7.2 Контрола завареног споја.....	48
7.2.1 Визуелна контрола	50
7.2.2 Испитивање пенетратима	50
7.2.3 Испитивање херметичности (непропустљивости)	51
7.2.4 Магнетна испитивања	51
7.2.5 Радиографска испитивања.....	53
7.2.6 Ултразвучно испитивање.....	53
8. ЗАКЉУЧАК	55
ЛИТЕРАТУРА	56

Увод

У савременој индустријској производњи, заваривање и заварене конструкције заузимају све важније место. То је, с једне стране, заслуга развоја заваривања као веома значајне производне технологије, а с друге стране и масовног развоја челика предвиђених за заваривање од којих се израђују веома одговорне заварене конструкције.

При пројектовању, два најважнија захтева за успешно изведену конструкцију су: функционалност и сигурност у условима експлоатације. Зато данас, поред чврстоће (јачине) као основног параметра при пројектовању, мора се узети у обзир и опасност од кртог лома која у великој мери зависи од заварених спојева. Међутим, стандардизована правила прикривају потребу за тим захтевима јер се материјали углавном бирају само на основу њихове чврстоће, са основном претпоставком да ће у систему доћи само до еластичних деформација. На тај начин стварна опасност од лома конструкције зависи од материјала у околини подручја концентрације напона, било да је у питању прекомерна деформација, лом од замора, крти лом или оштећење изазвано пузањем.

С обзиром на све горе наведено, јасно је да локалне особине завареног споја и количина присутних грешака представљају два основна фактора за поузданост конструкције. Из тих разлога веома је битно да буде остварена врло добра заварљивост изабраног основног материјала како би се добили спојеви повољних особина. Све то упућује на потребу да се познају својства раличитих врста челика који су намењени за израду одговорних заварених конструкција и особености њиховог заваривања, као и својства самих заварених спојева. Треба упознати различите околности у којима могу настати грешке металуршког, технолошког или конструкционог карактера и начине да се такве грешке избегну контролом састава примарно произведеног челика и поступка заваривања. Притом, треба размотрити и могуће проблеме у експлоатацији као што су прекомерна деформација, крти лом, замор, пузање и корозија. Из тих разлога, треба посебно обратити пажњу на неке важне утицаје који при избору челика морају бити анализирани и указати на различите проблеме на које се може наићи, а како би они били сагледани још у фази конструисања [3].

Развој нових материјала и технологија иде у смеру оптимизације конструкционо-технолошких решења у погледу побољшања функционалних особина машина, уређаја и конструкција, уз смањење њихове тежине, побољшања технологичности, повећања продуктивности, продужења радног века конструкције, снижења трошкова производње и експлоатације.

У ово доба је дефинисан широк асортиман конструкционих (инжењерских) материјала који се могу употребити за израду различитих делова машина и уређаја у разним врстама и индустријским сферама. У техничкој пракси, уместо чистих метала се углавном користе легуре које су вишекомпонентног састава што значи да поред основног метала садрже и друге састојке (метале и неметале). Чак ни тзв. чисти метали уобичајеног квалитета се не могу сматрати за системе са једном компонентом јер садрже мању или већу количину нежељених примеса (нечистоћа).

У техници се највише, као конструкциони материјали, користе челици и ливена гвожђа тј. легуре гвожђа и угљеника, затим легуре обојених метала (алуминијума, бакра и сл.) а у новије време и легуре титана, уз напомену да су легуре на бази гвожђа и данас најпримењиваније у техничкој пракси. Од целокупне светске производње метала њихов удео је око 95%.

Такође, технологија заваривања или наука о вештини заваривања је најмлађа грана машинске технологије. Њен нагли развој настао је крајем XIX и почетком XX века када је почела примена горивих гасова и електричног лука као топлотних извора. Од тада се ова технологија непрекидно развија захваљујући примени нових достигнућа како у фундаменталним наукама и рачунској техници, роботизици и другим дисциплинама. Иако на први поглед изгледа да успех заваривачких радова зависи првенствено од вештине и искуства заваривача, тачније да је то само рутински посао, у стварности се технологија заваривања не заснива само на томе већ и на одређеним научним концептима које морају познавати првенствено инжењери и технолози, а у извесној мери и заваривачи.

Приликом израде одговорних машинских конструкција класични угљенични конструкциони челици нису у потпуности могли да задовоље захтеве савременог пројектовања, како због квалитета, тако и из економског аспекта. Ово се посебно односи на израду конструкција великих димензија, при раду на повишеним или сниженим температурама, повећаним радним притисцима и сл. Ти захтеви савремене индустрије довели су до развоја нових врста челика повишене јачине који су доста бољи од угљеничних. У раду су дате њихове основне карактеристике, могућности примене и предности над применом у одговарајућим конструкционим решењима у односу на класичне материјале, тј. конструкционе челике опште намене [4].

Челици повишене јачине потискују многе до сада коришћене конструкционе челике захваљујући оптималној комбинацији механичких карактеристика, заварљивости и цене, што је постигнуто пажљивим избором хемијског састава и контролисаном примарном прерадом.

Сврха развоја ових челика је постизање вишег напона течења и више затезне чврстоће, а тиме и више допуштеног оптерећења у раду. Применом ових челика смањују се носећи пресеци код једнаких оптерећења, тј. смањује се маса и запремина конструкције. Надаље је задржан повољан однос R_e/R_m тако да у случају преоптерећења раније долази до пластичне деформације него до лома. Додавањем малих количина легирајућих елемената Ti, V и Nb, стварају се се фино распоређени карбиди, нитриди и карбонитриди који не допуштају раст аустенитног зрна.

У оквиру овог рада дат је преглед врста челика повишене јачине, и начини добијања неколико врста типова челика. Указано је и на могућност повећања напона течења, као и на утицај легирајућих елемената на структурне преображаје као и на проблеме око заварљивости ових челика. Посебна пажња је посвећена оцени заварљивости ове врсте челика на основу трансформационих (КН) дијаграма.

1. ПРЕГЛЕД ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Ови челици се интензивно развијају у последњих тридесетак година и користе се за израду одговорних конструкција које раде у посебним условима оптерећења попут делова транспортних и дизаличних конструкција, мостова, процесне опреме, цевовода итд., а у циљу смањења тежине конструкција, побољшања експлоатационих карактеристика, продужења радног века, побољшања технолошких особина материјала и снижења трошкова израде и експлоатације.

Захваљујући микролегирајућим елементима, који омогућавају добијање финозрне структуре у процесу ливења и специфичном процесу израде у ваљаницама уз ливење у топлом стању, уз термичку обраду челика и висок степен деформације у току прераде добијају се повишене механичке особине и отпорност на деформације и хабање, уз обезбеђење добрих технолошких особина. На овај начин добијени су материјали повишене чврстоће који имају високе механичке особине и на ниским температурама, као и повишену отпорност на деформације и хабање.

Карактеристично за ове челике је да се у односу на угљеничне одликују повећаним својствима јачине и поред ниског садржаја угљеника ($C < 0.22\%$). Повећање јачине резултат је позитивног дејства малих количина легирајућих елемената који не погоршавају заварљивост, за разлику од угљеничних челика код којих повећан садржај угљеника утиче на пораст својства јачине али погоршава заварљивост. Технологија микролегирања омогућила је производњу нове врсте челика, који су у ствари конвенционални угљенични челици са минималним додацима легирајућих елемената (мање од 0.50%), у циљу повећања напона течења, јачине на кидање и тврдоће [3].

Челици повишене јачине поседују: повишену затезну чврстоћу (јачину), издужење и жилавост, а ове особине задржавају и на сниженим температурама. уз одличан однос тежине и цене, па су с тога изузетно погодни за индустријску примену. Ови челици се прихваћени као општи конструкциони материјал, посебно када је реч о одговорним завареним конструкцијама.

Челици повишене јачине се не сматрају легираним челицима, иако се њихова посебна механичка својства постижу додавањем малих количина легирајућих елемената. Због тога су ови челици сврстани у посебну групу челика која је слична ваљаним средњеугљеничним челицима са побољшаним механичким својствима додавањем малих количина легирајућих елемената. Издвајање у посебну групу је оправдано и због тога што је цена ових челика ближа цени угљеничних челика него цени легираних челика. Повећање својстава отпорности ових челика остварује се као резултат разних механизма ојачања и преципитације: металуршки-повољном комбинацијом и садржајем легирајућих елемената, термомеханичком обрадом или комбиновано.

1.1 Врсте челика повишене јачине

Главно мерило при избору основног материјала за металне заварене конструкције је да материјал буде што јефтинији, а да притом задовољи тражена механичка својства. Тако од избора одговарајућег материјала у великој мери зависи успех израде заварене конструкције. У највећем броју случајева за израду заварених конструкција користе се угљенични и легирани челици, а у последње време челици повишене јачине. Економичност примене челика у металним конструкцијама произлази управо из могућности коришћења, обликовања и прераде готових основних конструкцијских елемената. Како је производња челика напредовала, конструктор данас има на располагању више врста те могућности избора економски најповољнијег, а квалитетом довољно доброг челика. Такође, постоје класификације конструкција и делова с обзиром на опасност коју би представљао лом конструкције. Ово говори у прилог томе да не мора цела конструкција бити направљена од квалитетног и скупог материјала, већ се мање одговорни делови могу направити и од јефтинијег материјала.

Основни циљ при избору основног материјала за металне заварене конструкције је да материјал задовољи сва тражена механичка својства а да притом буде што јефтинији. Економичност примене ових челика у металним конструкцијама произлази управо из чињенице да они испуњавају све те услове. Челици повишене јачине се у великој мери данас користе за одговорне конструкције. Њихова предност је у релативно ниској цени, повољним механичко-металуршким својствима, мањој маси и тежини, побољшаној заварљивости итд. У челике ове класе сврставају се сви челици са напоном течења већим од 360 МПа.

Челици повишене јачине се деле на:

- Опште конструкционе челике, укључујући и C-Mn челике (SRPS EN 10025: 20031) ;
- Финозрне микролегиране челике (SRPS C.B0.5022).

Као основа за производњу челика повишене јачине користи се угљенични челик. Код ових челика главну улогу има угљеник. Он у челику може бити садржан у количинама од 0.03 до 2.11%. Доминантно утиче на особине челика, посебно на његову јачину и тврдоћу. Поред угљеника у угљеничним челицима се још налази и један број пратећих елемената као што су: $M < 0.8\%$, $Si < 0.6\%$ као и нечистоће $P < 0.04\%$, $S < 0.04\%$ и гасови O_2 , H_2 и N_2 . Угљеник се гвожђем гради интерстицијске чврсте растворе. Због таквог свог положаја у кристалној решетки он је ојачава и такође представља препреку кретању дислокација нпр. при затезању. Стога је потребно повећати силу потребну за његово разарање. Али, с друге стране, додавање угљеника неповољно утиче на заварљивост челика па се сматра да је челик заварљив при највећем садржају угљеника $C \leq 0.25\%$. При већем садржају угљеника од граничног, челик је склон закаљивању и појави хладних прслина у ЗУТ-у. Такође, повећање садржаја угљеника доводи и до немогућности обраде челика на топло што је резултат појаве лако топљивих и кртих еутектика које чине кртим и сам челик при температури од око 800°C и више, односно у зонама црвеног усијања. Та појава се назива кртост при црвеном усијању. Сви ови недостаци, временом су довели до истраживања да се начин производње и сам састав челика промене како би се и његова својства побољшала а да се притом не повећа цена.

У даљем тексту детаљније ће бити описани челици повишене јачине по врстама као и физичко-металуршке основе развоја челика повишене јачине [1].

1.1.1 Угљенични челици

Челици код којих одлучујући утицај на структуру и својства има садржај угљеника називају се угљенични (нелегирани) челици. Поред гвожђа, као основне компоненте (фазе), чији садржај се може мењати од 97.0 до 99.5%, и угљеника ($C=0.003\div 2.11\%$), који је такође компонента у челику, јер доминантно утиче на особине челика, ови челици садрже и један број сталних пратећих елемената као што су: $Mn<0.8\%$, $Si<0.6\%$, и нечистоће фосфор и сумпор ($P<0.04\%$, $S<0.04\%$), као и гасове O_2 , H_2 , N_2 .

Угљеник се у челицима, у ограниченој количини, налази у интерстицијском чврстом раствору α -гвожђа, а већим делом у облику карбида гвожђа. Због таквог свог положаја у кристалној решетки, он у току њене деформације, која је нпр. последица дејства спољашњег напрезања, представља препреку кретању дислокација. У циљу савлађивање ових препрека, потребно је повећати спољашње напрезање. Како је доминантна улога растворених атома угљеника, овај механизам се назива растварајуће ојачавање. Повећање садржаја угљеника у челику доводи до повећања чврстоће, тако да је додавање угљеника челику била једна од првих метода за повећање његове јачине (чврстине). Међутим, пораст јачине само преко садржаја угљеника је ограничен због ризика од настанка хладних прелина услед закаљивања у подручју ЗУТ-а завареног споја. С тим у вези, сматра се да челици са садржајем $C<0.25\%$ нису склони закаљивању.

Структура ових челика углавном је зависила од садржаја угљеника и била ја углавном феритна, феритно-перлитна, а веома ретко бејнитна. Због ниског нивоа технологије добијања и прераде, примена ових челика била је везана за присуство нечистоћа S и P које се нису могле успешно одстранити при производњи челика. Сумпор доспева у метал из руда, а такође и из гасова пећи (као продукт сагоревања горива јавља се CO_2). Сумпор се не раствара у гвожђу и било која његова количина образује са гвожђем једињење познато под називом гвожђе-сулфид (FeS), које се топи на око $1200^\circ C$ и излучује се у виду еутектика, који се у облику танког филма распоређује по границама зрна. Температура топљења еутектикума је од $975\div 985^\circ C$ [3].

Присуство лако топљивих и кртих еутектикума, чини челик кртим при $800^\circ C$ и више, тј. у области температура црвеног усијања. Појава носи назив кртост при црвеном усијању. Услед кртости при црвеном усијању, челик са повећаним садржајем сумпора се не може обрађивати пластичном прерадом на топло. Као и сумпор, фосфор слаби механичке особине челика и изазива хладни лом. Он у челику ствара фосфиде који су делимично растворљиви у фериту. Растварајући се у фериту, фосфор оштро повећава температуру прелаза у крто стање. Фосфор је склон према ликвацији коју повећава угљеник. При томе настају лакотопљиве еутектике које снижавају чврстину (јачину) метала шава. Повећање садржаја угљеника у челику доводи до повећања јачине (чврстоће), а са друге стране доводи до повећања кртости челика, тј. смањења жилавости и пораста температуре преласка челика из жилавог у крто стање, погоршање заварљивости и безначајан утицај на смањење тежине конструкције.

1.1.2 C-Mn челици

За конструкције које захтевају повећане механичке особине, захтев боље жилавости може да испуни само челик са нижим садржајем угљеника. Да би конструкција у оваквим условима имала потребну носивост, морали би да се користе већи попречни пресеци, при чему би конструкција значајно добила на тежини. Превазилажење наведених проблема било је могуће тек развојем нове врсте C-Mn челика (ситнозрни феритно-перлитни челици са повећаним садржајем мангана) [3].

Међу првим методама повећања својства чврстоће применом микролегирања почело је повећањем садржаја мангана код нискоугљеничних челика. Улога мангана у челику је двојака: утиче на ојачање и регулише контролу сумпорних укључака. Манган није био замена за угљеник јер он у челику гради супституцијски, а не интерстицијски чврсти раствор. Ефекат ојачавања чврстих раствора пре свега зависи од разлике у величини атома. Како су Fe и Mn суседни елементи у периодном систему, ефекат ојачавања чврстог раствора услед присуства мангана и није нарочито изражен. Уобичајено присуство мангана у челицима је у границама од 1.4 до 1.7% [3].

MnS (манган сулфид) се топи на температури $\approx 1620^{\circ}\text{C}$. Сумпор је обично присутан у гвожђу у виду сулфида гвожђа, који на високим температурама са гвожђем образује еутектику ниске тачке топљења. Оне се распростиру по границама металних зрна док су још у течном стању, и током хлађења очвршћавају у крти филм. Тиме се објашњава чињеница да се челик са течним филмом по границама зрна не може прерађивати на високим температурама, јер постаје крт кад се охлади [3].

Услед великог афинитета Mn и S, најједноставнији начин за потпуно везивање сумпора је додатак довољне количине мангана у челику. Манган се лакше једини са сумпором, стварајући једињење MnS високе тачке топљења који није у течном стању при топлој преради челика и због тога има незнатан утицај на жилавост коначног производа, јер је равномерније распоређен у челику. Ова улога Mn омогућила је да се знатно повећа жилавост у конструкционим челицима. У току даље прераде MnS се или издужује (ваљањем) или ломи и ситни (ковањем). Присуство великих издужених MnS укључака, у ваљаним производима није пожељно, јер може лако довести до тзв. ламеларног цепања. У новије време, да би се овај проблем елиминисао, у току израде челика додаје се мала количина калцијума (Ca), око 0.0040%. Калцијум служи као модификатор облика MnS, омогућавајући да се створи укључак сферног облика, који је недеформабилан, те не мења свој облик у току било које даље прераде. Само увођење калцијума, постојећим квалитетима челика, повећава жилавост и до 40% [3].

1.1.3 Умирени челици

У циљу смањења садржаја кисеоника у челику, као последица његовог нестехиометријског довођења у току израде челика, у завршној фази топљења или у ливачком лонцу додају се дезоксидациона средства. У ту групу спадају елементи који имају већи афинитет према кисеонику него гвожђе. Најчешће су коришћени Al и Si, у количини која се одређује на основу последње хемијске анализе у току производње челика, на проби из међулонаца. На овај начин добија се нова врста челика, такозвани умирени челици ($\text{Si}+\text{Al}\approx 0.2\%$). Назив су добили по понашању у току ливења. Пошто

више није било слободног кисеоника, није долазило до оксидације преосталог угљеника и издвајања гасовитих продуката CO, површина ја била мирна и нису се запажали мехурићи. Посебно је повољна дезоксидација помоћу Al, јер је уочено да је у неким Al–умиреним челицима дошло до таложења укључака алуминијумнитрида по границама зрна, који блокирају даљи раст металних зрна. Ово се односи на челике у којима је Al додат у великој количини и који су имали висок садржај азота.

Умирени челици одликују се уједначеном структуром и равномерним хемијским саставом и повољним механичким особинама. Све то доводи до пораста динамичке издржљивости, бољих особина на ниским температурама, боље заварљивости и термичке обрадивости.

1.1.4 Микролегирани челици

Микролегирани челици развијени су на бази C-Mn челика, јер су нова истраживања имала за циљ проналажење нових елемената који би у челику могли да замене утицај Al. Тако су развијени потпуно нови до тада непознати челици, легирани са једним или више легирајућих елемената Nb, Ti, V, Zr, B и слично, који се називају "микролегирани челици". Уобичајени садржај угљеника је од 0.03 до 0.12%, а у челицима раније производње и до 0.2%, чиме се задржава добра заварљивост [3].

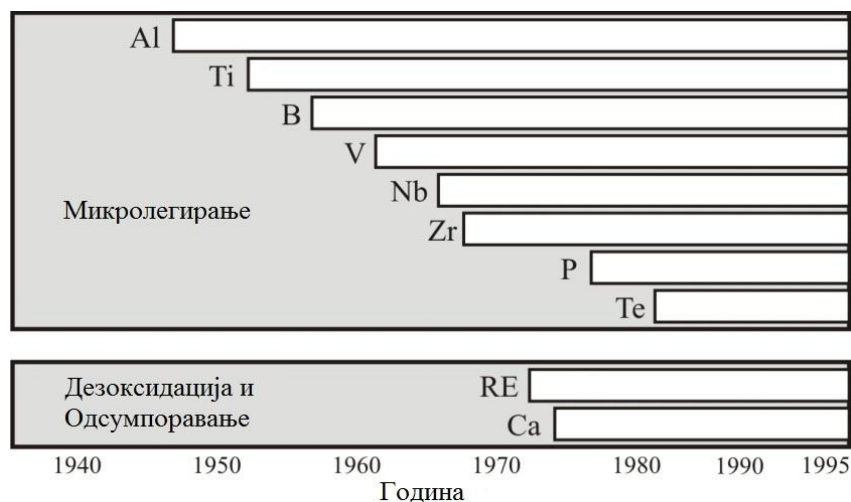
Развој и примена микролегираних челика везује се за почетак шездесетих година прошлог века. С обзиром на чињеницу да су нове конструкције морале да задовоље нове критеријуме у погледу примене материјала, акценат је стављен на нове челике који могу да испуне следеће захтеве: повећање јачине, могућност извођења разноврсних термомеханичких обрада, добру заварљивост и др [3].

Повишен напон течења ових челика, омогућавао је израду лакших конструкција, тако да су се ови челици употребљавали за израду: мостова, цевовода високог притиска, судова под притиском, елемената друмских возила, железничких вагона, индустријских хала и др. Основна карактеристика микролегираних челика је да додавањем малих количина легирајућих елемената долази до интензивног смањења зрна (ситнозрнаста структура) као и ефеката таложног ојачавања, услед издвајања стабилних честица карбида, нитрида и карбонитрида. Наиме, излучени карбиди, нитриди односно карбонитриди, делују као допунски центри кристализације. Укупна количина легирајућих елемената, најчешће ниобијума, ванадијума и титана у микролегираним челицима не прелази 0.15% [3].

После топле пластичне прераде структура микролегираних челика је ситнозрна и састоји се од феритних (α) зрна, хомогених по облику. Присутна је и мала количина цементита (због чега и ове челике називају нископерлитни), као и финих диспергованих честица карбонитрида, који се могу идентификовати на електронском микроскопу [3].

У току завршног ваљања долази до појаве великог броја преферентних места, на којима је доминантна појава α -фазе при хлађењу челика испод A_{c3} температуре. Клице (нуклеуси) се у челику појављују на местима на којима је у већој мери нарушена енергетска баријера (дислокације, границе зрна и субзрна, двојници, деформационе траке и тсл.). Укупан број преферентних места је директна последица примењеног

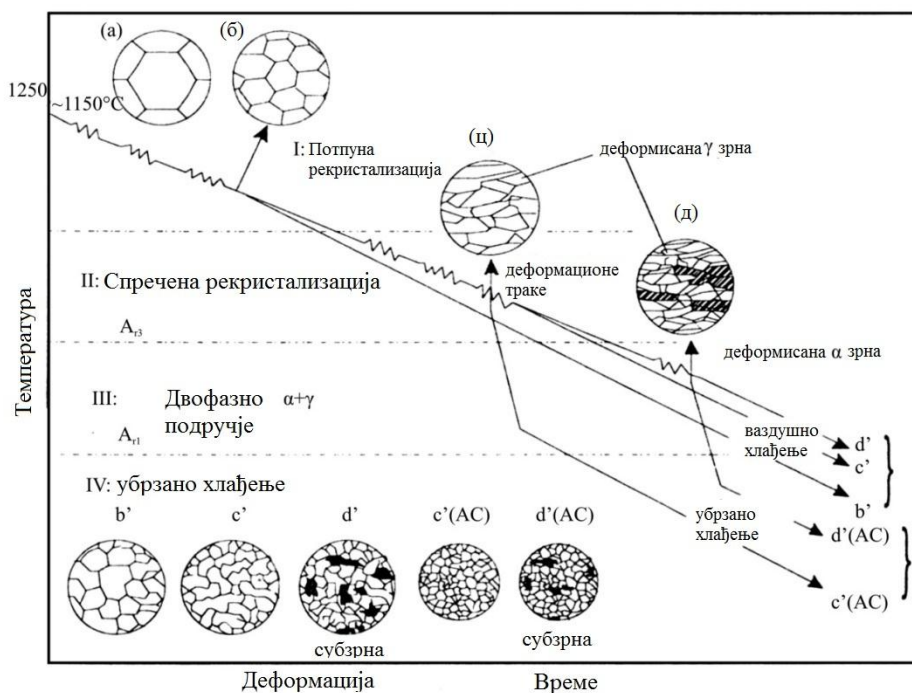
поступка прераде и степена деформације. Пошто је реч о пластичној преради на повишеним температурама, у току прераде се одвијају и супротни процеси, процеси обнављања деформисане структуре, опорављања и рекристализације. Рекристализацијом се смањује густина дислокација, деформисана структура се замењује недеформисаном [3].



Слика 1.1 Хронолошки почеци примене појединих микролегирајућих елемената у челицима

1.1.5 ТМСП челици

ТМСП челици (Термо Механички Контролисано Прерађени челици). Карактеристично за ове челике је де се одликују такозваном "контролисаном микроструктуром". Добијање ових челика условљено је применом посебне технологије топле пластичне прераде, која се назива још и термомеханички контролисана прерада (Thermo–Mechanical Control Processeing-ТМСП) или само термомеханичка прерада. На слици 1.2 дат је шематски приказ термомеханичке прераде микролегираних челика. Постоји неколико технологија за добијање ових челика, а свака од њих узима у обзир хемијски састав и процесне параметре прераде (степен редукције на ваљаоничком стану, брзину деформације, температуру).

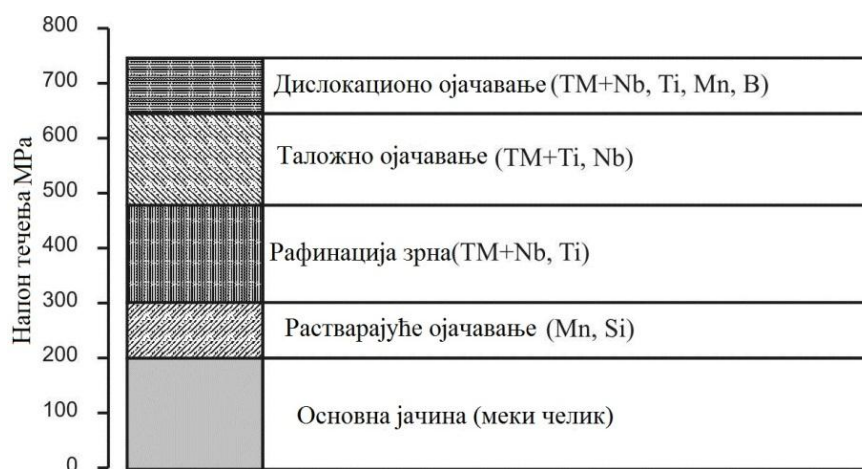


Слика 1.2 Схематски приказ термомеханичке прераде микролегираних челика

- Рекристализационо контролисано ваљање (Recrystallization Control–Rolling-RCR).** Комплетна топла пластична прерада челика код ове технологије одвија се у рекристализационом подручју, то јест у подручју изнад T_{NR} температуре (температура испод које је рекристализација непотпуна). У овом температурском подручју не долази до термичког таложења, те је статичка рекристализација између превлака потпуна. Почетна структура челика је грубозрна (слика 1.2а). После деформације (ваљања) структура се састоји од хомогених рекристалисаних зрна (слика 1.2б). Ова технологија се користи за прераду дебелих лимова, код којих није могуће применити класично контролисано ваљање, пошто ваљаонички станови не могу да издрже јако велики отпор деформацији, то јест притисак ваљања [3].
- Класично контролисано ваљање (Conventional Control–Rolling-CCR).** У овој технологији предваљање се изводи у температурском подручју у коме је рекристализација потпуна, док се завршно ваљање изводи на нижим температурама, то јест у температурском подручју у коме је рекристализација између провлака спречена. Механизам спречавања рекристализације може бити двојак: а) термичко таложење (дугачка пауза–реверзивно ваљање) и б) блокада граница услед присуства Nb и (или) V у чврстом раствору (кратке паузе–континуирано ваљање). По завршетку деформације (преваљање и завршно ваљање) рекристалисана структура се хлади до температурског подручја ($T_{NR}-A_{F3}$). По завршетку деформације структура се састоји од деформисаних γ зрна, унутар којих се запажају траке деформације (слика 1.2ц). Ове траке деформације представљају додатна места за настанак клица феритних зрна, па се на крају хлађења добија још финија структура него код RCR ваљања (слика 1.2д). Овом технологијом се најчешће израђују гасоводи у облику топловаљаних трака, дебљине до 14 mm (највише 18 mm), зависно од снаге [3].
- Ваљање у двофазном подручју (Two Phase Rolling = $\gamma+\alpha+R$).** Ова технологија је модификација CCR технологије. Разлика је само у томе што се у овој технологији завршно ваљање одвија делимично и у двофазном подручју. После завршетка

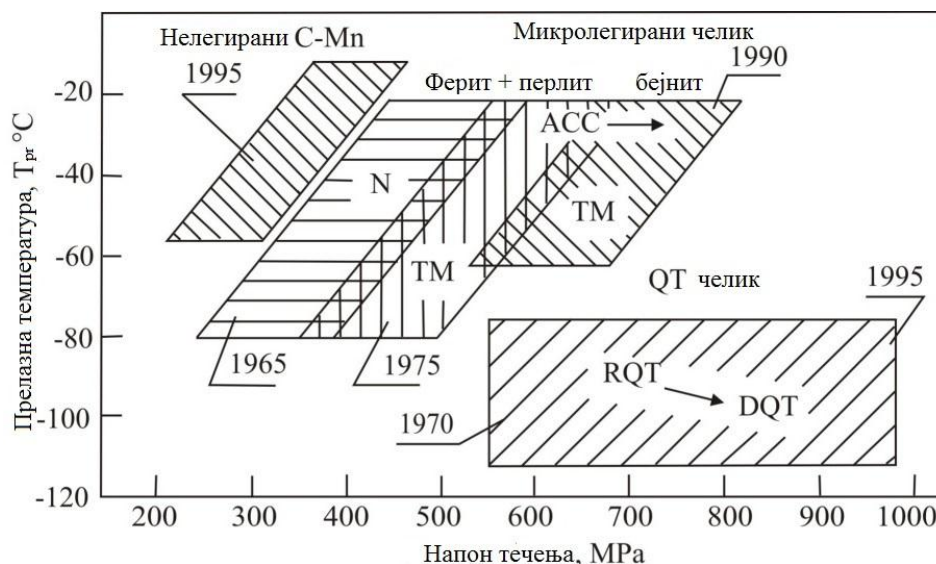
ваљања у структури се налазе деформисана аустенитна и феритна зрна (слика 1.2д). Завршно ваљање се изводи на релативно ниским температурама. Отпор деформацији је велики, те се ова технологија најчешће користи за прераду лимова мањих дебљина.

- *Динамичко рекристализационо контролисано ваљање (Dinamic Recrystallizaation Control Rolling = DRCR).* Основна карактеристика ове технологије прераде челика је такозвана динамичка рекристализација. Ово је још једна модификација CCR технологије која има за циљ да се деформације из провлака у провлак повећају толико, све док се укупна акумулирана деформација на завршној ваљаоничкој прузи не повећа до те мере да се достигне критични степен деформације потребан за динамичку рекристализацију. Динамичком рекристализацијом се постиже 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).* Код ове технологије контролисање микроструктуре челика постиже се путем контролисања брзине хлађења. Трака се деформише применом CCR или ($\gamma+\alpha R$) технологије, а затим се убрзано хлади до A_{r1} температуре. На овај начин, долази до издвајања одређене количине ферита на вишим температурама, а остатак преосталог аустенита богати угљеником и азотом, успоравајући даљу трансформацију. Тако 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 веомаfino феритно зрно и упоредо мартензит и бејнит.



Слика 1.3 Утицаји појединих механизма повећању напона течења термомеханички прерађеног бејнитног челика

На слици 1.3 приказан је утицај појединих механизма ојачавања порасту напона течења. На слици 1.4 приказани су утицаји појединих механизма на однос између напона течења и температуре преласка из жилавог у крто стање.



Слика 1.4 Однос напона течења и прелазне температуре кртости челика добијених различитим поступцима прераде: N – нормализација, TM – термомеханичка прерада, ACC – убрзано хлађење, QT – каљење и отпуштање

Добијање челика повишене јачине углавном се постиже специјалним поступцима термомеханичке прераде, па је потребно пратити све фазе прераде и фабрикације челика, од добијања челика до заваривања. Процес је познат под називом "Тотална термомеханички контролисана прерада" и састоји се у следећем:

- *Контрола чистоће челика.* На побољшање механичких својстава челика, пре свега жилавости основног материјала и ЗУТ-а, може се утицати преко чистоће челика. Према садашњем стању развоја индустрије могуће је произвести веома чист челик са укупним садржајем $N+O+S+P < (0.005\%)$ [3].
- *Контрола облика неметалних укључака (SSP–Sulphur Shape Control).* При производњи челика посебну пажњу треба посветити количини сумпора у челику. Присуство чак и веома ниског садржаја S до (0.001%) омогућава формирање MnS укључака у централној зони слаба. Ваљањем се ови укључци издужују у траке при чему смањују жилавост. Оштри крајеви траке понашају се као концентрисана напрезања. На штетно дејство укључака MnS може се утицати контролом њиховог раста, то јест превођењем тракастих издужених укључака у сферне, који нису деформабилни и не мењају се у току ваљања. Контролисање облика неметалних укључака заснива се на додатку Са или елемената ретких метала у количини око (0.004%) [3].
- *Контролисање микроструктуре ЗУТ-а.* Код уноса великих количина топлотне енергије, као при заваривању, у ЗУТ-у се уз границу топљења појављује прегрејана крупнозрна структура која има лоше механичке особине. Да би се овај ефекат спречио челицима се додаје Ti, у количини од око 0.015%, који омогућава таложење TiN на границама зрна и практично механички блокира њихов раст услед загревања [3].
- *Смањење централних сегрегација у слабу.* Слабови добијени континуалним ливењем карактеристични су по томе што се у њиховим унутрашњим зонама увек значајно повећава концентрација Mn, C, P и S, па су у овој зони погоршане све механичке особине. На интензитет сегрегација може се утицати на више начина: производњом чистијег челика, смањењем дебљине слоја, бржим хлађењем или комбинацијом ових поступака [3].

- *Температура предгревања слаба пре топлог ваљања.* Да би се у току термомеханичке прераде добило хомогено зрно, услов је да материјал после прегревања има униформну величину зрна. Температура прегревања у потисним пећима мора бити нижа од температуре на којој почиње раст зрна. Најједноставнији начин којим се спречава раст зрна, јесте већ поменути додатак Ti (од 0.015%) [3].
- *Контролисано ваљање.* Посебна пажња се посвећује захтеву да се предваљањем не дозволи раст зрна, па по завршетку предваљања челик задржи хомогену ситнозрну рекристалисану структуру, јер је она услов за добијање униформног ситног феритног зрна по извођењу завршног ваљања. У току завршног ваљања, већим степеном деформација по провлаку, настаје повећање густине деформисаних трака, које служе као додатна места нуклеације феритних зрна, па је као коначна, структура ситнозрнија [3].
- *Текстура.* У току завршног ваљања долази до усмеравања и формирања текстуре топлог ваљања која изазива анизотропију особина 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 [3].
- *Убрзано хлађење.* Убрзаним хлађењем се обезбеђује веће потхлађење и брзина стварања клица, што додатно доприноси смањењу феритног зрна. Једна од последица убрзаног хлађења је и изостајање јасно изражене границе течења због образовања бејнита [3].
- *Модификација контролисаног ваљања.* Најинтензивнија рафинација аустенитног зрна се постиже тзв. динамичком рекристализацијом, која је последица достизања критичног степена деформације при завршном ваљању. Ово је изводљиво само у 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 [3].

Тоталном термомеханички контролисаном прерадом, обезбеђује се снижени садржај угљеника, а тиме и нижа вредност еквивалента угљеника-СЕ, снижење укупне количине сумпора и формирање глобуларних сулфидних укључака, легирање са Ti и тако даље.

1.2 Нисколегирани челици повишене јачине

1.2.1 Бејнитни челици

Бејнитни челици представљају даљу етапу у развоју челика повишене јачине, у односу на микролегиране. Садржај угљеника је ограничен на 0.18%, при нешто повећаном садржају Mn и Si. Међутим, основни легирајући елементи су Мо (0.5%) и В ($\approx 0.003\%$). Испоручују се у нормализационо-жареном стању или нормализованом и отпуштеном стању. Присуство Мо у челику који садржи бор не утуче на механичке особине челика ако је садржај Мо мањи од 0.4%. При вишем садржају настаје знатно повећање затезне чврстоће (R_m) и напона течења (R_p), при чему значајније не опада ударна жилавост. Даље повећање садржаја бора (В) не доприноси никаквим предностима. Присуство Мо и В у наведеним количинама, омогућава да се добије

бејнитна структура и при веома малим брзинама хлађења (чак и при хлађењу на ваздуху). Додацима Mn и Cr снижава се температура бејнитне трансформације на $600 \div 300^\circ\text{C}$, чиме се постиже уситњавање металних зрна и већа дисперзија карбидних честица, што све доприноси повећању јачине. На тај се начин после нормализације може добити напон течења $R_p = 460 \div 600 \text{ MPa}$ по целом пресеку делова (дебљине до 100 mm).

Основни тип у овој класи бејнитних челика повишене јачине је енглески челик FORTYWELD. То је челик са напоном течења око 460 MPa направљен на поменутој комбинацији (Mo+V). Бејнитни челици имају доста висок напон течења, што их чини врло применљивим за различитије конструкције, као што су: дизалице, железничке платформе, транспортне цистерне, грађевинске машине, стубне дизалице и тсл. Не примењују се за конструкције које су при експлоатацији изложене ниским температурама.

При заваривању бејнитних челика, основни проблем представља могућност настанка (стварања) хладних прслина у металу шавова и ЗУТ-у, као и пад жилавости у ЗУТ-у. Овај проблем може се решити смањењем брзине хлађења после заваривања, што се постиже предгревањем или повећањем погонске енергије.

1.2.2 Нисколегирани побољшани челици (Q+T—quenching + tempering)

Већина челика израђена каљењем и отпуштањем (Q + T челици) су финозрни. То значи да се кале са температуре при којој су настала ситна аустенитна зрна која и после трансформације задржавају повољну величину. На тај начин се могу добити челични полупроизводи велике јачине, повољне жилавости и добре заварљивости.

Типичан пример челика ове групе је амерички челик T1 састава: 0.16% C, 0.9% Mn, 0.87% Ni, 0.5% Cr, 0.45% Mo, 0.06% V, 0.003% B. Посебно је значајан утицај бора (B) јер он доводи до уситњавања примарних зрна, дезоксидације и денитрирања металног купатила, као и до великог повећања прокаљивости.

Каљење и отпуштање ових челика се изводи у скупној и специјалној технолошкој опреми. Каљење се изводи млазевима текуће воде са температуре око 900°C до температуре од око 300°C директно после топлог ваљања или се лимови/плоче после ваљања хладе до температуре околине а онда накнадно загревају ради каљења. После тога се изводи отпуштање у проточним пећима на температурама од $500 \div 700^\circ\text{C}$, са задржавањем од 1 h , а затим хлађењем на ваздуху. У зависности од режима отпуштања могу се добити различита механичка својства челика. Тако се на температури отпуштања од 500°C добија тврдоћа од 350 HV , напон течења $R_{p0.2} = 490 \text{ MPa}$ и жилавост $KV = 3.5 \text{ J}$, док се при температури отпуштања од 700°C постиже 230 HV , $R_{p0.2} = 320 \text{ MPa}$ и жилавост од 11 J . Из ових података се уочава да режим отпуштања може побољшати својства деформбилности и дуктилности челика на рачун његове јачине и тврдоће.

При каљењу припремак мора бити поуздано учвршћен између јаких чељусти или вођен између ваљака да се због брзог хлађења не би деформисао. Температура каљења је увек око A_{c3} (912°C), када је челик потпуно у аустенитном подручју. Термички побољшани челици употребљавају се за дизалице, мостове, резервоаре за горива, бродску опрему и сл. У табели 1.1 су дати карактеристични примери челика

повишене јачине из свих претходно наведених група, са механичким особинама и ознакама у домаћим и иностраним стандардима.

Таблица 1.1 Високовредни конструкциони челици

Врста челика		JUS – SRPS	PN	DIN	GOST	Механичке особине			
						R _m , МПа	R _{eH} , МПа	A, %	KV, J
Угљенично - мангански		Č0563	18G2A	St 523	15Г	510÷680	315-355	min 16-18	min 27
Микролегирани финозрни		ČRV500	18G2AV	St E 47	16Г2АФ	610÷770	470-500	min 16	37-41
Ниско- легирани	Бејнитни	-	15HNMBА	-	14Х2ГМР	740÷980	620-690	min 15	-
	Побољш.	-	14HNMBCu	St E 70	15ГСМФР	780÷930	630-690	min 15	-

2. НАЧИНИ ЗА ПОВЕЋАЊЕ НАПОНА ТЕЧЕЊА

Приликом пројектовања челичних конструкција присутан је стални захтев да се оне изведу уз што мањи утрошак материјала а да се притом не угрози општа и локална сигурност конструкције. Смањење тежине заварене конструкције значи истовремено и смањење времена заваривања и смањени утрошак скупљег додатног материјала. Како је конструисање још базирано на јачини (чврстоћи), као основни параметар за пројектовање се углавном користи напон течења. За повећање овог параметра као најбитнијег могу се користити различити системи легирања и различите технолошке и металуршке мере.

Пластична деформација челика се заснива на процесима који се одвијају померањем дислокација кретањем кристалографски повољно оријентисаних равни. Према теорији дислокација постоје два начина за повећање напона течења метала:

1. *Добијање метала идеалне металне структуре.* Овај начин је само теоретског значаја јер је добијање метала са идеалном структуром немогуће остварити код већих делова а и економски није исплативо.

2. *Ометање кретања дислокација.* Овај начин повећања напона течења даје мање повећање него први али ипак представља основу развоја челика повишене јачине. Кретање дислокација треба онемогућити али тако да кретање неких ипак буде могуће, да би се обезбедила довољна истегљивост.

2.1 Технолошки поступци повећања напона течења

2.1.1 Прерада на хладно

Обликовање на хладно се дефинише као поступак обраде метала на температурама нижим од температуре на којој се изводи рекристализација (око 550°C за челик). Ако метал оптеретимо до његовог напона течења тада, после уклањања оптерећења, у металу неће доћи до промена јер су остварене деформације еластичне природе. Међутим, уколико оптерећење надмаши напон течења, тада ће у металу доћи до промена услед пластичне деформације. При поновном оптерећивању метала његова својства пластичности опадају али расте напон течења. Да би дошло до пластичне деформације треба применити већу силу, што значи да је метал јачи (чвршћи). Гледано на нивоу кристалне решетке, под дејством напона у зони пластичности ($\sigma > R_{p0.2}$) настаје клизање у повољно оријентисаним равнима што доводи до образовања дислокација и њиховог нагомилавања. Са порастом оптерећења расте њихово нагомилавање и укрштање што даље отежава клизање.

Ојачавање метала под дејством пластичне деформације назива се *деформационо ојачање метала*, а такав метал је познат под називом *деформационо ојачан метал*. При обликовању на хладно мењају се чврстоћа и жилавост и настају последице које се не могу уклонити отпуштањем напона. Овај поступак има веома широку индустријску примену (танки лимови, жице, профили и др.). Такви облици производа израђују се у железарама ваљањем, искивањем, пресовањем и вучењем у хладном стању.

2.1.2 Прерада на топло

Обликовање на топло укључује операцију локалног подешавања и исправљања на температурама које надмашују максималну допуштену температуру за отпуштање напона (око 700°C). Загревање се прецизно контролише у свакој операцији. У случају нормализованих челика, са гледишта опасности од прекомерног пораста зрна, температура радног комада за време обликовања не сме бити виша од 1050°C , а процес не сме дуго да траје. Ако се обликовање изводи у само једној операцији радни комад се не сме загревати изнад 980°C . Уколико се захтева накнадна термичка обрада, обликовање мора да се заврши изнад 750°C . У случају обликовања када процес траје дуго на температурама од $1000 \div 1050^{\circ}\text{C}$, и када је укрупњавање зрна неизбежно, пре последњег степена обликовања, неопходно је хлађење на мирном ваздуху на температури нижој од 700°C , да би дошло до трансформације аустенита. Да би обезбедили одређене механичке особине, температура обликовања мора да буде 1050°C а у зависности од дебљине зида зависи и брзина хлађења. Уколико се не могу искористити горе наведене препоруке, потребно је на крају процеса извршити нормализацију коју прописује произвођач.

2.2 Металуршки поступци повећања напона течења

Неки од основних утицаја који повећавају овај напон су:

а) **Структура челика** која може бити: феритно – перлитна, бејнитна, мартензитна или сорбитна. Ојачавање чврстог раствора ферита ($\alpha\text{-Fe}$) постиже се пре свега легирањем са Mn и Si. Садржај мангана се обично креће од $1.5 \div 2\%$ а садржај силицијума око 0.5% . Атоми легирајућих елемената растворених у фериту због различитих пречника или металних веза, деформишу кристалну решетку гвожђа и на тај начин се ојачање изводи. Ово ојачање је релативно слабо.

б) **Интерстицијско и супституцијско ојачање.** Сви легирајући елементи и пратиоци који су присутни у челику образују са гвожђем чврсте растворе. У односу на чисто гвожђе сваки чврст раствор гвожђа има виши напон течења. Елементи који се растварају у гвожђу могу образовати интерстицијски чврст раствор са елементима C, N и B или супституцијски са Mn, Si, Cr, Ni, Cu,... Утицај супституцијских легирајућих елемената Mn и Si је занемарљив у челицима који имају велике количине интерстицијски растворених елемената као што су C и N. Ови елементи ојачавају ферит више него супституцијски, али Mn и Si истовремено повећавају прелазну температуру односно температуру наглог пада ударне жилавости и погоршавају заварљивост. Такође, садржај угљеника у челику сразмерно утиче на његову јачину али се код челика повишене јачине ограничава на 0.22% због тога што при већим садржајима угљеника челик постаје склон ка закаљивању.

Остали утицаји на повећање напона течења су величина зрна и субзрна, која утиче на затезну чврстоћу материјала али је тај утицај мањи него на напон течења па стога са уситњавањем зрна расте однос $R_{p0.2}/R_m$, и таложно ојачање односно ојачање честицама. Овај поступак се користи код нежелезних легура мада се користи и код челика.

2.3 Утицај хемијских елемената који улазе у састав легура на промене структура челика

У челицима повишене јачине могу се наћи различити хемијски елементи, било као нечистоће, редовни пратиоци, или као намерно додати елементи. При томе, степен утицаја сваког од елемената на структуру и механичке особине челика не зависи само од количине већ и од присуства других елемената у њему. Према утицају на структуру челика легирајући елементи се деле на две основне групе:

- аустенизаторе или γ – гене елементе (Ni, Mn, C, N, Cu и др.) и
- феризаторе или α – гене елементе (Si, Al, Mo, Cr, Ti, Nb, W, V и др.).

У даљем тексту биће дат преглед појединих хемијских елемената који утичу на структурне промене.

Угљеник (C) највише утиче на особине и структуру челика и сматра се за компоненту у челику. Повећава јачину, тврдоћу, отпорност на хабање, прокаљивост али снижава пластичност и жилавост и погоршава заварљивост. Угљенични и нисколегирани челици са $C > (0.2 \div 0.25\%)$ се сматрају условно заварљивим. У легираним челицима угљеник образује карбиде, који се издвајају по границама зрна, што у аустенитним Cr–Ni челицима ствара услове за међукристалну корозију. У циљу елиминисања те појаве додају се Ti и Nb који делују као стабилизатори. Они везују угљеник у виду стабилних карбида TiC и NbC и тиме спречавају међукристалну корозију. Такође, установљено је да пораст садржаја C и N у челику (у дозвољеним границама) доприноси одржавању својстава отпорности на високим температурама тј. термопостојаности [8].

Азот (N) слично угљенику повећава јачину челика на собној и повишеним температурама. Предност му је што се хемијски не везује за хром, па код Cr–Ni челика не умањује корозиону отпорност. Неповољно је што смањује пластичност а тиме и отежава прераду на хладно.

Манган (Mn) се због великог афинитета према кисеонику и сумпору употребљава као дезоксидатор. Раствара се у решетки α -Fe и незнатно утиче на затезну чврстоћу и смањује својства деформације али повећава његову тврдоћу и жилавост. У угљеничним и нисколегираним челицима повећава отпорност заварених спојева ка топлим прслинама јер образује стабилан сулфид са сумпором (MnS) који је високе температуре топљења ($\approx 1620^\circ\text{C}$). Тако манган везује сумпор и не дозвољава му да са гвожђем гради нискотопљиву еутектику Fe-FeS а тиме смањује могућност за настанак врућих прслина. Повећањем садржаја Mn у нискоугљеничним и нисколегираним челицима до 1.5% повећава се јачина и жилавост уз одржавање добре пластичности али опада величина феритног зрна при већим количинама.

Силицијум (Si) се раствара супституцијски у решетки α -Fe и повећава затезну чврстоћу и тврдоћу а нарочито границу еластичности, па се стога користи код челика за опруге. Додавањем силицијума смањује се жилавост јер долази до стварања плочастог ферита а то смањује енергију удара потребну за лом. У већим количинама се додаје челицима од којих се захтевају већа електрична и магнетна својства. У аустенитним челицима се користи као дезоксидатор јер спречава оксидацију хрома.

Силицијум не подлеже сегрегацији и отежава сегрегацију неких састојака као сумпора и фосфора. Смањује критичну брзину хлађења и повећава прокаљивост [8].

Хром (Cr) се у нискоугљеничним челицима обично налази у количинама око 0.3%, у легираним челицима 0.7÷3.5%, у хромовим челицима 12÷18% и у хром- никл челицима 9÷35%. Повишен садржај хрома у угљеничним и нисколегираним челицима погоршава њихову заварљивост на рачун побољшања прокаљивости. Хром повећава ватроотпорност аустенитних челика у оксидационим условима. При садржају хрома већем од 12% челик је веома отпоран на корозију. Даљим повећањем садржаја хрома та отпорност и даље расте али при садржају Cr > 20% видно опада пластичност. Хром образује веома стабилне карбиде Cr₂₃C₆, Cr₇C₃, Cr₃C₂, који се у челику могу налазити у слободном стању или везани са карбидом гвожђа Fe₃C. Ако челик садржи више угљеника него што је потребно за образовање перлита онда настају услови за образовање слободних карбида хрома. Они се издвајају на границама зрна што може изазвати међукристалну корозију. Критична температура издвајања карбида је 500÷800°C. Хром изазива померање критичне температуре A_{C1} на горе што доводи до тога да брзина растварања карбида у аустениту буде знатно мања од брзине растварања карбида гвожђа у угљеничним челицима. Због тога се при загревању челика који садрже преко 12% хрома, изнад 1000°C и брзом хлађењу, ствара мартензитна структура а при веома спором хлађењу перлит са раствореним карбидима. Са порастом садржаја хрома смањује се термичка проводност што захтева предострожност при загревању челика, нпр. при преради на топло, термичкој обради или заваривању.

Волфрам (W) даје челику ситнозрнасту структуру на рачун образовања тешко растворљивих карбида. Прокаљивост се повећава релативно мало док се заварљивост погоршава због велике кртости заваара посебно код челика са већем садржајем угљеника. Волфрам донекле повећава општу корозиону отпорност и отпорност према међукристалној корозији аустенитних челика. Са повећањем садржаја W у челицима опада термичка проводност а повећавају се густина (само до W = 7.6%) и електрични отпор. Челици са високим садржајем волфрама су брзорезни алатни челици.

Сумпор (S) са гвожђем образује сулфид гвожђа FeS, који се у челику налази у виду еутектикума Fe-FeS распоређеног по границама зрна температуре топљења (≈975÷985°C), што у принципу умањује отпорност ка прелинама на топло јер настају око солидус температуре. При обради деформисањем на топло на температурама око 1000÷1200°C еутектика се топи, веза између зрна слаби и долази до лома. Због тога је садржај сумпора ограничен и зависи од квалитета челика. Креће се у границама од 0.025 ÷ 0.040%

Алуминијум (Al) се користи при примарном добијању челика као дезоксидатор па остаје у челику обично до 0.08%. Склон је ка стварању тврдих нитрида у површинском слоју смањујући на тај начин осетљивост челика на процес старења. Додатак Al у количини 0.02÷0.2% утиче на величину зрна првобитног аустенита захваљујући кочионом дејству алуминијум-нитрида и алуминијум-оксида Al₂O₃. У малим количинама алуминијум не само да кочи пораст зрна већ и смањује опасност од закаљења прелазне зоне. Челици са преко 1% Al су тешко заварљиви [8].

Бор (B) је елемент који образује карбиде и веома повећава прокаљивост челика ако се дода у малим количинама. При већим садржајима бора прокаљивост челика опада и долази до раста зрна. Челицима се обично додаје у малим количинама око

0.003%. Има мали пречник атома што му омогућава да образује интерстицијски чврсти раствор. Бор умањује количину нежељених елемената у металу шава јер лако везује кисеоник образујући оксид који је лако топљив па нестаје у металу шава. Бор има велики афинитет према азоту – образује нитриде, али не може знатно да повећа јачину.

Никл (Ni) растворен у фериту повећава јачину и жилавост уз одржавање високе пластичности. Никл има повољан утицај на заварени спој, микроструктура се мења од горњег до доњег бејнита и мартензита, али после жарења за отпуштање напона никал има негативан утицај. Ово се објашњава претпоставком да у току заваривања долази до сегрегације по границама зрна, а у току загревања нечистоће као што су фосфор, калај и антимон дифундују према границама зрна, стварајући међукристалну кртост. Никл је елемент отпоран према оксидацији а у челику делује и као графитизатор (разлаже цементит), па челици богати никлом треба да садрже мање угљеника.

Ванадијум (V) се обично додаје од $0.05 \div 0.2\%$ и ствара карбонитриде. При загревању, ради нормализације, један део карбонитрида улази у чврст раствор и при хлађењу се издваја у облику финих диспергованих честица и ствара фино зрно. Ванадијум је изразити карбонитрирајући елемент и додаје се да би уситнио зрно и таложно ојачао челик. Такође, са угљеником и азотом ствара преципитате састава: ванадијум-карбонитрид V (C, N). Ванадијум – карбид више утиче на напон течења и на прелазну температуру (T_{pr}) од ванадијум – карбонитрида [8].

Ниобијум (Nb) се додаје у количинама од $0.005 \div 0.08\%$. Он образује карбонитриде који повећавају напон течења али смањују ударну жилавост. Нормализацијом челика са Nb долази до уситњавања зрна. Ниобијум олакшава стварање плочастог, интергрануларног ферита што има за последицу ниску жилавост. Ниобијум са угљеником и азотом ствара преципитате састава: ниобијум-карбид (NbC), ниобијум -нитрид (NbN) и ниобијум-карбонитрид Nb (C, N).

Титан (Ti) је елемент највећег афинитета према угљенику па се зато често примењује као стабилизатор у челицима отпорним на киселине у циљу везивања угљеника и спречавања настанка карбида хрома. Титан смањује тврдоћу као и величину аустенитног зрна због термички стабилних зрна које образују учвршћене границе. Титан ствара честице титан-нитрида (TiN), титан-карбида (TiC) и оксиде а када су присутни и други елементи нпр. V, Nb и др. може образовати веома сложене укључке који могу имати нижу тачку топљења и бити мање стабилне, тако да се тај ефекат титана мора сагледати. При највишој температури (1300°C) излучује се TiN. Он се излучује по границама зрна, делује као допунски центар кристализације и ефикасан је у спречавању раста металног зрна. Титан повећава отпорност заваара према прслинама на топло.

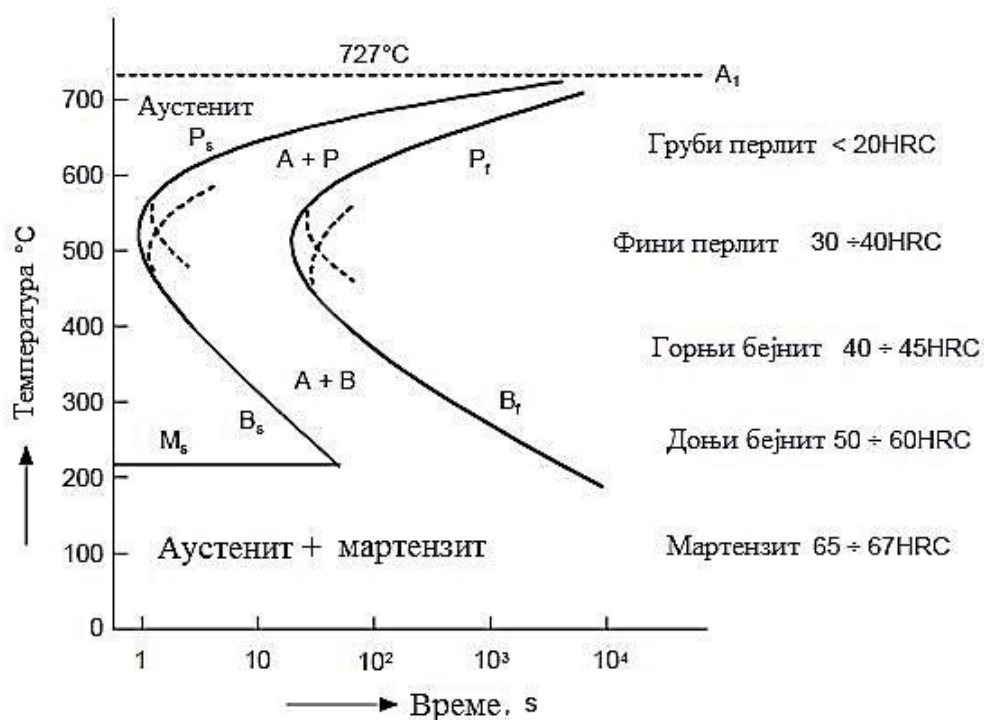
3. ТРАНСФОРМАЦИОНИ ДИЈАГРАМИ

Дијаграми који приказују ток промене потхлађеног аустенита, зависно од температуре и времена, називају се трансформациони дијаграми. За разлику од равнотежних дијаграма они важе за челик одређеног хемијског састава и за одређене услове аустенитизације (величина зрна, хомогеност аустенита и др.). Садрже податке о почетку и крају излучивања проеутектоидних фаза, као и температурске зоне перлитне, бејнитне и мартензитне промене аустенита. Добијају се обично помоћу интегралних метода (дилатометрија, магнетометрија и др.) па стога дају само просечне брзине промена. Поред ових података често се такође уводе нпр. удели продукта одређене промене, вредности тврдоћа, одговарајуће излазне структуре и тсл. Данас коришћени трансформациони дијаграми јесу у два облика: *изотермички дијаграми*, који дају продукте промене аустенита при одређеним константним температурама, и *анизотермички дијаграми* који дају те продукте при различитим брзинама хлађења. Дијаграми изотермичког разлагања аустенита (ИРА) од значаја су пре свега за избор параметара неких видова термичке обраде, а дијаграм анизотермичког разлагања аустенита (АРА) користи се како у пракси термичке обраде, тако и за оцену заварљивости закаљивих челика [1].

3.1 Дијаграми изотермичког распада аустенита (ИРА)

Из претходних разматрања произлази да је перлитна промена у еутектоидним челицима дифузиона промена, која се одвија нуклеацијом клица и њиховим растом. Брзина промене је дата брзином образовања клица и брзином њиховог раста. При малом потхлађењу аустенита испод температуре A_1 (слика 3.1.1), кинетички параметри промене су готово занемарљиви па је брзина промене зато мала; прва зрна перлита (P_s) се појављују тек после веома дугог времена задржавања на трансформационој температури (дуго време инкубације), што значи да је време промена знатно. При већем потхлађењу, до око 550°C , за нуклеацију је потребна мања енергија, то значи да се повећава брзина нуклеације и брзина пораста, а тиме и укупна брзина промене. Даљим снижавањем трансформационе температуре опада брзина дифузије гвожђа па и укупна брзина промене. Криве почетка и краја промена називају се ИРА дијаграми, а понекад S или TTT- дијаграми. Изглед тог дијаграма за еутектоидни угљенични челик дат је на слици 3.1.1.

Дијаграми ИРА се конструишу експериментално, на основу различитих физичких особина аустенита и продуката његовог преображаја. За конструисање дијаграма служи нпр. дилатометријска метода, која користи разлику специфичне запремине аустенита и новонасталих продуката, резистометријска метода (различит електрични отпор), магнетометријска метода (аустенит је немагнетичан, нови продукти магнетични) и др. За ова испитивања се припремају мањи узорци, димензијски једнаки, који се после аустенитизације брзо хладе до различитих температура испод A_1 ; на одговарајућој температури узорак се задржава све до потпуног дифузионог распада аустенита.



Слика 3.1.1 Дијаграм изотермичког распада аустенита (ИРА) еутектоидног угљеничног челика

При одређеним условима на температурама испод A_{c1} , односно A_{r1} долази до промене аустенита у еутектоидним челицима дифузионим или бездифузионим процесима у нове фазе, а те промене могу бити: *перлитна*, *бејнитна* и *мартензитна*. Брзина ових промена је различита у зависности од температуре, брзине хлађења, хемијског састава челика, брзине дифузије, брзине нуклеације, брзине раста новонастале фазе и других фактора. Криве линије почетка и краја трансформације аустенита у новонастале изотермичке фазе приказане су на слици 3.1.2 за нелегирани еутектоидни челик.

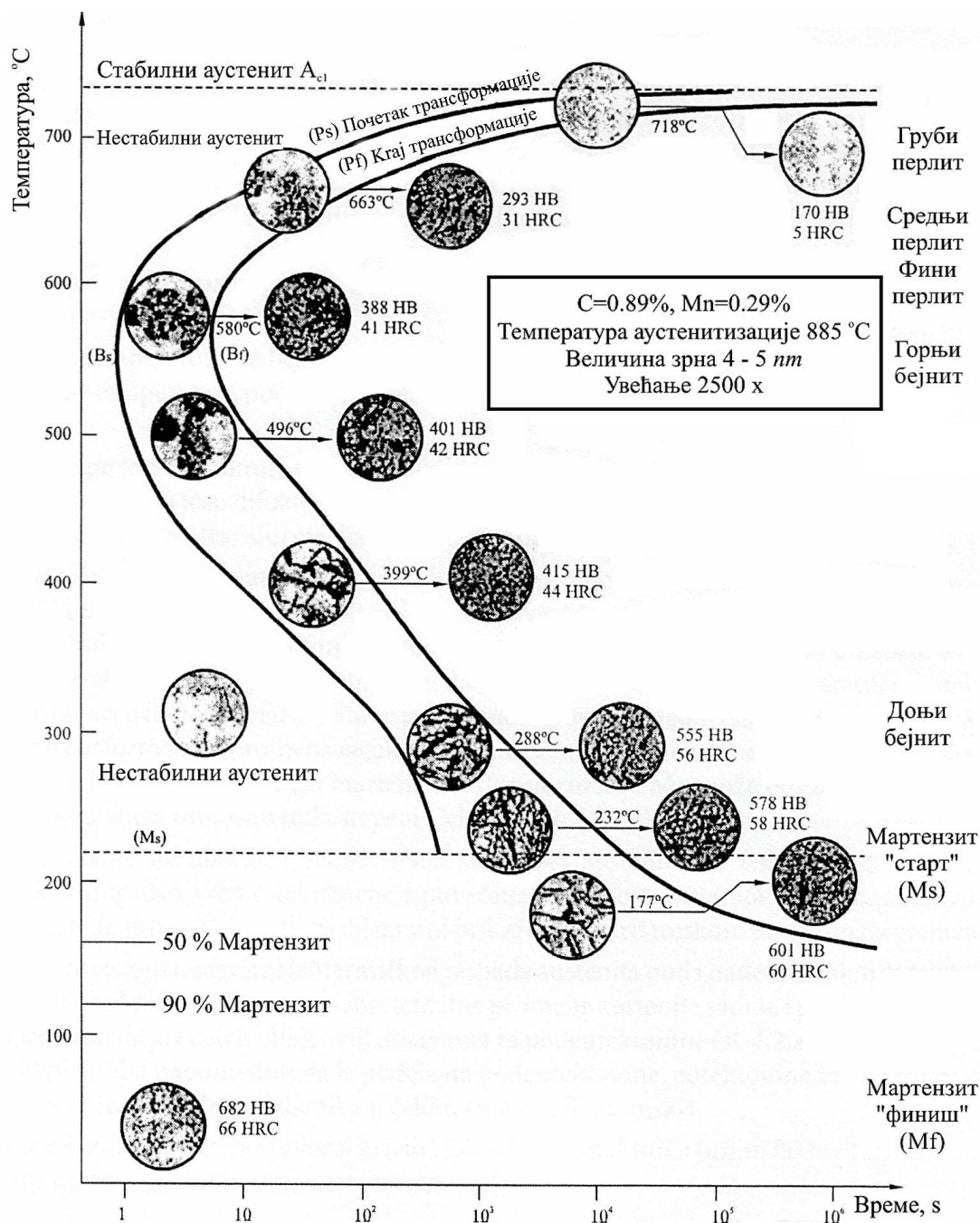
Перлитна промена аустенита је дифузиона промена, која се одвија образовањем клица и њиховим растом на повишеним температурама, а брзина промене је условљена брзином раста клица. При малом потхлађивању аустенита испод A_{c1} температуре, брзина промене је релативно мала и прве клице новонастале фазе појављују се тек после дугог времена задржавања на трансформационој температури, а укупно време промене је доста дуго. Снижавањем трансформационе температуре при већем потхлађивању аустенита, смањује се и брзина дифузије угљеника, па брзина промене опет опада. Због тога криве почетка и краја промене аустенита имају специфичан облик “S”. Део прве криве означен са P_s представља почетак, а део друге криве означен са P_f крај перлитне трансформације. Новонастале фазе перлита разликују се по финоћи, па се добије: *груби*, *средњи* и *фини перлит*.

Бејнитна промена аустенита је дифузиона промена која се одвија на нижима температурама од перлитне, па се дифузија, првенствено угљеника, одвија мањом брзином. То утиче на физичко - хемијска својства новонастале фазе. Слично као и код перлитне промене део прве криве (сл. 3.1.2) означен са B_s представља почетак, а део друге криве означен са B_f крај бејнитне трансформације аустенита.

Област на слици 3.1.2 која је ограничена линијама A_{c1} , P_s , B_s и M_s , представља област нестабилног аустенит. Линија A_{c1} раздваја стабилни аустенит (изнад A_{c1} линије) и нестабилни аустенит (испод A_{c1} линије), а простире се све до M_s линије која представља почетак мартензитне трансформације. Област која је ограничена линијама P_f , B_f и M_s , представља област новоформираних фаза перлита и бејнита. Новонастали бејнит се дели на: *горњи бејнит* и *доњи бејнит* (сл. 3.1.2). На вишим температурама настаје горњи бејнит мање тврдоће, а на нижим температурама доњи бејнит веће тврдоће.

У температурској области нешто испод A_{c1} линије, због температурског хистерезиса од A_{c1} линије па до температуре од око 550°C (колело, односно нос кривих) настају различите новонастале фазе трансформисаног аустенита које се разликују по структури и физичко-хемијским својствима. Са дијаграма (сл. 3.1.2) види се да тврдоћа новонасталих структурних фаза расте са смањењем трансформационе температуре. Такође, при температури око 550°C брзина трансформације аустенита је највећа, јер се настајање и раст клица одвија знатно већом брзином. Зато је то температура најмање стабилности аустенита. Доминантна је фина перлитна структура прекривена горњим бејнитом. Са снижавањем трансформационе температуре брзина промене нестабилног аустенита поново опада и ствара се структурна фаза доњег бејнита. Кратко време инкубације и веома мала стабилност аустенита око 550°C , и супротно томе, дуго време инкубације и повећана стабилност аустенита око температура A_{c1} и M_s линија, намећу потребу да се трансформациони дијаграми приказују са логаритамском поделом на временској оси.

Мартензитна промена аустенита је бездифузионе природе, а нестабилан аустенит прелази у мартензит, који има посебна физичко-хемијска својства. Трансформација аустенита на температури M_s за еутектоидни челик са 0,8% C почиње на температури од 216°C , а завршава се на -46°C . Мартензитна трансформација аустенита почиње на температурама када престаје дифузија свих хемијских елемената, па и угљеника, а одвија се великом брзином око 10^3 m/s . Та брзина се упоређује са брзином звука у металима и активација није зависна од температуре у температурском интервалу $M_s - M_f$. Трансформација аустенита у мартензит не одвија се не до краја, па у структури остаје нетрансформисани заостали аустенит, који се накнадно може трансформисати третманом тј. јаким потхлађивањем–замрзавањем. Мартензитна структура је у ствари структура α -ферита пресићена угљеником, а температуре M_s и M_f зависе од садржаја раствореног угљеника у аустениту, па се зато за различите врсте челика и ове температуре разликују.



Слика 3.1.2 Дијаграм изотермичком преображаја аустенита еутектоидног нелегираног челика (IRA – дијаграм)

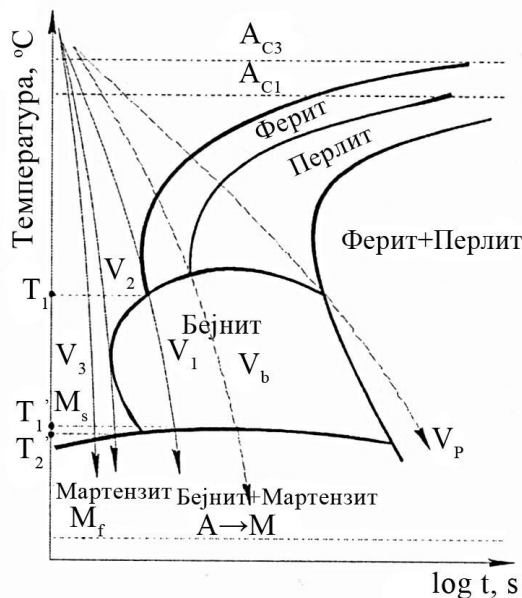
3.2 Дијаграми континуалног разлагања аустенита (АРА, КН)

При равнотежном хлађењу аустенита до тачке A_{c1} , његова слободна енергија (G) практично постаје једнака слободној енергији нискотемпературских фаза (ферита и цементита). Зато и трансформација аустенита у реалним условима може настати само уз мање или веће потхлађивање (испод A_{c1}), што га чини метастабилним и склоним да се брже промени у стабилнију структуру.

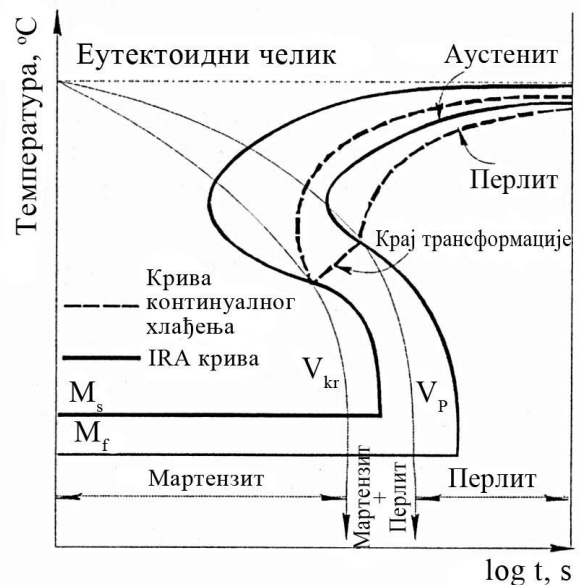
Ако се раније наведеним методама установи време почетка и краја трансформације аустенита у условима непрекидног хлађења различитим брзинама (нпр. на мирном ваздуху, при принудном струјању ваздуха, или у уљу, кречном млеку, води, води са 5-10% NaCl), добија се дијаграм континуалног хлађења, тзв. "КН" дијаграм. Општи облици овог дијаграма приказани су на слици 3.2.а. за угљеничне подеутектоидне челике и на слици 3.2.б за еутектоидни угљенични челик. Слично као и код изотермичког разлагања аустенита, најмањим брзинама хлађења одговара феритно-перлитна структура (F+P) код подеутектоидног челика, а феритно-цементитна (F+C_m) код наеутектоидног челика. Већим брзинама хлађења одговара бејнитни-мартензитна (B+M), а највећим брзинама хлађења чисто мартензитна структура (M).

Укратко се разлика између ИРА и КХ-дијаграма може свести на следеће :

- код ИРА дијаграма почетак и крај промене аустенита прате се по изотерми ($T = \text{const.}$), а код КН- дијаграма промена аустенита се прати по одговарајућим кривама хлађења ($v_1, v_2, v_3, \dots$), (слика 3.2.а),
- чисто бејнитна структура не може се добити континуалним хлађењем већ само у изотермичким условима хлађења и
- криве континуалног хлађења (КХ) померене су удесно и надолу у односу на ИРА-дијаграм, што значи да касни почетак и крај разлагања аустенита и да се помера ка нижим температурама (слика 3.2.б).



а)



б)

Слика 3.2 (а) КН- дијаграм подеутектоидног челика, (б) ИРА-дијаграм () и КХ дијаграм (-----) еутектоидног челика

4. ПРОБЛЕМИ ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ И ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ

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

Заваривање је један од најважнијих технолошких процеса у савременој индустрији, посебно у машиноградњи, грађевинарству, бродоградњи и процесној индустрији. Најчешћа примена заваривања је за израду носећих металних конструкција спајањем појединих делова – лимова и профила, за израду процесне опреме – посуда и цевовода под притиском, и за поправку поломљених или истрошених металних делова. Израда одговорних конструкција сложенијег облика је могућа и закивањем и ливењем, али се применом заваривања остварују вишеструке предности. У следећем поглављу биће речи о проблемима који се јављају током заваривања челика повишене јачине и оцени саме заварљивости завареног споја и челика повишене јачине.

4.1 Појам заварљивости

Заварљивост је комплексна технолошка карактеристика материјала којом се углавном изражава утицај начина заваривања на заварени спој и његово понашање за време и после заваривања у топлотном и деформационом смислу. Стога се може рећи да појам заварљивости одређује релативну способност материјала да ствара заварене спојеве одабраном технологијом заваривања и да добијени спојеви задовољавају тражена својства и радне услове. То значи да, нпр. при ручном – електролучном (РЕЛ) заваривању, материјал заварљив тим поступком мора образовати спој чија су тражена својства приближно једнака својствима основног материјала. Тражена својства своде се на испуњавање одређених захтева у вези са механичким, структурним и хемијским особинама метала шави и зоне око шави [3].

Заварљивост можемо поделити на: **металуршку, конструкциону и технолошку заварљивост.**

Металуршка заварљивост материјала зависи од низа фактора: хемијског састава, структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. При томе ова заварљивост обухвата све металуршке промене у материјалу настале дејством топлоте унете при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног погоршања, односно снижења механичких и технолошких својстава споја, нарочито у зони око шави, што значи да код материјала лоше заварљивости могу настати знатне промене хемијског састава, прслине, тврде и крте структурне компоненте и тсл. Утврђено је да су метали и легуре металуршки

незаварљиви ако се њихови саставни хемијски елементи не растварају у чврстом стању већ образују тврда и крта хемијска једињења (нпр. карбиде). Насупрот томе, заварљиви су сви хомогени метални материјали који стварају чврсте растворе и нееутектичке и еутектичке смеше, односно сви материјали који поседују металуршку заварљивост могу се успешно заваривати применом одговарајућег метода, поступка и технологије заваривања [5].

Конструкциона заварљивост показује утицај низа параметара на решења заварених елемената конструкције, нпр.: дебљине, врсте, броја и распореда спојева, величине шавова и њихове расподеле, које конструктор поставља пројектним захтевом за дату конструкцију зависно од начина оптерећења и радних услова [5].

Технолошка заварљивост обухвата утицај технолошких параметара на заварени спој, нпр. додатног материјала, начина и поступка заваривања, линијске енергије заваривања, брзине хлађења итд. Притом се цени да ли се технолошки поступак изводи без тешкоћа или се морају применити посебне мере (предгревање, жарење, рад у специјалној атмосфери), а оцена се даје управо на основу предузетих мера и других радних услова. Из оперативног аспекта који се односи на понашање неког материјала при заваривању или наваривању, они се оцењују као „добро заварљиви“ ако је шав чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал спајају у хомогену легуру, а притом се топе без тешкоћа, прскања, појаве прслина, гасних мехурова и других грешака [5].

Такође, на заварљивост утичу и нечистоће на границама жлеба – прљавштина, масти и уља, вода, коварина, боја итд, па се препоручује њихово одстрањивање како би добијени резултати били меродавнији.

Општа заварљивост стога представља глобалну процену појединачно објашњених појмова заварљивости при чему се узима у обзир већи број фактора за оцену квалитета – основни и додатни материјал, заваривачки рад, стање напона у шавовима и у близини концентратора напона и др.

Основни проблеми заварљивости метала и легура своде се на њихова својства која се траже после заваривања. Коначна својства за дати материјал зависе од процеса и појава који настају у основним зонама завареног споја:

- у шаву, где се странице основног материјала топе и мешају са додатним материјалом а затим очвршћавају;
- у прелазој зони – зони стапања – зони полуистопљеног материјала (чврсто-течно);
- у зони утицаја топлоте (ЗУТ-у), где материјал трпи промене услед загревања и хлађења у чврстом агрегатном стању.

Многи процеси и промене које настају у овим зонама не могу се непосредно запазити, већ се о њима суди само на основу испитивања изведених спојева, односно оцењује се склоност материјала ка образовању прслина, склоност ка кртом лому, старењу и др.

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

1. Како се материјал понаша за време заваривања усвојеним технолошким поступком,
2. Како се материјал понаша у најнеповољнијим условима заваривања.

То значи да се од основног материјала тражи добра заварљивост и поузданост споја, односно да су завари компактни и спојеви непрекидни а шав и његова околина довољно јаки и пластични да издрже и сва напрезања приликом заваривања, тј. да поседују одговарајућу технолошку чврстоћу и да издрже сва предвиђена и непредвиђена напрезања у току рада [3].

Из до сада познатих сазнања за оцену и дефиницију заварљивости запажа се да нема униформних и експлицитних дефиниција овог, за праксу, веома важног својства. Али се, као пример, може навести најраспрострањенија дефиниција заварљивости Међународног института за заваривање (МИЗ) која гласи :

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

Међутим, као најважнији критеријум за оцену заварљивости јесте непрекидност тј. метални континуитет завареног споја, који може бити нарушен појавом прслина одређене величине и распореда. Према механизму настајања прслине могу бити:

- Топле (вруће),
- Хладне,
- Лемеларне и
- Прслине жарења.

Поред наведеног критеријума хомогености, битан је и критеријум оцне структуре и механичких особина:

- Тврдоће завареног споја (метал шава, ЗУТ и ОМ),
- Чврстоће (јачине) и
- Ударне жилавости.

4.2 Проблеми у заваривању челика повишене јачине

Поред горе споменуте заварљивости, постоји још низ проблема који се могу јавити при заваривању. Челици повишене јачине се, условно, сматрају заварљивим. Под појмом условно се мисли на примену мера које ће помоћи успешно извођење процеса заваривања, али и поред примене одређених мера долази до погоршања особина у зони утицаја топлоте. Нежељене појаве које се могу уочити при заваривању

ових челика су: пораст тврдоће, смањење жилавости, повећање прелазне температуре кртости и појава различитих врста дисконтинуитета. Свакако је најбитније обезбедити сигурност од кртог лома, чему доприноси постизање довољно ниске температуре кртости. Како би заваривање било продуктивније, тежи се избегавању предгревања али никако уколико то угрожава квалитет извођења процеса. Предгревање се у неким случајевима може надоместити повећаним уносом топлоте (погонске енергије q_l). Она зависи од процесних параметара заваривања (U, I, v_z).

Код заваривања челика повишене јачине, појава прслина и кртих фаза је везана за брзо хлађење шава и његове околине у области температура највеће нестабилности аустенита. Како би се избегле те нежељене појаве тежи се смањењу брзине хлађења, односно продужавању времена хлађења – фазних промена. Та брзина хлађења, која не сме да се прекорачи јер долази до настанка кртих фаза, се назива критична брзина хлађења (v_{kr}) и тачно је дефинисана за сваки челик. У случају прекорачења критичне брзине хлађења долази до настанка мартензитне структуре који узрокује појаву прслина. Смањење брзине хлађења се може постићи:

- предгревањем целог завариваног предмета до одређене температуре а затим његовим заваривањем или
- уколико је то могуће и применом параметара заваривања који обезбеђују довољну количину топлоте, не само за топљење додатног материјала и страница заваривачког купатила, већ и за загревање највеће могуће запремине завариваног дела у околини шава.

У низу случајева се могу применити оба горе споменута начина за смањење брзине хлађења. Повећање тврдоће изазвано структурним трансформацијама се најчешће јавља у грубозрнастој области ЗУТ-а. Један од најважнијих чинилаца је количина унете топлоте при заваривању и она има директан утицај на излазна својства завареног споја. Подаци о оптималном уносу топлоте се врло често могу наћи у препорукама произвођача челика, на основу чега се могу одредити параметри заваривања (I, U и v_z), према релацији:

$$q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta_i, \quad \frac{J}{cm}, \quad (1)$$

где је:

q_l – погонска (линијска) енергија заваривања у J/cm ,

U – напон лука у V ,

I – јачина струје у A ,

v_z – брзина заваривања у cm/s и

η_i – степен искоришћења (зависи од поступка заваривања).

За одређивање добијене структуре се користе трансформациони дијаграми и то: TTT (Time – Temperature - Transformation) дијаграми из којих се на основу познате вредности $t_{8/5}$ могу донети закључци о добијеној структури и тврдоћи при хлађењу челика и KHZ дијаграми чија је употреба прикладнија и меродавнија у случају праћења структурних промена при заваривању. Разлика између две горе споменуте врсте дијаграма је у томе што су у КН дијаграму унете криве континуалног хлађења челика

различитим брзинама и у зависности од тих брзина резултујуће структуре и тврдоће, док у дијаграму изотермалног распада аустенита коначна структура зависи од температуре и времена држања на њој.

Челици повишене јачине се условно сматрају добро заварљивим, мада се при њиховом коришћењу јављају проблеми погоршања особина ЗУТ-а. Нежељене појаве које се могу уочити при заваривању ових челика су: повећање тврдоће, смањење жилавости, повећање прелазне температуре кртости и појава дисконтинуитета разних облика у ЗУТ-у. Најважније је обезбедити сигурност од кртог лома, чему доприноси постизање довољно ниске прелазне температуре кртости. Због повећених захтева за продуктивнијим заваривањем, циљ је да се избегне предгревање и омогуће велике брзине заваривања. То може да се оствари смањењем хемијског еквивалента угљеника, односно смањеним садржајем угљеника на рачун легирајућих елемената.

4.3 Проблеми при заваривању Q+T челика повишене јачине

Ови челици, иако су нискоугљенички ($C < 0.2\%$), склони су ка закаљивању, чак и при релативно спором хлађењу. Тако да при заваривању ових челика није довољно водити рачуна само о технолошким параметрима којима се постиже правилно формирање шава, већ се мора водити рачуна и о негативном утицају унете топлоте. Зато код ових челика промена структуре, механичких својстава и осетљивости према прслинама може зависити од температурских циклуса. Главне карактеристике температурских циклуса од којих зависе наведене промене су: максимална температура, време задржавања изнад A_{C3} температуре и брзина хлађења при температури најмање стабилности аустенита (између 800 и 500 °C).

Код (Q+T) челика потребно је контролисање услова и параметара заваривања на такав начин да температура предгревања као и међуслојна температура (прелазна температура) буде довољно висока да спречи хладне прслине с једне стране, а с друге стране да буде довољно ниска да спречи пад пластичности и јачине у зони под утицајем топлоте.

Заварене конструкције од (Q+T) челика могу показати склоност ка образовању прслина под утицајем поновног загревања (отпуштања напона) с обзиром на нестабилно структурно стање тих челика и тежњу структуре тих челика да пређе у стабилно стање, при температурама вишим од температуре отпуштања.

Треба ипак истаћи следеће проблеме који су битни са тачке гледишта склоности ка кртом лому спојева заварених од тих челика:

- ограничена резерва пластичности (Q+T) челика, због високог напона течења, много мања од затезне јачине,
- могућност постојања заварених спојева локалних зона мање пластичности заварених челика и
- могућност настајања прслина (пре свих хладних) у процесу заваривања у металу шава и ЗУТ-у, које могу представљати почетак кртог лома.

4.4 Методе за испитивање заварљивости челика повишене јачине

У практичним условима, појам "идеална заварљивост" губи смисао, тј. не може се ниједном методом добити спој потпуно истих својстава у шаву, ЗУТ-у и основном материјалу. Како се стварна заварљивост разликује од идеалне, услед разлике у својствима које су проузроковане процесом заваривања, то се критеријуми за оцену заварљивости свode на процењивање потребних вредности усвојених показатеља заварљивости. Испитивање основног материјала, представља полазну оцену за процену заварљивости. Добијени резултати одређују и евентуалну потребу за примену мера за побољшање заварљивости. У ову сврху користе се:

- рачунске методе,
- лабораторијске (практичне) пробе,
- технолошке пробе и
- КН дијаграми.

Потребни подаци за оцену заварљивости наведеним методама су:

- хемијски састав основног материјала,
- дебљина, тип и понекад крутост завареног споја и
- начин заваривања.

4.5 Процена заварљивости на основу КНЗ дијаграма

У новије време, за оцену заварљивости осим поменутих метода, користе се и трансформациони КНЗ дијаграми. За неке конструкционе челике се могу наћи, углавном у страној литератури, дијаграми хлађења у условима заваривања, тј. дијаграми разлагања потхлађеног аустенита под утицајем различитих брзина хлађења које одговарају различитим температурским циклусима. Ови дијаграми се у литератури дају у полулогаритамском координатном систему температура – време (логаритамска подела) 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. У самом КНЗ дијаграму дају се линије које означавају поједине структуре (мартензит, бејнит, ферит, перлит) у зависности од времена $t_{8/5}$.

У глави 6.2 биће више речи о одређивању заварљивости челика и технологије заваривања повишене јачине, класе S690QL практичном употребом КНЗ дијаграма.

5. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Савремене тенденције при пројектовању заварених конструкција, нарочито у транспортној техници, су смањење тежине а повећање носивости. Код првих заварених конструкција примењивани су челици са напоном течења до 250 *MPa*, да би се увођењем угљенично – манганских (C- Mn) челика умирених алуминијумом та граница повећала на 300 ÷ 360 *MPa*. Металуршко-механичким поступцима (микролегирањем и нормализацијом, односно контролисаним ваљањем) та граница је повећана до скоро 450 *MPa*, а патентирањем (у Енглеској) нисколегираних бејнитних челика она достиже и 550 *MPa*. Најзад, са развојем побољшаних нисколегираних челика та граница расте и до 700 *MPa*. Сви челици са $R_p > 360 \text{ MPa}$ сврставају се у челике повишене јачине, а проблеми у вези са њиховом заварљивошћу се морају за сваку групу посебно разматрати.

У литератури се могу наћи различите поделе ових челика, зависно од њихове примене у појединим земљама. Тако се нпр. према пољским стандардима они деле на: C – Mn челике, микролегиране челике и нисколегиране челике повишене јачине. Према чешким стандардима разликују се микролегирани феритно-перлитни челици, бејнитни нисколегирани нормализовани и отпуштени, као и нисколегирани побољшани челици. У Немачким стандардима ови челици су обухваћени стандардима DIN17100 и DIN17200. У нашем стандарду SRPS C.B0.500 даје се преглед општих конструкционих C–Mn челика, док стандард SRPS C.B0.502 укључује и микролегиране финозрне челике повишене јачине.

5.1 Проблеми заварљивости C- Mn челика

Повећање својстава отпорности код ових феритно-перлитних челика настаје услед пораста удела перлита у структури, ојачања ферита манганом који супституцијски улази у чврст раствор α -гвожђа и уситњавањем зрна.

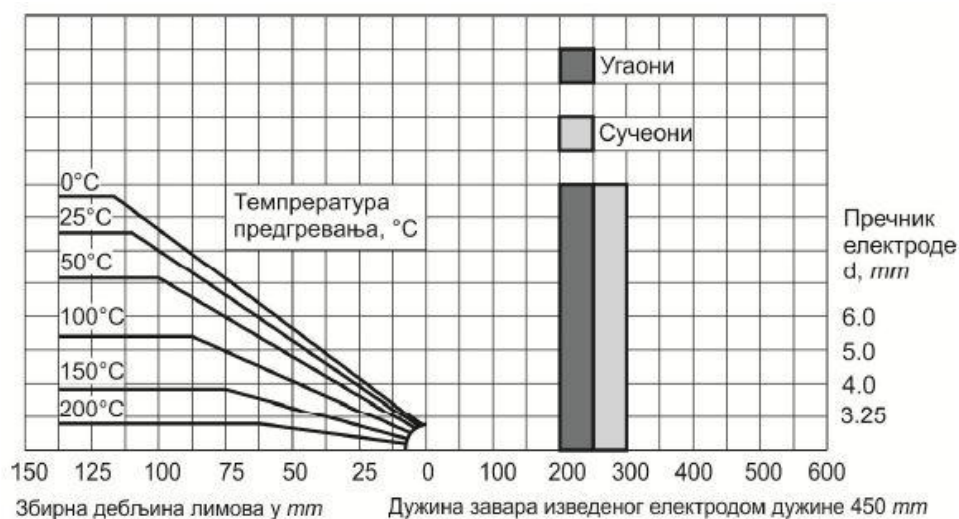
Челици ове групе се испоручују у различитим облицима: шипке, профили и лимови, а намењени су за мостоградњу, грађевинарство, хидро и бродоградњу, резервоаре и тсл. Угљенично - мангански челици са еквивалентним угљеником $CE < 0.45\%$ и са $s < 25 \text{ mm}$ се сматрају добро заварљивим без предгревања. За веће дебљине, као и при заваривању на сниженим температурама неопходно је предгревање или заваривање кратким заварима. Као што је већ поменуто, еквивалентни угљеник се може израчунати по формули:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}, \% , \quad (2)$$

За заварене конструкције код којих нема опасности од кртог лома препоручују се: Š0370, Š0460, Š0561, а за делове заварених конструкција изложене затезању користе се Š0461 и Š0562, док се за делове и конструкције код којих постоји опасност од кртог лома препоручују високовредни челици Š0471 и Š0563.

Као основни проблем при заваривању ових челика јавља се склоност ка хладним прслинама, јер се перлит изнад A_{C1} температуре трансформише у аустенит који при

бром хлађењу ЗУТ-а може трансформисати у мартензит. Због тога се пре заваривања мора извршити потпуно или локално предгревање, а да се само заваривање изводи са већом погонском енергијом. Заваривање се изводи искључиво поступцима и технологијама које се одликују ниским садржајем дифундованог водоника, што код РЕЛ поступка одговара коришћењу базичних сушених електрода. За одређивање температуре предгревања може се применити формула Сеферијана ($T_p = 350 \cdot \sqrt{[C] - 0.25, ^\circ C}$) или дијаграм на слици 5.1 ([C] - укупни еквивалент дебљине).



Слика 5.1 Дијаграм за избор температуре предгревања C- Mn челика, РЕЛ поступком, базичним електродама

У циљу провере да ли усвојени технолошки параметри заваривања дају тражену структуру и механичке особине (оптимална жилавост и одговарајућа тврдоћа), потребно је израчунати време хлађења између 800 и 500°C ($t_{8/5}$) и унети га у дијаграм континуалног хлађења (KNZ) за дати челик.

5.2 Проблеми заварљивости микрولةгираних челика

Микрولةгирани челици повишене јачине употребљавају се за цевоводе високог притиска, судове под притиском, елементе друмских возила, железничке вагоне и цистерне за превоз гасова, мостове, хале и др.

За челике из ове групе карактеристично је то да садржај угљеника не прелази 0.2% и да се намерно додају мале количине микрولةгирајућих елемената (Nb, Ti, Al, Ta, Zr, V, и др.) чији збирни садржај не прелази 0.2%. Мали додаци ових елемената се таложе као карбиди, нитриди и карбонитриди, а на повећање јачине делују двојако: уситњавањем зрна и таложењем и ојачањем чврстог раствора. Уситњавање зрна се постиже нормализационим жарењем или контролисаним ваљањем и хлађењем.

На заварљивост микрولةгираних челика пресудно утиче склоност ка појави хладних прслина, што зависи од величине еквивалентног угљеника, дебљине и типа споја. У циљу спречавања ових прслина потребно је предгревање које утиче не само на образовање тражене структуре ЗУТ-а већ и на снижење заосталих напона и количине

дифундованог водоника из шава у ЗУТ-у. Температура предгревања овде се повезује са минималном вредношћу међуслојне температуре и може се одредити применом дијаграма са слике 5.1 или помоћу параметарских једначина.

5.3 Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине

5.3.1 Бејнитни челици

Ови челици представљају, у односу на микролегиране, наредну етапу развоја челика повишене јачине. Најпре су се развили у Енглеској а први такав челик је *FORTYWELD* заштићен британским патентом под бројем 611.598. Основни легирајући елементи су: $Mo = 0.5\%$ и $B \approx 0.003\%$ а садржај угљеника је ограничен на 0.18% при нешто већем садржају Mn и Si . Испоручују се у нормализационо жареном или нормализованом и отпуштеном стању. Комбинацијом ($Mo = 0.5\% + B \approx 0.003\%$) добија се бејнитна структура и при веома малим брзинама хлађења (чак и на ваздуху) а додавањем мангана и хрома снижава се температура бејнитне трансформације на $600 \div 300^\circ C$ што веома доприноси уситњавању зрна и већој дисперзији карбида који ојачавају метал. На тај начин се напон течења повећава на $460 \div 600 MPa$ [3].

Бејнитни челици се примењују за израду различитих челичних конструкција типа дизалица, железничких платформи, цистерни, грађевинских машина и тсл. Не примењују се за конструкције изложене ниским температурама због пада ударне жилавости. Основни проблем при заваривању ових челика јесте појава хладних прелина и пад жилавости у ЗУТ-у. Он се решава смањењем брзине хлађења после заваривања што се постиже предгревањем или повећањем погонске енергије [3].

5.3.2 Нисколегирани побољшани челици (Q+T)

Ови термички побољшани челици примењују се за дизалице, цистерне, резервоаре, мостове, бродску опрему и тсл. Највеће вредности својстава отпорности се могу постићи каљењем на мартензитну структуру при чему тада напон течења достиже и вредности од $400 \div 800 MPa$. Иако су нискоугљенични ($C < 0.2\%$) до њиховог закаљивања ипак долази и при релативно спором хлађењу. Легирајући елемент који, код ових челика, има пресудну улогу на повећање јачине је бор (B). Он доприноси уситњавању зрна, дезоксидацији и денитрирању металног купатила, као и великом повећању прокаљивости.

Већина челика добијених каљењем и отпуштањем (Q + T – челици) су финозрни што значи да се кале са температуре при којој су настала фина (ситна) аустенитна зрна. На тај начин се добијају челични полупроизводи велике јачине и добре заварљивости. Будући да су механичке особине нисколегираних побољшаних челика добијене оптималном термичком обрадом, јасно је да ће се те особине при заваривању мењати услед дејства температурских циклуса заваривања. Због тога, при избору термичког режима заваривања није довољно да се узме у обзир само хемијски састав, већ и чињеница да су корисне особине постигнуте и термичком обрадом побољшања. Из овог разлога се мора за сваки челик ове класе 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 одређује се тако да се спрече хладне прслине, а њена максимална вредност као и време задржавања изнад A_{C3} температуре из услова да се пад јачине у делу ЗУТ-а сведе на најмању могућу меру.

За разлику од других констукционих челика, код Q + T – челика, бољи резултати се постижу применом технологија које имају ниже вредности погонске енергије као што су РЕЛ метода и заваривање у заштити гасова. Нарочито за ове челике важи препорука да се технологија заваривања прописује у зависности од тражених излазних карактеристика завареног споја.

6. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА S690QL И ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА НА ОСНОВУ KHZ ДИЈАГРАМА

6.1 Добијање челика S690QL

Класе челика S690QL се добијају по строго контролисаном хемијском саставу и тачно дефинисаним производним фазама. То омогућава да се остваре повољне механичке особине са уским границама толеранција. Разликују се две врсте ових челика: конструкциони и челици за судове под притиском. Њихова структура је феритно-перлитна па спадају у групу добро заварљивих челика али само за плоче релативно мале дебљине. За веће дебљине треба се придржавати препорука које се, углавном, односе на предгревање, контролисан унос топлоте при заваривању и на термичку обраду пре, у току и после заваривања. Добијају се поступцима термомеханичке обраде челичних полупроизвода на високим температурама (ваљање и контролисано хлађење) [3].

Челици класе S690QL се производе ливењем у инготе. Пре ваљања инготи се загревају на приближно 1200°C а затим прогресивно ваљају до захтеваног коначног облика – плоча или профила. Први део ваљања се изводи у зони рекристализованог аустенита (изнад 950°C), где се рекристализација одвија већ при ваљању, док се аустенитно зрно смањује редукцијом дебљине улошка. Ваљање се онда наставља у подручју метастабилног аустенита где долази до хладне деформације а аустенитна зрна остају деформисана. За време трансформације свако аустенитно зрно даје много феритних зачетака по својим кристалним границама зрна. После завршене трансформације настао је велики број феритних зрна која побољшавају својства јачине и живавости челика. Схематски приказ процеса производње ових челика приказан је на слици 6.1.



Челик S690QL спада у групу конструкционих нисколегираних челика повишене јачине и производи се у шведским железарама. С обзиром на то да је ова класа челика највећим делом намењена за израду заварених конструкција, садржај угљеника у челику је ограничен на 0.20%. Прописан хемијски састав челика S690QL је дат у табелици 6.1.

Таблица 6.1 Прописан хемијски састав челика S690QL

Хемијски елементи	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	B
Прописан макс, %	0.20	0.60	1.60	0.020	0.010	0.70	0.30	2.0	0.70	0.005

Поред података из железаре, у акредитованој лабораторији је на узорку челика анализиран хемијски састав. Добијени резултати су приказани у табелици 6.2.

Таблица 6.2 Анализиран хемијски састав челика S690QL

Челик	Захтев	Садржај хемијских елемената, %												
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	B	Cu	Nb
S690QL	Пропис. макс	0.12	1.35	0.36	0.011	0.010	0.17	0.22	0.16	0.06	0.081	0.00147	0.04	0.0569

Поред хемијског састава произвођач је доставио и сертификат о механичким особинама, тврдоће и микроструктури у зависности од дебљине плоче.

Таблица 6.3 Прописане механичке особине челика S690QL

Ознака	Дебљина, mm	R _m , MPa	R _{p0.2} , MPa	A ₅ , %	Тврдоћа, HBW	Гарантована енер. лома на 40°C, J	Микро-структура
S690QL	4.0-53.0	770-940	700	14	260-310	69	Међуфазна структ. Побољшања
	53.1-100	770-940	650		260-310		
	100.1-130	710-900	630		240-290		

Челик S690QL се добија специјалним поступцима термомеханичке обраде која се састоји од ваљања на повишеним температурама, каљења и затим отпуштања. Одликују га изузетне механичке карактеристике и веома добра заварљивост. Поред споменутих својстава овог челика, у табелици 6.4 су приказане и друге особине овог челика.

Ваљањем добијене плоче се секу гасним пламеном или ласерским и плазма поступцима уз предгревање за плоче већих дебљина. Повећање напона течења хладном деформацијом је могуће али не и деформацијом на топло јер би услед поновног загревања дошло до нарушавања особина постигнутих процесом примарног добијања челика. Не препоручује се загревање овог челика на температури већој од 250°C. Изузетно се може допустити и нешто већа температура загревања али уз надзор и контролу инжењера заваривања.

Треба споменути и то да S690QL има различите ознаке у зависности од стандарда. У табlici 6.4 су приказане ознаке према неколико стандарда.

Таблица 6.4 Ознаке челика S690QL у различитим стандардима

Ознака произвођача железаре SSAB	EN	DIN (Немачка)	AFNOR (Француска)	SS (Шведска)
WELDOX 700	S690QL	TstE690V	E690T	2625

6.2 Избор најповољније технологије заваривања челика S690QL на основу КН дијаграма

6.2.1 Избор технологије заваривања

При пројектовању заварених конструкција константно је присутан захтев за што мањим утрошцима енергије по јединици производа. У случају заварених конструкција, међу којима доминирају челичне, тај захтев условљава и увођење материјала знатно бољих својстава. Будући да се још увек при пројектовању конструкција узима у обзир јачина материјала, то значи да се увођењем челика повишене јачине добило на економичности конструкције у смислу коришћења мањих пресека што директно количину утрошеног материјала за израду конструкције. Међутим, све те предности су условне кад је у питању заваривање, будући да су ти челици добијени различитим термомеханичким процесима, при излагању термичким и деформационим циклусима услед заваривања нарушава се равнотежно стање материјала и структура постаје хетерогена што је непожељна појава. Због тога ови челици захтевају пажљиво одабране параметре заваривања и њихову доследну примену при заваривању.

Из свега горе наведеног произлази да успешно заваривање разматраног челика, са становишта добијања поузданог споја и очувања повољних механичких особина, није нимало једноставно. Постоји низ фактора који условљавају успешност процеса заваривања при чему је један од најбитнијих технологија заваривања. Правилно изабрана, технологија заваривања умногоме утиче на успешност извођења заваривања и на карактеристике добијеног споја. Главни проблем при заваривању челика из ове класе јесте њихова склоност ка образовању хладних (водоничних) прслина. Углавном се ти проблеми могу решити предгревањем, коришћењем аустенитних електрода, контролисаним уносом топлоте и у посебним случајевима накнадном термичком обрадом.

Прописивање технологије заваривање обухвата дефинисање најважнијих параметара чије испуњавање доводи до успешног спајања два радна предмета. У случају ове технологије, РЕЛ поступком се изводи наношење коренских пролаза, а МАГ поступком завари попуне. Подједнако важно прописати оптималне параметре за оба поступка како би спој (шав) имао најбоља могућа својства посебно из аспекта јачине и жилавости.

6.2.2 Технолошки поступак РЕЛ заваривања

РЕЛ се сврстава у поступке заваривања топљењем, помоћу топлоте ослобођене у електричном луку. Заштита растопа од штетног деловања гасова из околине (азот, кисеоник) остварује се помоћу облоге електроде. Струја заваривања може бити једносмерна и наизменична, јачине $25 \div 450 \text{ A}$, радног напона $15 \div 40 \text{ V}$ и брзине заваривања до 120 mm/min .

РЕЛ заваривање започиње успостављањем електричног лука између врха електроде и основног материјала. Лук топи странице основног материјала и электроду и ствара метално купатило које од ваздуха штити слој троске и гасова који потичу из

облоге. Лук се прекида када се електрода потроши и остане око 50 mm у клештима (држачу електроде). Троска се обија и заваривање наставља новом електродом.

6.2.3 Технолошки поступак МАГ заваривања

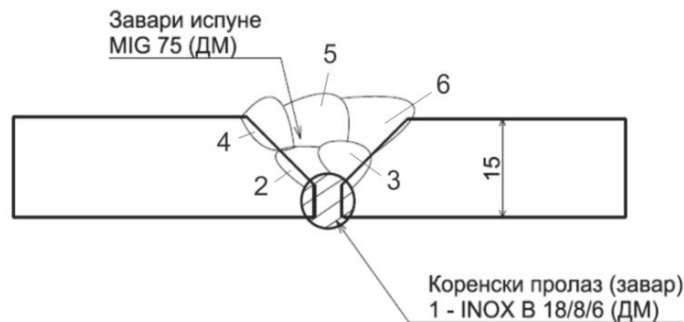
МАГ (Метал Активан Гас) или CO_2 - поступак заваривања спада у електролучне поступке заваривања топљењем који одликује, пре свега, велика брзина заваривања и могућност аутоматизације процеса. Опсег коришћених пречника електроодних жица је $0.8 \div 2.5\text{ mm}$. CO_2 је активан гас јер се у току заваривања, на високој температури ($T > 1600^\circ\text{C}$) разлаже на CO и O_2 . МАГ поступак се користи за заваривање нискоугљеничних и нисколегираних челика најчешће дебљине $0.8 \div 30\text{ mm}$.

Основне карактеристике МАГ поступка су [2]:

- заваривање је могуће у свим положајима;
- струја заваривања је у опсегу: $I = 40 \div 500\text{ A}$;
- напон заваривања је у опсегу: $U = 16 \div 35\text{ V}$;
- брзина заваривања од $v_z = 16 \div 60\text{ m/h}$;
- спољна карактеристика извора: равна (пад 2 V на 100 A), $U \approx \text{const}$.
- струја заваривања: једносмерна обрнутог поларитета ($E+$).

6.2.4 Технологија и параметри РЕЛ/ МАГ заваривања

Сучеони спој приказан на слици 6.2 изведен је технологијом заваривања која подразумева полагање коренског завара РЕЛ поступком, додатним материјалом мање јачине (мека легура) и наношења завара испуне МАГ поступком, са додатним материјалом веће јачине. То омогућава споју да поседује потребну јачину а истовремено и повећану жилавост, како на собним тако и на сниженим температурама. Међуслој има улогу да побољша заварљивост, умањује деформације и да „сними“ заостале напоне у споју. Завариване су плоче дебљине 15 mm . За међуслојну электроду изабрана је легура INOX B 18/8/6 састава: 19% Cr, 9% Ni, 7% Mn и $C < 0.12\%$. Њена јачина је $590 \div 690\text{ MPa}$ док је напон течења 350 MPa . Завари испуне се наносе електродом MIG 75 јачине $770 \div 940\text{ MPa}$ и напона течења 690 MPa .



Слика 6.2 Сучео́ни спој изведен технологијом РЕЛ/МАГ

Први корак у прописивању технологије заваривања јесте био процена заварљивости датог челика. Испитивањем заварљивости рачунским методама-прорачунавањем хемијског еквивалентног угљеника (СЕ) и склоности ка образовању прслина, и ослањањем на резултате аутора радова из ове области, процењено је да је овај челик условно заварљив. Условна заварљивост се односи на примену предгревања ($T_p = 150^{\circ}\text{C}$), коришћење аустенитних додатних материјала, заваривање поступцима и електродама који дају низак садржај водоника и тсл. Проблем заварљивости ових челика се односи, пре свега, на образовање најопаснијих грешака у завареним спојевима – хладних или водоничних прслина. Стога, прописана технологија заваривања мора да буде тако изабрана да се добије што хомогенији заварен спој у погледу механичких особина, са што мањом количином дифундованог водоника и по могућству избегавањем неповољне мартензитне структуре [1].

На основу препорука произвођача и искуства других аутора, одлучено је да се коренски завари полажу додатним материјалом аустенитне структуре мање јачине од ОМ, а да се остали завари (испуне и покривни) изводе додатним материјалом јачине сличне јачини ОМ. На тај начин коренски завари имају потребна својства пластичности, док се неопходна јачина споја постиже додатним материјалом јачине приближне јачини ОМ.

С обзиром на то да се ово поглавље бави избором оптималне технологије заваривања на основу АРА дијаграма, у њему ће бити приказани резултати испитивања тврдоће и микроструктуре карактеристичних зона завареног споја. Добијени резултати су затим упоређени са тврдоћама и микроструктуром дефинисаном КН дијаграмом за одговарајуће брзине хлађења. На слици 6.3 је приказан дијаграм континуалног хлађења у условима заваривања за челик S690QL, са уцртаним кривама хлађења за оба коришћена поступка заваривања.

Оријентациона оцена заварљивости и процена тврдоће и микроструктуре ЗУТ-а на основу КН-дијаграма за S690QL (сл. 6.3). Време хлађења у најкритичнијој температурској области између 800 и 500°C (звано $t_{8/5}$), се може израчунати и затим унети у КН-дијаграм који даје тврдоћу и микроструктуру ЗУТ-а. У случају сагласности очитане и стварно добијене микроструктуре и измерене тврдоће са експерименталним резултатима, може се знатно олакшати поступак избора оптималне технологије заваривања челика без извођења скувих и сложених експеримената.

Формула за израчунавање времена хлађења $t_{8/5}$:

$$t_{8/5} = \frac{k \cdot q_l^n}{\beta \cdot (T_{sr} - T_0)^2 \cdot \left[1 + \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left(\frac{s - s_0}{\alpha} \right) \right]}, \text{ s} \quad (1)$$

где су:

q_l – погонска енергија заваривања и J/cm,

T_0 – температура предгревања завариваних предмета у °C ($T_p = 150^\circ\text{C}$) и

s - дебелина завариваних плоча.

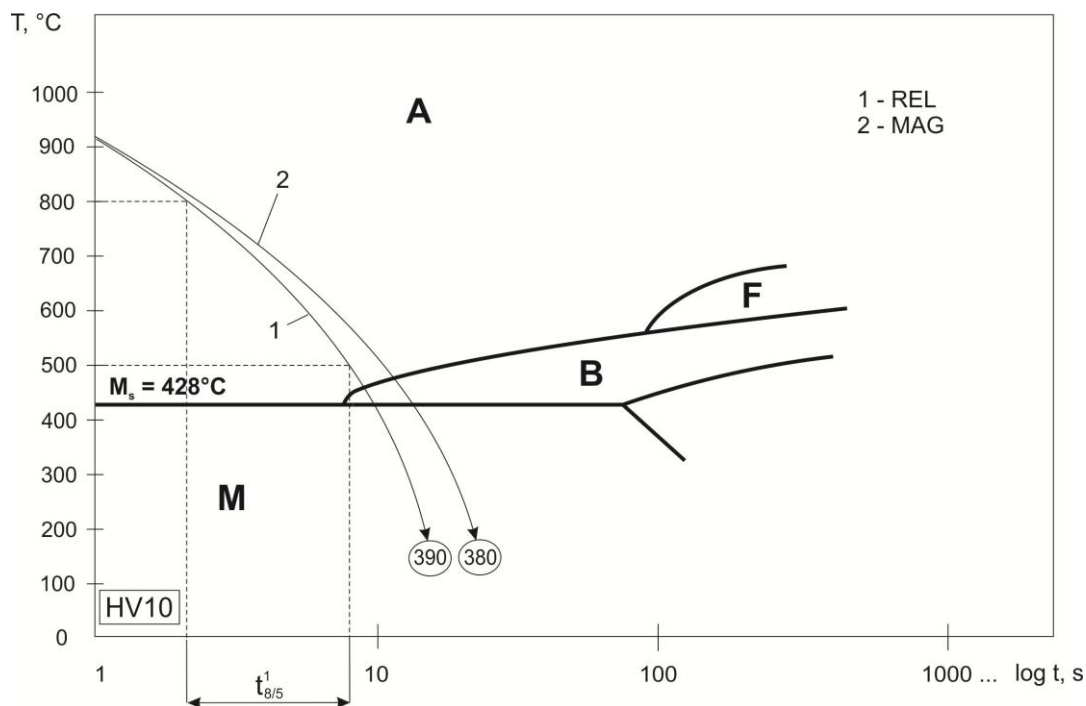
Остали подаци неопходни за прорачун времена $t_{8/5}$ се усвајају из одговарајуће литературе [2].

Таблице 6.5 Прорачунате вредности времена $t_{8/5}$ према изразу (1)

Поступак заваривања	$t_{8/5}$, s	Тврдоћа ЗУТ-а очитана са KHZ дијаграма, HV10	Структура
РЕЛ	8.4	400	М + Б
МАГ	15.9	380	М + Б

6.2.5 Теоријско одређивање заварљивости челика S690QL на основу КН дијаграма

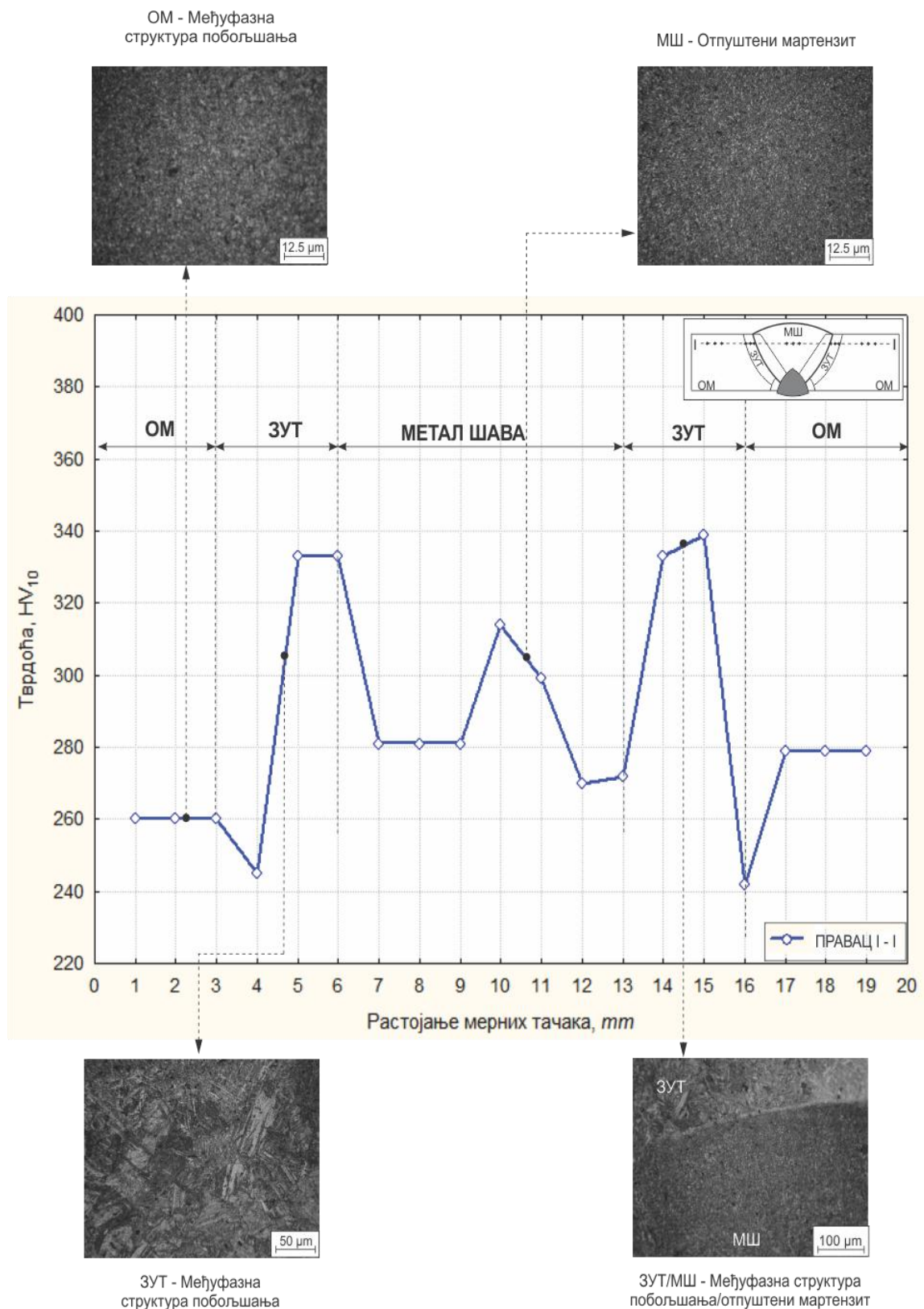
Када се прорачунска времена унесу у КНЗ-дијаграм челика S690QL, добијају се криве хлађења које показују очекивану тврдоћу за одговарајућа времена $t_{8/5}$ (слика 6.3). Сходно овом времену може се из дијаграма очитати и микроструктура ЗУТ-а. У дијаграм су унете криве хлађења за два поступка наношења коренских зава: РЕЛ и МАГ. Како би се извршила провера процењених вредности, задатак аутора је био да изведе експериментално мерење тврдоће и процену микроструктуре на узорцима узетим из заварене плоче, и да затим експериментално измерене вредности упореди са теоријским и одреди степен међусобне корелације.



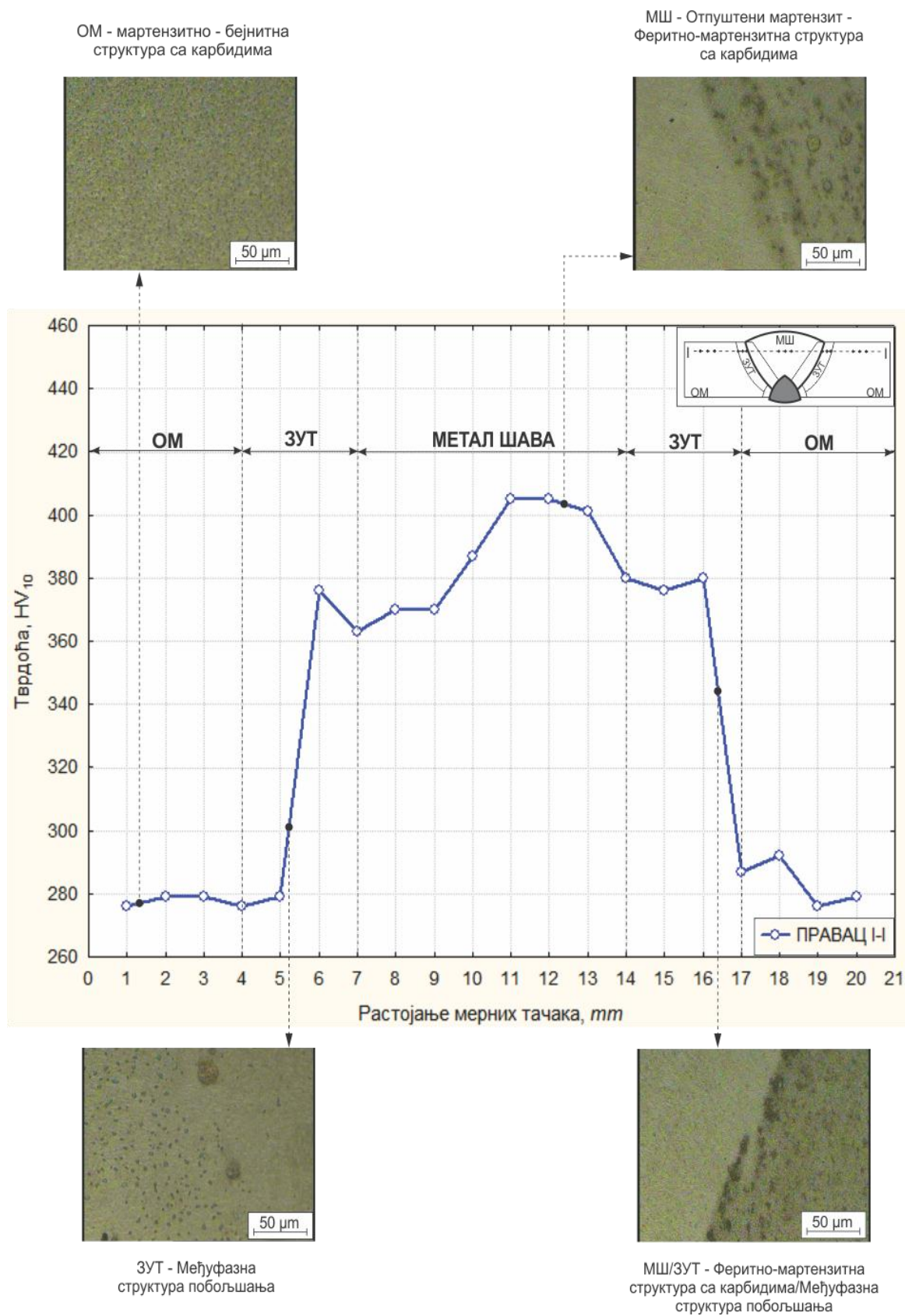
Слика 6.3 КН дијаграм за челик S690QL

Анализом наведеног дијаграма се јасно може закључити да *мартензит* настаје при укупном времену хлађења мањим од $t \approx 9 \text{ s}$ (v_{kr}) – „колено“ криве која означава бејнитну структуру. С обзиром на то, циљ је да се прописаном технологијом заваривања оствари унос топлоте (погонска енергија заваривања) q_l такав да време хлађења буде веће од критичног.

Прописаним параметрима заваривања је постигнуто да се избегне крта мартензитна структура, односно добија се мешовита бејнитно-мартензитна структура будући да се да су критична времена хлађења $t_{8/5}$ за оба коришћена поступка била 8.4 и 15.9 s (таб. 6.5).



Слика 6.4 Дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона (пример 1)



Слика 6.5 Дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона (пример 2)

На дијаграмима расподеле тврдоће се може уочити да је она у пределу ЗУТ-а и метала шава веома различита за разлику од основног материјала где је тренд кретања кривих уједначен. Пораст тврдоће и јачине у ЗУТ-у се може објаснити неравномерним процесима загревања и хлађења појединих зона споја, који одступају од температурских циклуса приликом добијања челика. Неравномерност механичких особина у различитим зонама завареног споја је последица неравномерног температурског поља и неповољних термичких циклуса. У зависности од количине унете топлоте, настаје неповратно нарушавање стања термомеханичке обраде, снижавања жилавости у ЗУТ-у и пада или пораста тврдоће у ЗУТ-у. Подручја смањене јачине и жилавости су критична места за настанак прслина и каснијег лома конструкције. Решавање тих проблема лежи у прописивању оптималног уноса топлоте и у правилно прописаној накнадној термичкој обради.

На испитиваним узорцима је дошло до евидентног пораста тврдоће у ЗУТ-у при чему се он ограничава на вредности које се сматрају граничним али дозвољеним из аспекта сигурности споја (350 – 370 HV10 за S690QL). У случају већих вредности тврдоће неопходно је применити накнадну термичку обраду у циљу уједначавања структуре и смањења опасности од појаве прслина.

Треба приметити и ниску тврдоћу метала шава коренских пролаза. Тако ниска тврдоћа је директно повезана са јачином додатног материјала чија је сврха да повећа пластичност споја и умањи заостале напоне док се јачина споја постиже заварима попуне. Тако изабрани додатни материјали доприносе побољшању заварљивости.

Уопштено се може рећи да је предложеном технологијом и режимима, овај челик заварљив јер је избегнуто добијање чисто мартензитне структуре (добијају се мешовите структуре побољшања - бејнит + мартензит) и јер је коначна тврдоћа на граници условне тврдоће за оцену заварљивости.

7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА И КОНТРОЛА ЗАВАРЕНОГ СПОЈА

У савременој индустријској производњи заварене конструкције заузимају веома важно место. У складу с тим и развој нових материјала и технологија иде у смеру оптимизације конструкционих и технолошких решења у циљу побољшања особина машина, уређаја, конструкција, уз смањење њихове тежине, масе и цене а повећања квалитета, продуктивности и продужења радног века.

Данас постоји широк асортиман конструкционих материјала који се могу употребити за израду различитих врста конструкција и делова машина. Будући да се у овом раду детаљније обрађују челици повишене јачине са посебним освртом на класу челика S690QL, треба поновити њихове главне предности, односно повишену јачину и напон течења, издужење, жилавост уз задржавање повољних својстава и на сниженим температурама, и веома повољан однос тежине и цене. Заваривање ових челика је олакшано у односу на челике који су по својствима отпорности у истој класи (нпр. побољшани или легирани челици). Свака заварена конструкција се састоји од великог броја спојева како сучеоних тако и угаоних. Иако на угаоне спојеве отпада и до 80% свих спојева, сучеони заварени спојеви су подједнако важни. Такође, и експериментална испитивања су углавном базирана на испитивању сучеоних спојева јер се сматра да уколико је прописана технологија дала повољне резултате на сучеоним спојевима да ће тако бити и при извођењу угаоних [3].

Дакле, заварени спој може бити изведен као угаони или као сучеони зависно од конструкције склопова али као главни циљ поставља се тежња да метал шава, ЗУТ-а и основни материјал буду приближних механичких особина. Одабраном комбинацијом додатних материјала, поступака и усвојеним параметрима заваривања изведено је више проба на карактеристичним угаоним и сучеоним спојевима.

7.1 Експериментална испитивања основног материјала

7.1.1 Испитивање затезањем

Циљ испитивања затезањем је да се одреде следеће карактеристике материјала:

- Затезна чврстоћа (јачина):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{MPa}, \quad (3)$$

- Релативно процентуално издужење:

$$A_5 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100, \%, \quad (4)$$

- **Техничка граница течења :**

$$R_p = \frac{F_p}{S_0} \text{ или } R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0}, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где је:

F_m – максимална сила у N ,

S_0 – површина почетног попречног пресека узорка у mm^2 ,

Δl – издужење прекинуте епрувете у mm ,

$F_p (F_{0.2})$ – сила на граници течења у N и

l_0 – почетна дужина пробе у mm .

Испитивање затезањем може показати квалитет изведеног завареног споја. Уколико се лом епрувете деси у зони споја (МШ, ЗУТ) можемо закључити да је заварени спој најслабија карика у систему и обрнуто, уколико се лом деси ван зоне завареног споја- на основном материјалу, то представља најповољнији случај и указује да је примењена технологија заваривања оптимална. Посао инжењера заваривања јесте обезбеђивање добијања управо таквог завареног споја – споја који неће бити најкритичније место на конструкцији и место највероватније појаве лома [3].

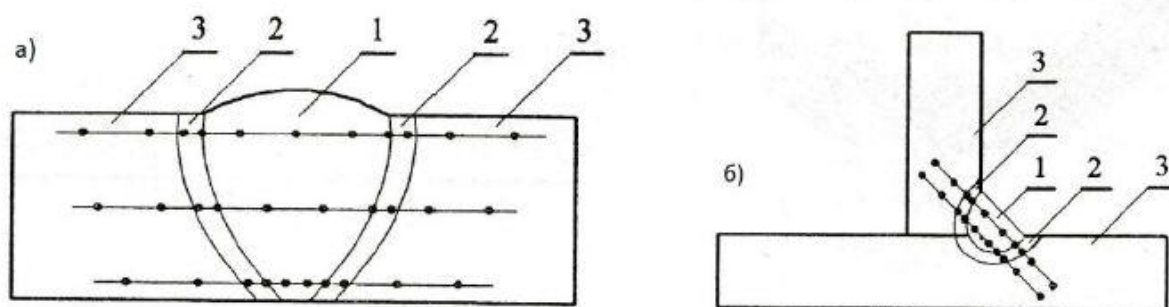
7.1.2 Мерење тврдоће

Тврдоћа представља механичку особину материјала да се одупре продирању другог тела у њега. Тврдоћа директно зависи од структуре материјала (мартензит и доњи бејнит одликује висока тврдоћа). У појединим областима машинства висока тврдоћа је примарно захтевана особина челика, међутим када је реч о динамички оптерећеним конструкцијама висока тврдоћа је непожељна. Разлог за то је пропорционално повећање опасности од настанка прслина и кртог лома са порастом тврдоће. Постоји и констатација да су тврдоћа и жилавост материјала у директној вези. Међутим, за ту тврдњу је доказано да није потпуно тачна али да постоји висок степен корелације те две механичке особине челика. Свакако се може рећи да са порастом тврдоће долази до пада ударне жилавости и обрнуто. Тврдоћа челика у свим зонама треба да буде што уједначенија, тј. да одступања у вредностима која се јављају, а која су изазвана, најчешће, уносом топлоте при заваривању, тј. неравномерним загревањем и хлађењем, и односе се на ЗУТ, треба да буду што мања.

Главни разлог због којег се тврдоћа ограничава јесте да се спрече хладне прслине. Зато се за челике са $CE > 0.40\%$ мора смањити брзина хлађења и снизити садржај водоника у металу шава. Брзина хлађења се смањује предгревањем делова, повећањем погонске енергије (уноса топлоте) и повећањем пречника електроде, док се садржај водоника смањује сушењем електрода, чишћењем страница завариваних делова од рђе, боје, масти и тсл.

Тврдоћа се мери у више праваца и на више места јер тврдоћа измерена на једном месту не може да буде у потпуности меродавна. Број праваца зависи од дебљине завариваних делова док се мерна места обично бирају тако да обухвате све карактеристичне зоне са по најмање 3 мерне тачке (слика 7.1). На сучеоним спојевима дебљине веће од 15 mm тврдоћа се мери у три правца: у близини лица, у средини и у

близини корена шав. За спојеве дебљине $5 \div 15 \text{ mm}$ мерење се изводи у два правца и за лимове тање од 5 mm тврдоћа се мери само по средњој линији. Већи број мерних тачака значи и меродавније и поузданије резултате.



Слика 7.1 Мерење тврдоће: а) сучеони спој дебели од 15 mm , б) угаони шав "Т" споја

7.1.3 Испитивање микроструктуре

Одређивање (процена) микроструктуре материјала се изводи на основу металографских испитивања. Металографска испитивања заварених спојева имају за циљ одређивање и анализирање микроструктуре карактеристичних зона споја – метала шав, зоне утицаја топлоте и основног материјала. У зависности од тога колико пута се увећава снимак узорка разликујемо *макроскопска* и *микроскопска* металографска испитивања:

- Макроскопска испитивања се изводе голим оком или при увећању до 20 пута малог узорка исеченог из завареног споја. Притом се контролишу шав, ЗУТ и основни материјал. Површине се брусе и полирају, а затим се нагризају специјалним хемијским средством што омогућава да се уоче метал шав, ЗУТ и основни материјал. На основу ових испитивања утврђују се линија стапања, микроструктура ЗУТ-а, недовољно или превелико уваривање, порозност, укључци троске, хладни спојеви и др. Утврђују се и микроструктура шав, ЗУТ-а и основног материјала, ширина ЗУТ-а као и микроструктура свих зона.
- Микроскопска испитивања се заснивају на анализирању припремљених узорка са увећањем од $200 \div 500$ пута (па и више). Изводе се на металографским микроскопима. Посматра се: средиште шав, зона стапања, зона непотпуног топљења, зона прегревања, зона нормализације, зона рекристализације, као и непромењен основни материјал.

7.2 Контрола завареног споја

Када се изврши заваривање конструкције или подструктуре, како би се утврдило стање заварених спојева и њихов квалитет, спроводи се целокупна контрола без разарања. Контрола заварених спојева има веома значајну улогу у процесу производње заварених конструкција јер се на основу ње процењује стање конструкције и њена радна способност. Имајући то у виду, контролу можемо поделити у три класе,

које уједно представљају и ниво захтева које конструкција мора да испуни. Према стандарду SRPS EN ISO 5817:2008 постоје три класе квалитета заварених спојева:

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

Дакле, при изради заварених конструкција, у завареним спојевима се појављују мање или веће грешке, па је задатак контроле да утврди облик, распоред, врсту и величину грешака и то како оне утичу на поузданост конструкције. Све се то веома прецизно дефинише горе поменути класама квалитета. Овде треба напоменути и то да контрола појединих заварених конструкција може надмашити и цену израде те конструкције.

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 врсте спадају: посуде под притиском, резервоари, парни котлови, друмски и железнички мостови, бродови, дизалице, шасије аутомобила и камиона и др.

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

Класа D обухвата мање одговорне заварене конструкције типа малих резервоара и ниско-пропусних цевовода, металне ограде, нискооптерећене конструкције, предмете декоративне природе и тсл.

Поред наведене поделе, контрола у зависности од времена њеног спровођења, може бити претходна, текућа и завршна контрола.

Претходна контрола има за циљ да, пре почетка заваривања, провери најважнија својства основног и додатног материјала, исправност опреме за заваривање и мерних инструмената, избор режима заваривања, као и квалификацију заваривача.

Текућа (процесна) контрола утврђује да ли се произвођач придржава предвиђене технологије и режима заваривања, каква је исправност опреме и инструмената као и мере заштите на раду.

Завршна контрола обухвата контролу димензија и спољашњег изгледа шави, контролу унутрашњих грешака и структуре као и контролу механичких својстава (тврдоћа, жилавост, јачина на кидање и др.).

Код веома одговорних конструкција, као што су конструкције израђене од разматраног челика класе S690QL, не дозвољава се присуство никакве врсте грешака. Разлог је висок степен оптерећења конструкције у току експлоатације, када чак и најмања присутна грешка може изазвати хаварију и довести до губитка људских живота и високе материјалне штете [3].

У испитивања без разарања спадају: *визуелна контрола, испитивање пенетрантним течностима, пробе непропустљивости (херметичности), радиографске пробе (рендгенским x и γ -зрацима), магнетна и ултразвучна метода.*

7.2.1 Визуелна контрола

Иако је шав лепог изгледа не мора да значи да нема грешака па се с обзиром на то контрола без разарања започиње очним прегледом готовог споја. Визуелно испитивање је најстарија, и најчешћа метода за испитивање материјала без разарања. По свом извођењу је врло једноставна, лако и брзо се изводи, и јефтина је. Чак и ако се изводи нека друга метода испитивања, пожељно је да се прво изврши визуелни преглед.

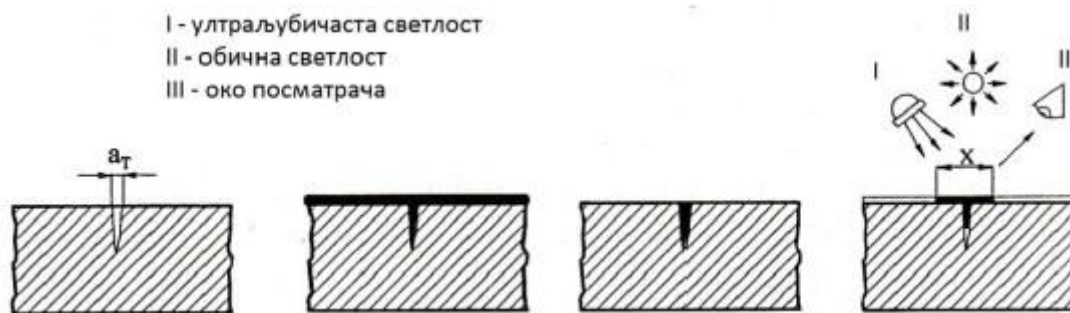
Визуелни преглед, као основна метода контроле без разарања, уз примену различитих уређаја, најчешће оптичких, нашла је своје место у откривању спољних грешака. Ови уређаји имају веома високу прецизност, а са друге стране су једноставни за употребу. У ове уређаје спадају огледала, лупе, призме, бороскопи и различита мерила и мерни инструменти. Савремени уређаји који се користе су CCD камере у комплексу са видео рекордером и микропроцесором. Визуелна испитивања се најчешће примењује за коване производе, одливке и заварене спојеве. Основне карактеристике предмета контроле које утичу на визуелни преглед су: чистоћа површине, боја светлости на површини објекта који се испитује, облик испитиваног објекта, температура објекта, атмосфера.

7.2.2 Испитивање пенетрантима

Пенетранти су течности мале вискозности које имају способност да продиру у површинске дисконтинуитете грешке на материјалу. Када се са површине узорка уклони вишак пенетраната који је изашао из дисконтинуитета (тај процес додатно подстиче супстанца која се зове развијач) на местима дисконтинуитета ће остати боја. Избијање пенетранта на површину узорка се зове пенетрантска индикација и она представља стварни недостатак у материјалу. Сврха контроле материјала са течним пенетрантом је да открију области отворених оштећења као што су прсине и порозност. Пенетрантска контрола се може обављати на различитим материјалима као што су алуминијум, све врсте челика, бакра, титанијум, као и керамике и пластике.

Карактеристика пенетраната је да се веома лако шири преко површине узорка због доброг квашења, што је пожељна особина пенетраната. Величина грешке која може да се открије зависи од тога како је квашење пенетранта у материјалу, и од капиларног ефекта подизања који извлачи пенетрант из пукотине. Пенетрирајући у пукотину он изазива капиларни ефекат.

Пенетрант је у ствари течност црвене боје и мале вискозности или течности са додатком флуоресцентних материја. Испитивана површина се накваси пенетрантом и на местима прсина се појављују изразито црвени зарези чија ширина указује на дубину прсине. Ово је најстарији начин контроле заварених спојева.



Слика 7.1 Схема капиларне дефектоскопије

7.2.3 Испитивање херметичности (непропустљивости)

Контрола херметичности - цурења (LT метод) се користи да одреди да ли течност или гас продире са унутрашње на спољашњу страну система (компоненте), као резултат разлике притиска између те две области. LT метод се класификују према притиску и течности у систему. Обично се примењују методе:

- акустична детекција рупа,
- контрола мехурићима,
- детекција протока,
- специјални детектори гаса и
- одређивање величине губитака.

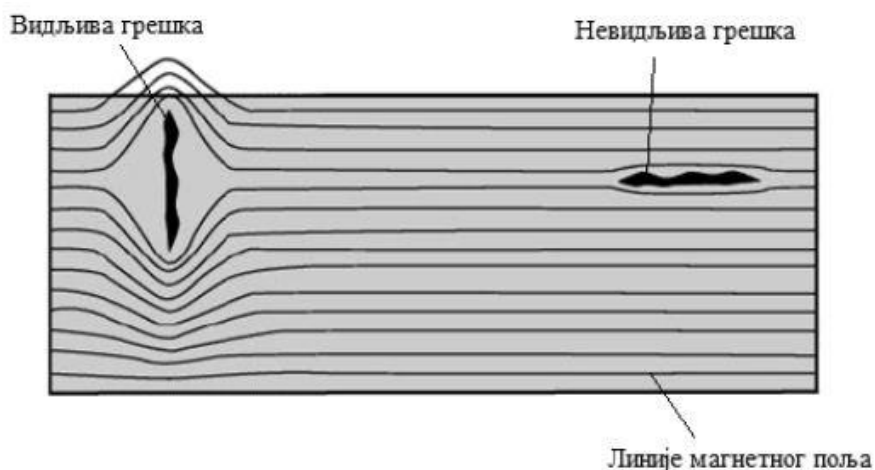
LT метод се реализује стварањем вакуума или притиска у деловима (систему), и коришћење индикатора, који се користи за детекцију положаја и величине отвора. Главни фактори који одређују избор LT методе су физичке карактеристике система, индикатор течности, величина предвиђене рупе и разлог за контролу, било да се открије или пронађе рупа, или да се мери количина грешака. LT се могу користити у различитим системима, али најчешће за системе као што су: размењивачи топлоте, парне машине, судови под притиском, итд. Ако рупа проводи течности са једне на другу страну, LT метода детектује ту течност у одређеном притиску и открива да пролази на другу страну.

7.2.4 Магнетна испитивања

Овај метод контроле се користи за откривање неправилности на површини или испод површине на дубини до 6 mm само код феромагнетних материјала. Наношењем феромагнетних честица и успостављањем магнетног поља, честице имају тенденцију да се акумулирају на местима где је дошло до расипања магнетног поља, при чему се формира видљива магнетна индикација. Метода се заснива на принципу да када се феромагнетни материјал намагнетише, грешке које се налазе попречно на правац магнетног поља индукују преоријентацију линија поља око дисконтинуитета. Када феромагнетне честице нанесемо на површину узорка који је намагнетисан, честице се распоређују дуж линије магнетног поља. Свако одступање од правца одмах се појављује као неправилност у скупу честица (сл. 7.2). На овај начин се добија положај, облик и величина грешке. За већу осетљивост и уочљивост се користе флуоресцентне

честице. Веома је важно да се правац магнетног поља усмери управно на грешку јер уколико се правац магнетног поља поклопи са правцем грешке она неће бити детектована. Како у пракси не знамо положај могућих грешака испитивање се најчешће изводи у два међусобно управна правца.

Код широких површинских оштећења неће се приказати грешка индикације, ако честице не могу да премосте грешку. Код мањих и оштрих неправилности које су заробљене испод површине узорка, као што су неметални укључци, индикација је врло јасна.



Слика 7.2 Магнетна дефектоскопија

Постоје два метода магнетне дефектоскопије и то:

1. Континуирани и
2. Резидуални.

Континуални метод подразумева да при контроли магнетним честицама које су распоређене на површини узорка при чему се магнетни флуks (ток) успостави а потом прекине. На тај начин ће доћи до нагомилавања честица око дисконтинуитета на материјалу. Континуирани метод се користи за нискоугљеничне челике или метале са слабом магнетизацијом.

Резидуални метод функционише по принципу заосталог магнетизма. Резидуална метода може да се користи само на материјалима који су довољно добро магнетични. Обично су тежи материјали више магнетични.

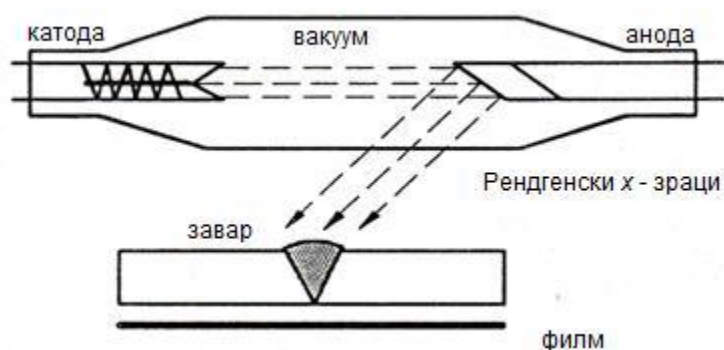
Уколико до појаве водоничних прслина ипак дође, препорука је да се завар пребруси и изглеби до краја и репарира шав. Код динамички оптерећених конструкција прслине се могу ширити и на крају довести до разарања конструкције. Будући да су челици класе S690QL веома дуктилни, заморни лом неће настати код тањих плоча. Такође, утицај прслина на отпорност конструкције може се проценити применом *Механике лома*. С обзиром на то да су та сазнања теоријске природе, закључујемо да је репаратурно заваривање најбоља и најсигурнија мера коју треба предузети. Мале прслине у некритичним зонама конструкције, чији лом неће изазвати озбиљне последице, се могу прихватити.

7.2.5 Радиографска испитивања

За откривање унутрашњих грешака у завареном споју највише се примењују рендгенски зраци (*Röntgen* - *x*-зраци, 1895. год.) и γ -зраци. Контрола се заснива на особини јонизујућег зрачења да пролази кроз материјале који су непропустљиви за обичну и видљиву светлост.

Ово је најраспрострањенија метода за испитивање без разарања, за откривање унутрашњих дефеката у материјалу, као што су порозност и шупљине. Коришћењем правилне оријентације радиографског зрака могу се открити раванске грешаке. Такође, се користи за откривање промена у саставу материјала, мерење дебљине, и за лоцирање нежељених компоненти производа. Главна предност коришћења јонизујућих зрачења у испитивању без разарања је широка област примене, од микро електронских делова до великих објеката као што су бродови. Још једна од предности радиографије је што може да се користи за све врсте метала, од алуминијума, берилијума, магнезијум, преко челика, никла, до тешких елемената. Испитивање обухвата одливке, заварене спојеве, композитне материјале и везивне елементе.

Радиографија је врста испитивања, при којој се показују разлике на фотографском филму приликом проласка зрака кроз материјал. При класичној радиографији, испитивани објекат прозрачујемо са x или γ -зрацима. Део зрачења апсорбује објекат, а остатаком се прозрачи филм. При прозрачавању са рендгенским зрацима, јавља се у фотографској емулзији филма, који се састоји од желатина и молекула $AgBr$, јонизација при којој долази до попуштања везе између сребра и брома. Тада се ради о латентној слици. Тек када се експонирани филм урони у раствор хемикалија (развијач), редукује се јон сребра из молекула $AgBr$ до метала сребра.



Слика 7.3 Схема испитивања x -зрацима

7.2.6 Ултразвучно испитивање

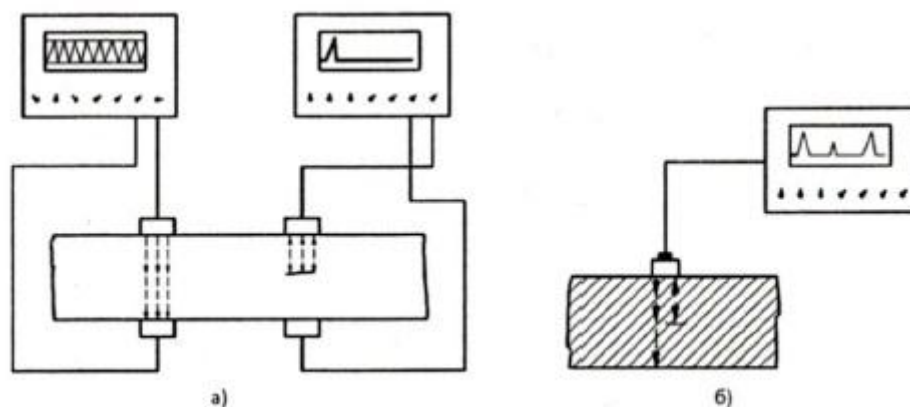
Ултразвучно испитивање материјала је просторна метода контроле унутрашње хомогености материјала и објеката на дубини од 1 до 2000 *mm*. Припада методама испитивања без разарања у коме се високофреквентни ултразвучни таласи уводе у материјал са циљем откривања унутрашњих грешака у материјалу. При проласку кроз материјал, звучни таласи се одбијају од граничних површина, при чему губе енергију.

Одбијени сноп звучних таласа се детектује, а затим анализира у циљу утврђивања присуства грешака. Звучни таласи се у потпуности рефлектују од граничне површине метал - гас, али само делимично од граничних површина метал - течност и метал – чврсто тело. Грешке, као што су пукотине, рупе, налепљивање, поре и грешке у

везивању, понашају се као што је подручије метал - гас и релативно се лако откривају. Укључке и друге нехомогености у материјалу откривамо са делимичном рефлексијом звучних таласа али и од распршених ултразвучних таласа (ехо). Ултразвучно испитивање се интензивно користи код заварених спојева, мерења дебљине материјала, одређивања корозионих утицаја, одређивања физичких карактеристика, микроструктуре, величине зрна у еластичним деловима. При томе се користе фреквенције од 1 – 25 MHz (најчешће 1 - 6 MHz). Ултразвучни таласи на основу тога како осцилују честице у медију кроз који пролазе могу поделити на: уздужне (лонгитудиналне), попречне (трансверзалне) и површинске.

Ултразвучни таласи се генеришу од стране пиезоелектричног сензора, који претвара електричне сигнале високе фреквенције у механичке вибрације, и који се специјалним сондама преносе на претходно уљем премазану површину испитиваног споја. Постоје две методе ове контроле: метод пригушења и ехо-метод. Код метода пригушења, давач и пријемник таласа се постављају са супротних страна узорка. На местима дефекта сигнал незнатно слаби (пригушује се), а од веће сигнал се одбија.

Методама ултразвучне контроле могу се открити све унутрашње грешке у завареним спојевима као и разлиставање (ламеларно цепање) дебелих лимова. Овако се откривају дефекти мањих димензија него другим методама али је потребан висок ниво специјализације радника за правилно читање слике на екрану.



Слика 7.4 Ултразвучна контрола: а) метод пригушења, б) ехо-метод

8. ЗАКЉУЧАК

Заваривање челика повишене јачине је могуће извести уобичајеним поступцима заваривања топљењем, при чему се добијају заварени спојеви одговарајуће јачине, тврдоће и жилавости који се са аспекта хомогености не могу упоређивати са својствима неког основног материјала, мада су те особине доста сличне особинама основног материјала, што је и главни циљ. Споменути челици се намећу као општеприхваћени конструкциони материјали за израду високо одговорних конструкција које се користе у најразличитијим сферама живота. Разлози за њихову све већу примену су сасвим оправдани, а огледају се у релативно ниској цени, доста добрим механичко-металуршким особинама, смањеној тежини, побољшаној заварљивости, повећаној тврдоћи, отпроности на хемијске утицаје и тсл. Челици повишене јачине се користе за израду челичних конструкција са повећаним захтевима као што су: цевоводи високог притиска, мостови, цистерне, пароводи, железнички вагони, делови војних возила и авиона, кранови, индустријске пресе и др.

Добијање челика повишене јачине условљено је применом комплексних комбинација металуршких и термомеханичких процеса, па је од посебног је значаја очување њихових повољних особина за време заваривања. У овом раду дата су нека општа објашњења везана за проблематику заварљивости ових челика. Посебно су анализирани :

- преглед метода добијања врста челика повишене јачине;
- уштеде у маси конструкције;
- повољни економски ефекти примене ових челика;
- поступци добијања микролегираних челика;
- могућности повећања напона течења, као и утицај појединих микролегирајућих елемената на структурне преображаје у челику а све због побољшања њихових својстава;
- прописивање најповољније технологије заваривања челика S690QL;
- заварљивост челика S690QL на основу КН дијаграма

Циљ рада је био да покаже да ли се процена заварљивости и избор технологије заваривања може извести и на основу КН дијаграма. У случају челика S690QL закључено је да је то могуће што су показала и експериментална испитивања микроструктуре и мерење тврдоће. Постигнута је велика сагласност експерименталних резултата са теоријским на основу одговарајућег КН дијаграма. На овај начин је могуће скратити време процене заварљивости и прописивање технологије заваривања па се мукотрпне и скупе експерименталне процедуре могу избећи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В. Ратковић Н.:** *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [2] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања- приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1996.
- [3] **Арсић Д.:** *Оцена заварљивости и избор најповољније технологије заваривања челика повишене јачине класе S690QL* – мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2013.
- [4] **Ђорђевић Д.:** *Оцена технолошко – металуршке заварљивости челика повишене јачине – специјалистички рад*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [5] **Јовановић М., Лазих В.:** *Технологија ливења и заваривања – скрипта*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [6] **Милановић В.:** *Оцена заварљивости челика повишене јачине на примеру челика S690QL-* мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2013.
- [7] **Јовановић, М., Лазих, В.:** *Упутство за заваривање челика WELDOX 700*, Машински факултет, Крагујевац, 2008.
- [8] **Јовановић М., Лазих В.:** *Рукопис предавања – Машински материјали*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, школска 2012/2013.