

**УВОДНО ПРЕДАВАЊЕ**

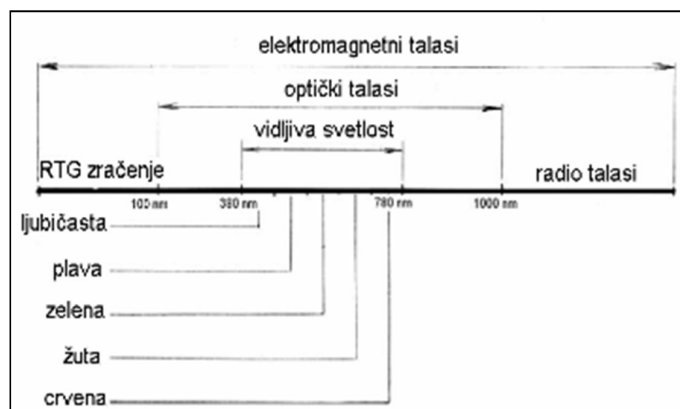
- **МИКРОСКОПИЈА**
- **ЛОМОВИ**

др Гордана Бакић, ван.проф.

- **1. Основе микроскопије**

Прва конструкција уређаја за посматрање ситних детаља и предмета, односно микроскопа (микрон – мали и скопос – посматрач), је направљена још у средњем веку по идејама које потичу још из Старе Грчке. Проналазач микроскопа је холандски оптичар Захаријас Јансен из Миделбурга (1590.год.) који је открио да се са два обострано конвексна сочива добија увећана слика ако се поставе на одређеном растојању. Постављањем сочива у металну цев направљен је први оптички микроскоп. Ова начелна конструкција је до данашњих дана задржана, с тим што је модернизована употребом других проводника светлости као што су *призме и огледала*, уз данас неизбежни додатак за дигитализацију слике, тако да максимална повећања која се постижу оптичком микроскопијом износе око 1000x, а уз дигиталну подршку до 5000x. Основна особина **оптичке микроскопије** је да користи видљиви део оптичког зрачења за посматрање и да нема могућност дубинског посматрања.

Код микроскопа битан појам је **резолюција**, односно најмање растојање између две тачке при коме се оне распознају као раздвојени објекти. Резолуција је одређена таласном дужином снопа који се користи за преглед узорка и износи око 1/2 таласне дужине. Код светлосног микроскопа за осветљавање узорка се користи снап видљиве светлости која обухвата таласне дужине од 380-780 nm, сл. 1, тако да резолуција износи око **500 nm**. Ипак, детаљи узорка који се посматра не могу да се распознају ако су мањи од таласне дужине осветљавајућег снопа због појаве дифракције и интерференције који стварају сенку, тако да плави део спектра има бољу могућност распознавања детаља од црвеног због мањих таласних дужина.



Слика 1: Спектар електромагнетних зрачења

Велики напредак у могућности достизања већих повећања је постигнут када је светлосни зрак замењен снопом електрона, па је ова техника испитивања добила назив **електронска микроскопија**. Код електронског микроскопа се уместо видљиве светлости и оптичких сочива за добијање увеличане слике објекта користи снап електрона који се усмерава и фокусира уз помоћ електромагнетног поља.

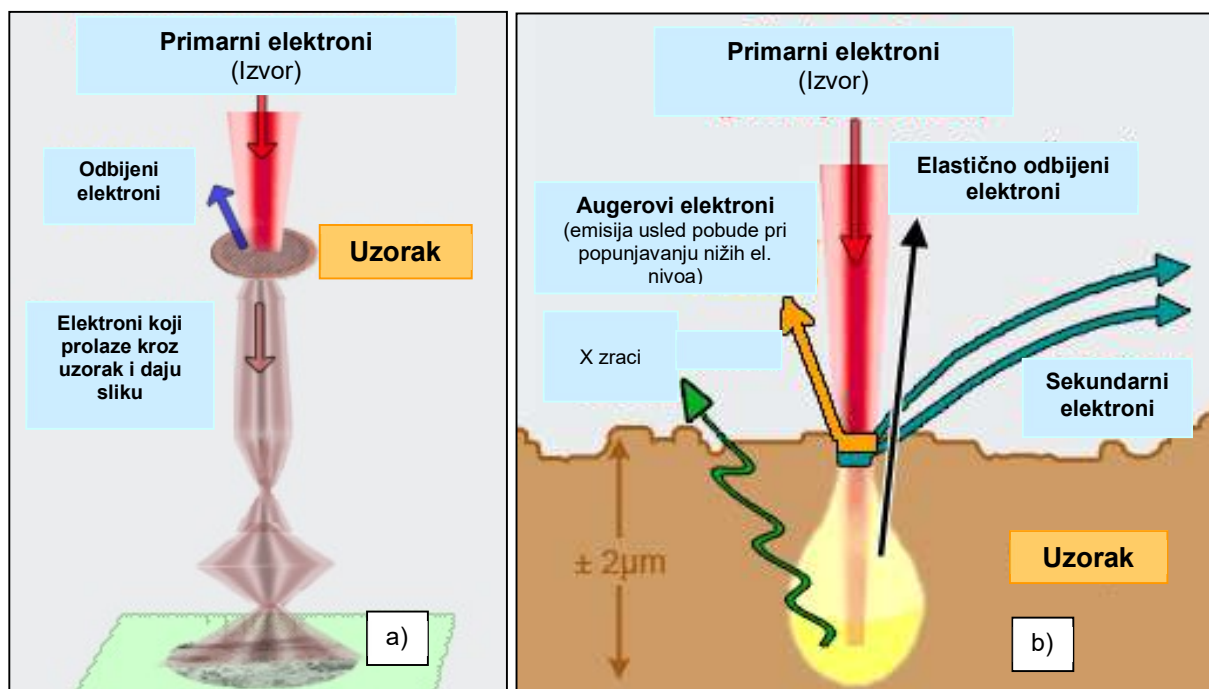
Код електронских микроскопа електрони који се крећу и осветљавају површину узорка имају таласну и материјалну природу, тако да се таласна дужина електронског снопа мења са брзином кретања електрона (*Де Броглие-в закон:  $\lambda = h/m_e v$ ;  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$* ). На пример, за распознавање објекта величине  $10^{-9} \text{ m}$  (1nm), потребно је на њега усмерити електроне који имају брзину приближно  $100.000 \text{ ms}^{-1}$ . Убрзавање електрона до тако великих брзина захтева велики напон - од 50.000-100.000 V, а електрони при овим напонима постижу таласну дужину од 0.55 - 0.39 nm. Електронски микроскоп има око 100 пута већу резолуцију од светлосног микроскопа, постиже увећање до 100.000 пута и неопходан је за објекте који се налазе на

растајању мањем од 100nm. Код снопа електрона није могуће користити оптичка сочива, па се снап фокусира магнетним пољем које стварају магнетни калемови. Да би се спречило расипање електрона и јонизација ваздуха, у кућиштима микроскопа где се налази узорак мора да се оствари висок степен вакуума.

**Технике електронске микроскопије.** Две основне технике електронске микроскопије су:

- TEM – трансмисиона електронска микроскопија код које се посматра узорак који је врло мале дебљине, практично танка фолија, и који се прозрачује електронским снопом
- SEM – скенирајућа електронска микроскопија код које је узорак масивнији, електронски снап прелази преко узорка („скенира“ га) и изазива реакцију која доводе до различитих емисија електрона и таласа.

Код обе технике примењује се електронски снап за добијање слике, али за стварање слике се користе различити механизми, слика 2. TEM обликује слику помоћу електрона који се пропуштају кроз узорак, док SEM скенира површину узорка, а слика добија облик детекцијом електрона који се емитују са спољашње површине узорка што даје утисак дубине (3Д).

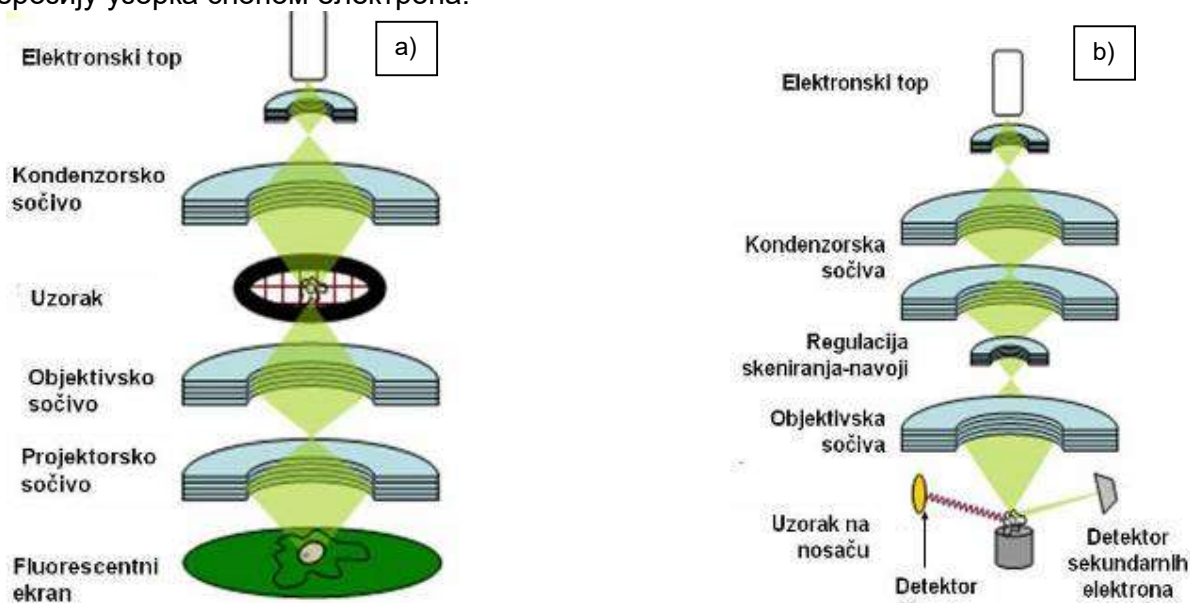


Слика 2: Механизми стварања слике код: а) TEM; б) SEM

**TEM.** Основни делови TEM су смештени унутар главне микроскопске колоне – металног цилиндра у коме је вакуум, слика 3а, а као извор електрона се користи тзв. *електронски топ*: извор електрона је катода, ужарена волфрамова нит или ужарени кристал *лантан-хексаборида* превучен слојем *цирконијум-оксида*. Применом овог електронског топа може да се добије врло узак снап електрона, што одређује високу резолуцију микроскопа. Емитовани електрони убрзавају се према аноди која има функцију пропуштања електрона тачно дефинисаних енергија. Електронски снап фокусира се системом електромагнетних сочива (калемова) смештених у средишњем делу микроскопске колоне и прозрачује узорак а електрони који су „прошли“ узорак падају на флуоресцентну површину која омогућује емисију видљивом спектру светлости. Код TEM узорак за анализу мора да буде у облику танке

фолије (<100 nm), да би електрони примарног снопа могли да прођу кроз узорак. TEM се углавном користи за анализу унутрашњих структура узорака (виде се дислокације).

**СЕМ.** И основни делови СЕМ су смештени унутар колоне, слика 3б. Скенирање површине се остварује прелажењем уског снопа (примарних) електрона преко површине узорка. Слику дају секундарни електрони који су дислоцирани – избачени са површине скенираног узорка након бомбардовања примарним електронским снопом, слика 2б. Секундарни електрони долазе до детектора (позитивног наелектрисања) где се индукује електрични сигнал који се појачава и дигитализује, а на екрану се појављује топографска слика површине испитиваног објекта-површина металног омотача објекта. Осим секундарних електрона и други облици емисије са узорка могу да се анализирају специфичним детекторима (X зраци, катодолуминесценција, рефлектовани електрони итд.). Оштрина слике зависи од јачине сигнала са узорка (енергија секундарних електрона). Примарни електронски снап се фокусира на узорак и прелази тачку по тачку, линију по линију. Интеракција примарног електронског снопа и узорка, слика 2б), даје сигнал, односно слику. Површина узорка се анализира снопом електрона одређеног пречника (нпр 10nm), а сигнал се преноси на монитор знатно веће површине чиме се добија велико повећање. Сваки узорак мора да проводи струју па се површина уобичајено превлачи танким слојем угљеника, злата или платине (2nm), што истовремено спречава акумулацију наелектрисања и ерозију узорка снопом електрона.



Слика 3: Основни делови електронског микроскопа: а) TEM; б) СЕМ

У табели 1 дате су основне карактеристике светлосног, СЕМ и TEM микроскопа.

Табела 1 Основне карактеристике светлосног СЕМ и TEM Микроскопа.

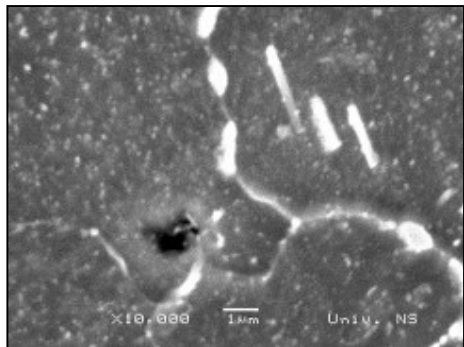
Карактеристика	Тип микроскопа		
	Светлосни	TEM	СЕМ
Резолуција, nm	500	10	2
Мах резолуција, nm	100	0.5 *	0.2
Увеличање	до 1500X	до 300.000X	~ 100.000X
Дубина прегледаног поља	слаба	променљива	висока
Припрема узорка	једноставна	сложена	једноставна
Дебљина узорка	средња	Изузетно мала	променљива

Видно поље	релативно велико	ограничено	велико
Извор зрачења	видљива светлост	електрони	електрони
Медијум	ваздух	вакуум	вакуум
Сочива	стаклена	електромагнетна	електромагнетна
Фокусирање	механичко	е.м. калемовима	е.м.калемовима
Подешавање увећања	преко објектива	е.м.калемовима	е.м.калемовима
Добијање слике - контраст	разлика у количини одбијене светлости	скретање електрона	скретање електрона
* стално се развија – у овом тренутку могућност XRTEM је 0.5 Å (0.050 nm)			

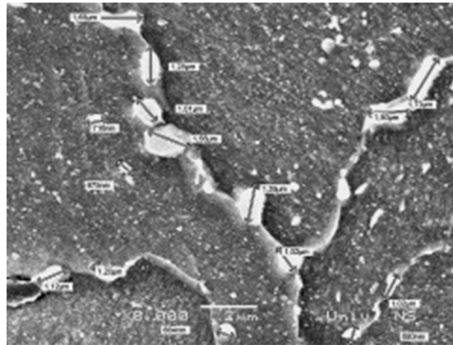
### Пример А:

#### Анализа топлотно постојаног челика 1Cr0.5Mo0.3V после 170000h рада

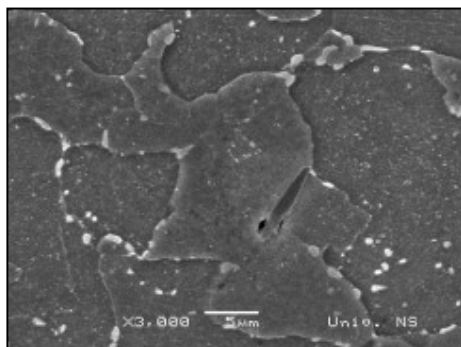
Микроструктура узорка који је био у експлоатацији 170000h, са величином зрна №6-7, слике А1 (а-ф) и А2 (а-д) се одликује великим степеном деградације, односно сфероидизацијом. Фазе које су присутне код испитиваног узорка чине ферит и карбиди. Феритно зрно је неједначене величине због миграција граница зрна и њиховог срастања. Карбидна фаза је углавном издвојена у појасу бивших граница зрна (субгранице - граница је мигрирала) и по тренутним границама зрна, као и на границама неметалних укључака. Морфологија карбида је штапићаста (карбиди већински на бази Cr и Fe типа  $M_{23}C_7$ , дужине до  $2.5\mu m$ ), или неправилног облика (величине до  $1.5\mu m$ ) што такође одговара карбидима са већинским уделом хрома, као и сочиваста, карактеристична за карбиде на бази молибдена.



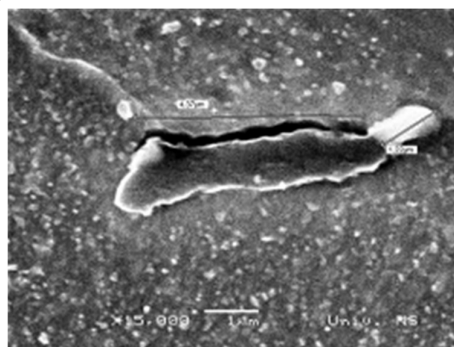
а)



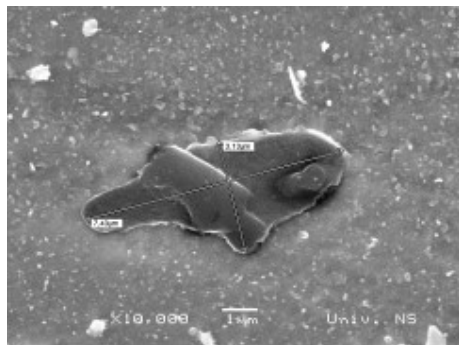
б)



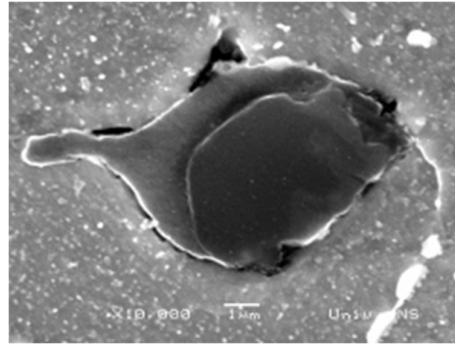
ц)



д)



е)



ф)

Слика А1(а-ф). Микроструктура узорка 12Х1МФ који је провео у експлоатацији 170000h

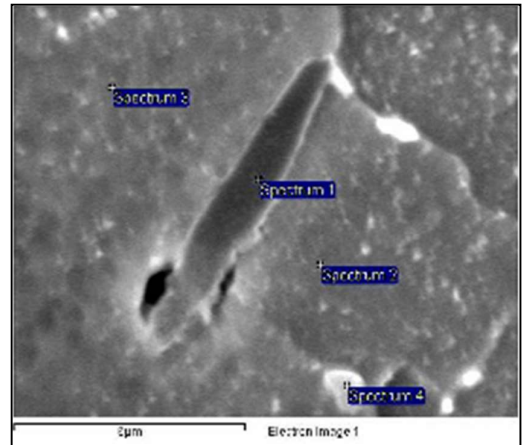
Укључци у материјалу су различитог типа и облика са потпуном декохезијом у граничној површини код укључака оксидног типа и делимичном декохезијом код укључака MnS типа. Поре, као временска оштећења, могу да се уоче у границама укључак-основа, карбид-граница зрна, у самим зрнима на местима бивших граница зрна, али и као појединачне на границама зрна. Посебно је специфична граница укључак-карбид-граница зрна, слика А1д,

где се уочава комплетна декохезија граничне области укључак-граница зрна, али и пора на тројној граници укључак-карбид-зрно (микропрстина дужине укључка 4.37 $\mu$ m).

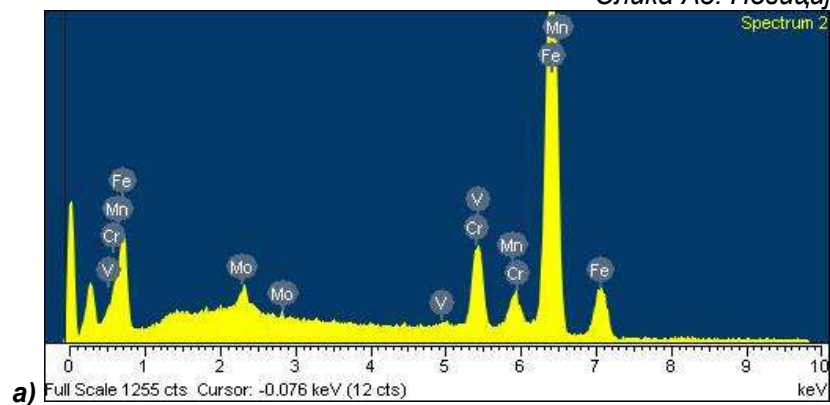
Резултати ЕДС анализе узорка који је провео у експлоатацији 170000h су дати у табели А1 а позиције испитивања на слици А3. Карбиди, чији је састав провераван, су издвојени на границама зрна, а њихова величина указује на фазу огрубљавања услед дуготрајне експлоатације, с тим што је углавном реч о легираним карбидима типа (Cr, Fe, Mo, V, Mn)<sub>x</sub>С<sub>y</sub>, док су карбиди цементитног типа практично потпуно растворени и нестали. Анализирани неметални укључак је MnS типа, издужене морфологије.

Табела А1: Састав карбида и укључка одређен ЕДС анализом

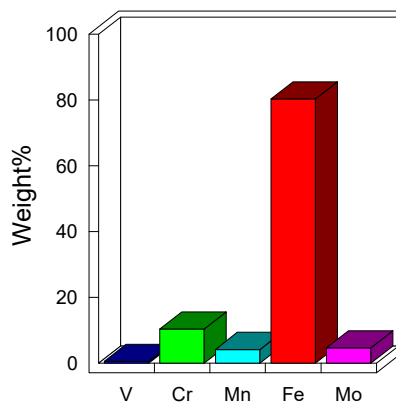
Фаза	Карбид	Укључак
Спектар	спец 4	спец 1
Елемент	%теж.	%теж.
Cr K	10.34	0.72
Mo Л	4.68	0
V K	0.5	0.35
Mn K	4.14	37.23
Si K	-	0
S K	-	22.57
Ni K	-	0
Al K	-	0
Fe K	80.34	39.12
укупно	100	100



Слика А3. Позиције ЕДС анализе



Quantitative results

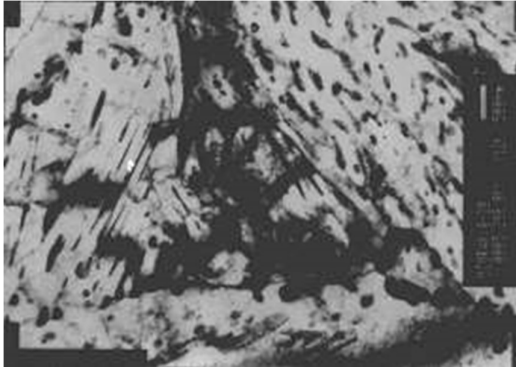


б)

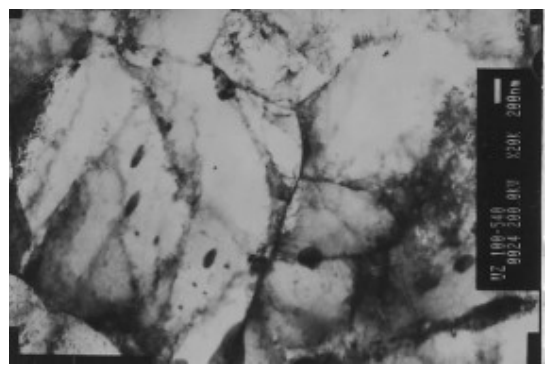
Слика А4: а) дифрактограм - састав једне фазе одређен ЕДС анализом; б) тежински % састав фазе

## Испитивање трансмисионом електронском микроскопијом

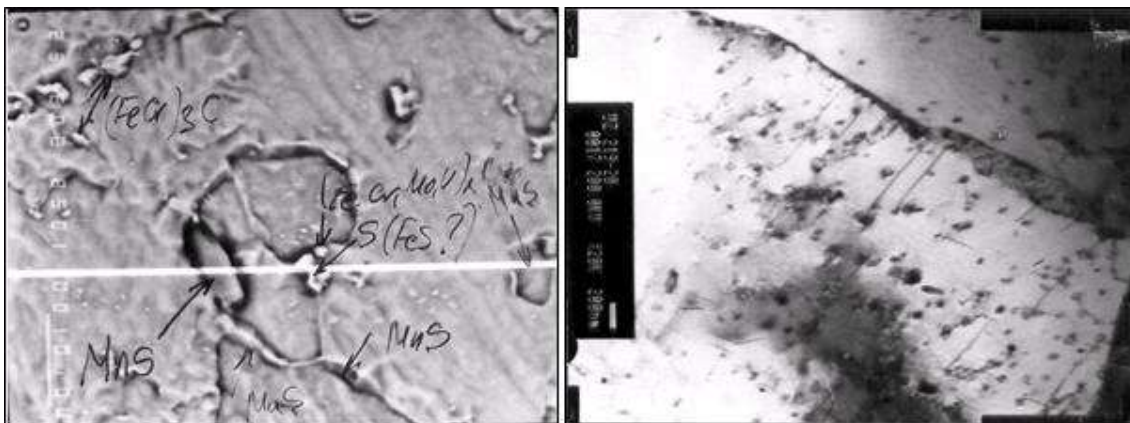
У циљу одређивања стања основе са аспекта кохерентности финог талога у основи, формирања дислокационих зидова и генерално промена које се одвијају у структури извршено је посматрање три карактеристична стања материјала – полазно стање, узорак који је радио 125000h (уочена значајнија деградација) и узорак који је радио 219000h (крајњи степен деградације, пре значајнијег развоја оштећења типа пора). На сликама А4 – А6 приказане су одабране ТЕМ микрофотографије испитаних узорака.



Слика А4. Полазно стање - 0h - фина феритно беинитна структура; крупнији карбиди



Слика А5. Узорак 125000h - Феритно зрно са мало талога и великом густином дислокација; дислокациони зидови; карбиди по границама



Слика А6. Узорак 219000h - велика густина дислокација у близини границе у фериту и изражена граница зрна; талог је крупнији са мањом густином и трансформационим дислокацијама

Са приказаних микрофотографија уочљива је значајна разлика у микроструктури одабраних узорака. Код полазног узорка је присутна фина феритно-перлитно-беинитна структура, која код узорка од 219000h потпуно одсуствује. Код узорка који је провео у раду 125000h изражене су границе зрна и субзрна са присутним крупнијим карбидима издвојеним по границама зрна. Унутар феритног зрна је приметна велика густина дислокација које образују дислокационе зидове, са мало видљивог талога. Код узорка који је радио 219000h уочава се велика количина ситног талога, који је због дужине излагања повишеној температури постао полукохерentan, односно некохерentan са бројним трансформационим дислокацијама чије присуство указује на процес губитка кохерентности.

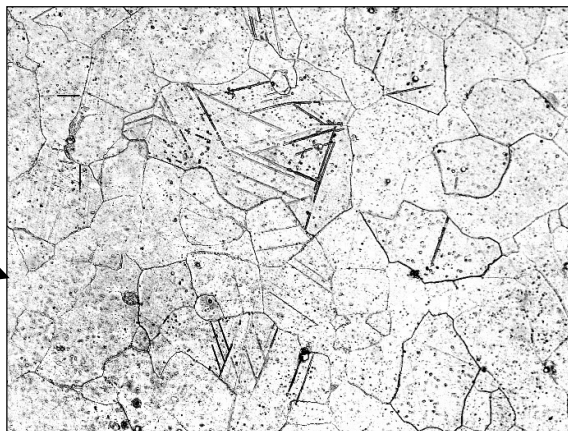
## 2. Испитивање микроструктуре методом реплика – ИБР

Ацетатне реплике су танке фолије које имају улогу да „пресликају“ микроструктуру, која се потом прегледа под микроскопом. Фазе развијања микроструктуре су идентичне као код металографских узорака: на лицу места се бруси и фино полира површина метала, затим нагриза у одговарајућем средству, а потом се наноси омекшала реплика. Након њеног очвршћавања, лагано се подиже са површине метала и наноси на стаклену подлогу. Реплику је могуће превући танким слојем угљеника, злата или алуминијума (тзв. напаривање, односно постизање врло танких слојева униформне дебљине), слика 4, тако да може да се посматра и под СЕМ микроскопима. **Метода реплика је један од основних видова експлоатационе контроле.**

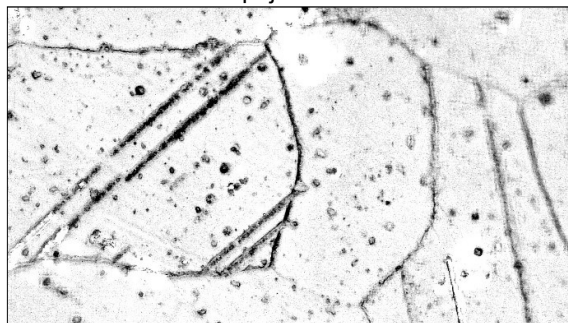


Слика 4: Испитивање микроструктуре методом реплика  
а) Место „узимања“ реплика на компоненти;  
б) Реплике пресвучене („напарене“): златом, алуминијумом, графитом

*Пример: Испитивање репликама након ревитализације кућишта вентила*



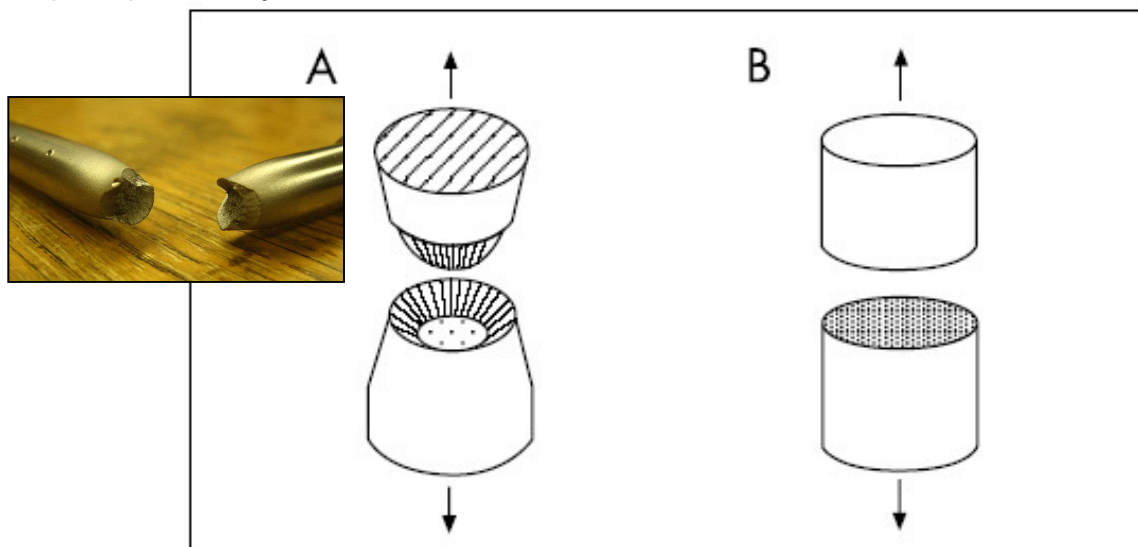
P1 – Основни материјал 100x



P1 – Основни материјал 500x

### 3. Појам оштећења и лома

Лом инжењерских материјала је увек нежељен догађај, пре свега, због: могућности угрожавања људских живота, директног економског губитка, застоја неизвесног трајања и могућег пада расположивости постројења. Код инжењерских материјала су могућа **два основна мода разарања: жилав** и **крт** - чија је појава у функцији способности материјала да се пре лома пластично деформише. Основни типови лома при статичком оптерећењу приказани су на слици 5 за дуктилни и крти лом при затезном оптерећењу. Крти лом нема деформацију у зони лома и може да се шири интеркристално и транскристално, слика 6, док је дуктилни лом праћен деформацијом која не мора да буде по целој запремини, већ је најчешће комбинација дуктилног и кртог карактера. Ова комбинација јасно може да се уочи на микрофотографијама лома и карактеристична је за све мешовите ломове, слика 7а.



Слика 5: Приказ лома при затезном оптерећењу: а) жилав принудни лом и б) крти принудни лом

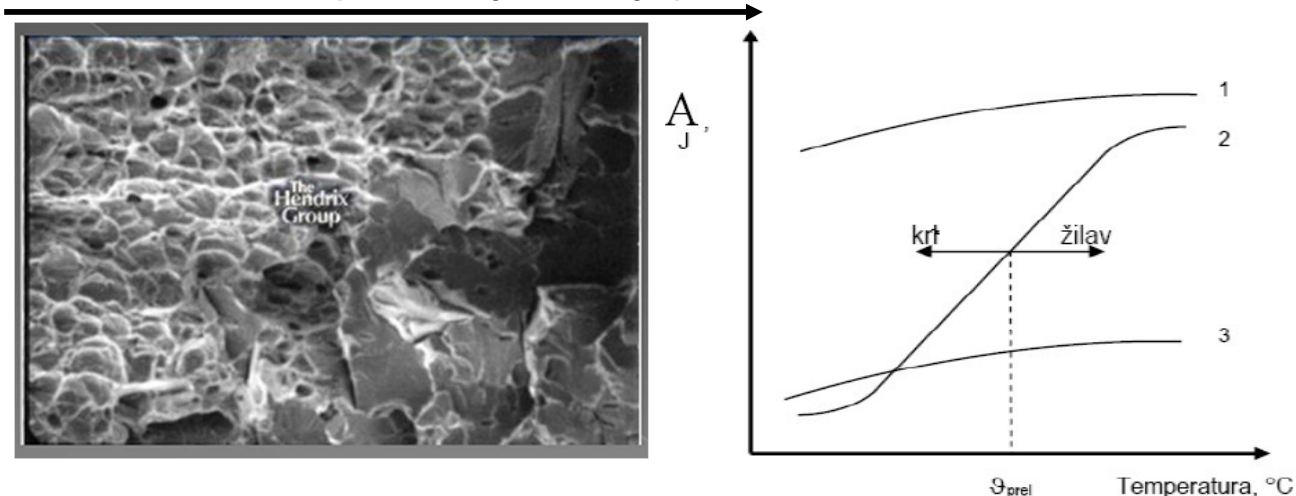


Слика 6: Начини ширења кртог лома – десно СЕМ микрофотографија лома приказаних на скици

Познато је да се жилавост материјала мења са температуром, што значи да код истог материјала могу да се појаве и влакнасти и кристаласти лом, у зависности од температуре испитивања. Температурни интервал у коме долази до промене карактера разарања је познат као **температурни интервал прелаза у крто стање**, слика 7. Уобичајено се за критичну температуру прелаза у крто стање усваја она температура на којој је јасно изражена смена механизма разарања на преломној површини. С обзиром на значај ове температуре не само за пројектовање и избор

материјала неке структуре, већ и за праћење понашања материјала током експлоатације, неопходно је за сваки материјал појединачно познавати њену вредност. Жилаве компоненте лома представљају области преломне површине које се визуелном карактеризацијом описују као влакнасте.

### Прелаз из дуктилног у крти лом



Слика 7: Мешовити лом: а) микрофотографија СЕМ;  
 б) дијаграм промене ударне жилавости са температуром  
 1. КПЦ решетка; 2. КЗЦ решетка; 3. челици повишене чврстоће

Сваки лом укључује две фазе развоја као одговор на делујући напон:

1. фазу нуклеације прслине и
2. фазу ширења прслине.

Примарна класификација ломова према *микроеометрији преломне површине* на кристаласт и влакнаст истовремено указује и на микромеханизам разарања – кристаласт карактер лома је особеност кртог, а влакнасти жилавог микромеханизма разарања.

Према сложености, лом може да буде **једноставан (прост)** и **сложен**.

**Једноставан лом** је раздвајање тела на два или више делова које је уследило као одговор тела на делујући напон који је статичког карактера (константан или лагано променљив са временом) и температуру која је релативно ниска у односу на температуру топљења. У свим осталим условима деловања напона и температуре, лом је **сложеног карактера**. Примењени напон може да буде статичког или динамичког карактера, а по смеру дејства: затезни, притисни, смицајни, увојни, савојни и комбиновани. У табели 2 је дат преглед најважнијих и најчешћих класификација ломова.

Статички лом изазван затезањем по својој оријентацији може да буде раван, раван са косим ивицама, кос и купаст.

- За раван лом је карактеристично да су преломне површине нормалне на правац највећих затезних (нормалних) напона а обично се јавља при макрокртом разарању.
- **Раван лом са косим ивицама** (познат и као лом чаша-купа облика) се најчешће јавља код цилиндричних узорака израђених од конструкционих легираних челика – разарање започиње у равни која је нормална на осу узорка, а затим, због промене напонско-деформационог стања, прслина у

површинским слојевима мења свој правац, тангенцијални напони постају доминантни а разарање завршава се образовањем глатких косих површина.





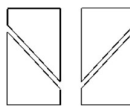

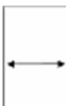


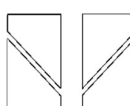
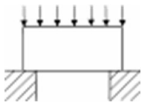



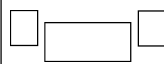


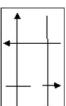







- *Коси лом.* Разарање анизотропних материјала са ограниченом способношћу пластичног деформисања и отпора ка разарању, као што су нпр. легуре алуминијума и магнезијума за гњечење, одвија се смицањем у равнима највећих тангенцијалних напона, а лом је по оријентацији кос. За разлику од равног лома, последња два су карактеристика макрожилавог разарања.
- *Купаст лом.* Код материјала који се одликују великом способношћу пластичног деформисања и отпора ка разарању, у зони разарања током деловања затезних напона се образују потпуно косе ивице, односно јавља се купаст лом.

Табела 2: Основне класификације ломова

Аспект класификације ломова:	Изглед – Врста – Карактеристична особеност лома	
Карактер оптерећења	Једноставан лом – статички лом	
	Лом услед дуго-трајног статичког оптерећења	Лом услед пузања
		Лом услед напонске корозије
		Лом услед успореног разарања
	Заморни лом	Лом услед високоцикличног замора
		Лом услед нискоцикличног замора
		Лом услед корозионог замора
Оријентација лома	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Раван лом</li> <li>• Раван лом са косим ивицама</li> <li>• Коси лом</li> <li>• Купаст лом</li> </ul>	
Веза са елементима микроструктуре	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Транскристални лом</li> <li>• Интеркристални лом</li> <li>• Мешовити лом</li> </ul>	
Микромеханизам разарања	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Жилав</li> <li>• Крт</li> <li>• Квазикрт</li> <li>• Заморни</li> </ul>	
Степен пластичне деформације пре лома	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>жилав лом</i> - већи од 15 %</li> <li>• <i>крт лом</i> - до 1,5%</li> <li>• <i>квазикрт лом</i> - до 15 %</li> </ul>	
Енергија разарања	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Жилав (<math>A &gt; 20J</math>)</li> <li>• Крт (<math>A &lt; 5J</math>)</li> <li>• Квазикрт (<math>A = 5 \dots 20J</math>)</li> </ul>	

*Оријентација преломне површине* је у тесној вези са карактером оптерећења, напонским стањем и нормалним и тангенцијалним напонима који доводе до разарања. У табели 3 су шематски приказани неки примери оријентације лома материјала у зависности од врсте краткотрајног статичког оптерећења. Познавање свих специфичности преломних површина, могуће је већ на основу макрофрактографске анализе донети валидне закључке о узроцима који су деловали, а свакако и одредити превентивне мере којима ти узроци могу да се сведу на најмању могућу меру.

Табела 3: Шематски приказ разарања у зависности од врсте делујућег оптерећења

Врста оптерећења		Напон		Врста лома	
		нормални, $\sigma_{\max}$	тангенцијалн и, $\tau_{\max}$	прекид	клизање
Затезање					
Притисак					
Смицање					
Увијање					
Савијање					

## 4. Фрактографија - анализа површине лома

### 4.1. Увод

Познато је да било који машински део може издржати оптерећења само до одређеног нивоа вредности, а онда ће се деформисати и/или поломити.

Генерално, конструкциони материјали би требало да имају што вишу чврстоћу, али и дуктилност да могу да издрже нагло преоптерећење као што је нпр. удар. Ове особине су уобичајено искључујуће - најчешће материјали који имају високу чврстоћу имају мању дуктилност и обрнуто.

Чврстоћа измерена једноосним затезањем је недовољна као податак за описивање особина конструкционих делова велике дебљине код којих се генерише троосно напонско поље или за оне делове који садрже зарезе или прслине. Да би се описало понашање делова који садрже прслину развијен је критеријум „живавости лома” (отпор према кртом лому).

Чврстоћа до лома, а још више живавост лома, се смањују када:

- је део оптерећен цикличним оптерећењем (замор),
- се оптерећење јавља на повишеним температурама (пузање),
- део ради у медијуму који изазива корозију,
- део садржи у себи водоник још из производних процеса или неког другог извора (корозија, заваривање),
- је део у контакту са неким течним металом или металом у гасовитом стању;

На пример, у случају замора, живавост лома се смањује за 1-3% услед деловања цикличних оптерећења, док се под утицајем водоника смањује за 7-30%. Дакле, евидентно је да лом који се јавља само услед преоптерећења (брзи лом) ретко представља примарни узрок лома, чак и у свом најопаснијем облику названом крти лом.

Иницијалне прслине, из којих креће стабилан раст прслине, често настају током производње, односно током процеса деформисања на топло или хладно, или због деловања затезних напона насталих током хлађења услед скупљања материјала.

Главни задатак код анализе лома је да се дефинише природа (врста) лома, а као први корак ту спада преглед површине лома голим оком, или под увећањем, тзв. **макрофрактографија**. Макрофотографија је најстарија метода испитивања материјала. Увећања површине лома, најчешће до 120х, могуће је добити коришћењем стереомикроскопа или стерео лупе.

Основна мана оптичких микроскопа је захтев да узорци који се посматрају буду релативно равни, јер једино у том случају могуће добити јасну слику при било ком повећању. Стога, металографски узорци морају да буду припремљени брушењем, полирањем и нагризањем са циљем да се развије микроструктура узорка. На развијеној структури могуће је препознати да ли су прслине повезане са неким неправилностима у структури, или нпр. зоном утицаја топлоте код заварених спојева, да ли су прслине пропегирале кроз зрна, или дуж граница зрна, као и да ли су прслине разгранате или не. Запажања добијена посматрањем металографског узорка се могу сматрати индиректном фрактографијом и у многим случајевима не добијају се недвосмислен резултат.

Први кораци у примени ТЕМ у фрактографији су учињени због веће дубине поља, али за испитивање на ТЕМ могле су да се користе само реплике, па је из тих раслога употреба ТЕМ ограничена. Тек увођењем СЕМ постало је могуће испитивати површину лома директно без ограничења. Такође, при фрактографији треба имати на уму да су површине лома, најчешће, више или мање оксидирале па их је неопходно

очистити пре испитивања. Чишћење се ради у посебним хемијским растворима (нпр. раствор HCl, инхибитора и воде) или у ултразвучним кадама.

**У наставку овог поглавља описане су основне врсте лома које се најчешће јављају код челика.**

Као све легуре железа, нелегирани и ниско легирани челици имају две значајне модификације кристалне решетке. На високим температурама, изнад  $\sim 720^{\circ}\text{C}$  –  $\gamma$ , кубну површински центрирану решетку (КПЦ) која се назива аустенит, а испод  $\sim 720^{\circ}\text{C}$  кубну запремински центрирану решетку (КЗЦ) –  $\alpha$  која се назива ферит. За челике са ниским садржајем угљеника КЗЦ решетка постоји и непосредно испод тачке топљења и назива се  $\delta$ -ферит. У случају каљења добијамо мартензит који има тетрагоналну решетку чији степен тетрагоналности зависи од количине растворених угљеникових атома.

Легирањем са већим процентом никла (и хромом), или ређе са манганом (оба елемента имају КПЦ решетку), челик током хлађења задржава аустенитну структуру чак и до најнижих температуре. Овај аустенит карактерише висока дуктилност што је типично за све КПЦ метале, нпр. злато, бакар и олово. Феритне челике карактерише смањење дуктилности на нижим температурама, посебно у случају троосног напонског стања при великим брзинама оптерећења.

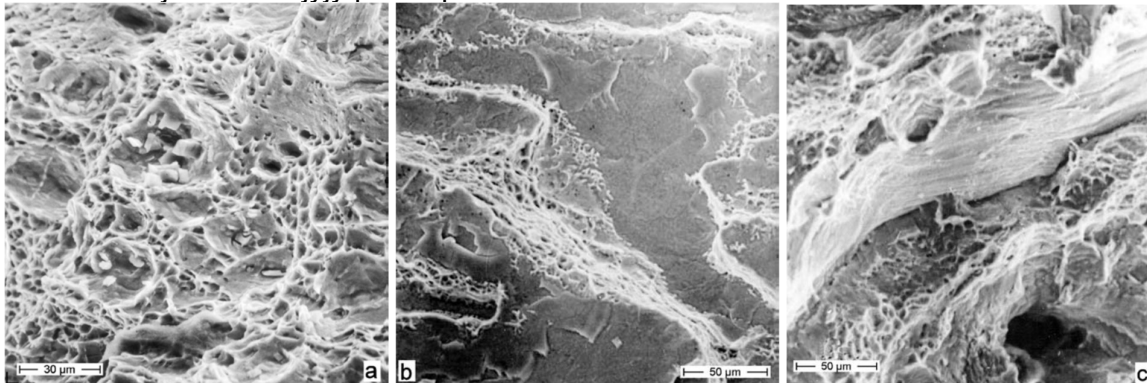
## 4.2 Брзи статички лом

### 4.2.1 Дуктилни лом

Дуктилан лом, на микроскопском нивоу, карактерише влакнаста - јамичаста структура, сл. 8а. Током лома дуктилних материјала, на укључцима и грубом талогу иницирају се шупљине, које расту током развоја лома, а материјал између шупљина се деформише у облику влакана, и на крају долази до њиховог кидања, када се на површини виде јамице настале од шупљина. У првој апроксимацији, дубина ових јамица може да се сматра мером дуктилности.

Када су укључци велики и равни, што је случај са сулфидима и оксидима у обичним ваљаним челицима, дуктилност ће бити ниска нормално на правац ваљања (раван ваљања) што може да резултује појавом „ламеларног цепања”. На површини лома равни “жлебови” попуњени укључцима су раздвојени локалним зонама “кидања” за које је карактеристична појава финих јамица, сл. 8б.

Као посебан случај, нпр. код хладно ваљаних аустенитних челика са манганом, течење има тенденцију да буде локализовано, сл. 8ц. Тада се формирају грубе траке клизања које обезбеђују раст прслине.



Слика 8. Дуктилни лом

а) високолегирани CrNi челик са дуплекс структуром: шупљине садрже карбонитриде;

б) ламеларно цепање ниско угљеничних ваљаних челика нормално на правац ваљања: жлебови попуњени равним укључцима и раздвојени по зонама и шупљина;

ц) хладно деформисан аустенитни мангански челик: зоне цепања настале по тракама клизања;

## 4.2.2 Крти лом

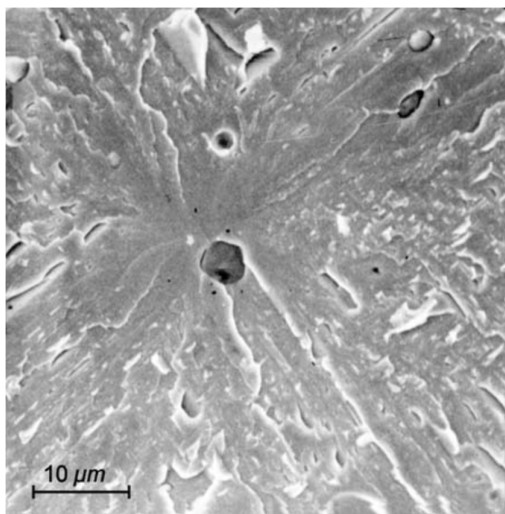
Генерално, крти лом се простире кроз зрна (транскристални лом или трансгрануларни лом). У случајевима када материјал поседује високу чврстоћу, нпр. каљени и отпуштени челици, прслина може да расте дуж границе зрна – то се дешава када су оне ослабљене честицама и нечистоћама (интеркристални лом или интергрануларни лом). Најчешће, границе по којима расте прслина су бивше границе аустенитних зрна. Током хлађења, када се аустенит трансформише у ферит или мартензит, ове границе зрна нестају, али нечистоће накупљене на њима претстављају погодно место за раст прслина.

### Лом цепањем – транскристални крти лом

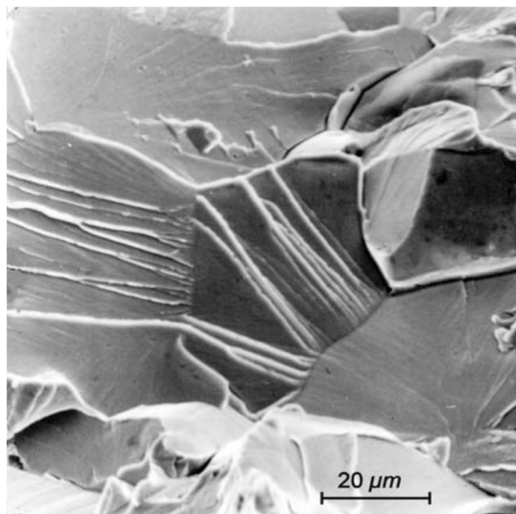
Лом цепања је карактеристичан за КЗЦ решетку, док се код КПЦ решетке не јавља у нормалним условима. Током цепања, одвајање се јавља дуж добро дефинисаних кристалографских равни.

Треба напоменути да се током цепања испред врха прслине најчешће формира зона локалне пластичне деформације, на чије се формирање троши највећи део рада потребног за формирање површине лома. То значи да је материјал у околини равни прслине пластично деформисан без обзира на крти карактер лома. Са удаљењем од равни прслине, мања је пластична деформација материјала.

Нуклеација транскристалне прслине може да буде на местима где је отежан процес клизања, као на пример на местима где се налазе честице талога (сл. 9а) или на границама зрна (сл. 9б). С обзиром да зрна имају различиту оријентацију једна у односу на друга (кристалографске равни суседних зрна се налазе под већим угловима), прслине се шире гранањем, када прелазе границу зрна и формирају степенице. После граница зрна, новонастале различите равни прслине поново се спајају у једну и имају карактеристичан облик “тока реке”. Генерално, у случајевима приказаним на сликама 9а и 9б, површине добијене цепањем су равне.



а) челика са високим садржајем Cr: карбидни талог као извор прслине



б) челични лив: прслина у облику “тока реке”

Слика 9. Транскристални крти лом – лом цепањем

У двофазним аустенитно-феритним CrNi челицима (25% Cr, 5%Ni) због постојања феритне компоненте у аустенитној структури, са опадањем температуре челик постаје кртији као било који феритни челик, али ово повећање кртости се одвија спорије у поређењу са феритним челицима. Током раста прслине, феритна зрна се

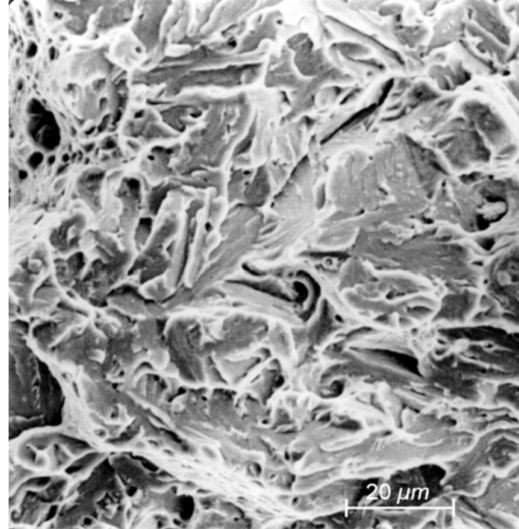
цепају на уобичајени начин. Раст прслине се зауставља када прслина достигне границу аустенитног зрна које је дуктилније у односу на феритно. Ово је посебно изражено код заварених спојева ових челика када у близини линије стапања настаје  $\delta$ -ферит који се само делимично поново трансформише у уска аустенитна подручја дуж граница зрна.

За даљи раст прслине двофазних челика неопходно је да се створи нова иницијална прслина. Тако прслине величине границе зрна остају изоловане једне од других, а даље раздвајање може да настане само додатном деформацијом, па се не појављује „ток реке”, сл. 10а.

Прслина се код каљених и отпуштених челика мартензитне структуре шири као код феритних челика. Због велике разлике у оријентацији појединачних блокова мартензита, пролаз прслине кроз границе зрна је отежан и неопходно је смицајно оптерећење за даљи раст - “ток реке” је једва видљив, сл. 10б.



а) двофазни аустенитно феритни ЦрНи челик изоловане прслине унутар једног зрна, нема прслина у облику тока реке



б) нисколегирани челик – отпуштени мартензит fine површине цепања

Слика 10. Транскристални крти лом – лом цепањем

### Интеркристални крти лом

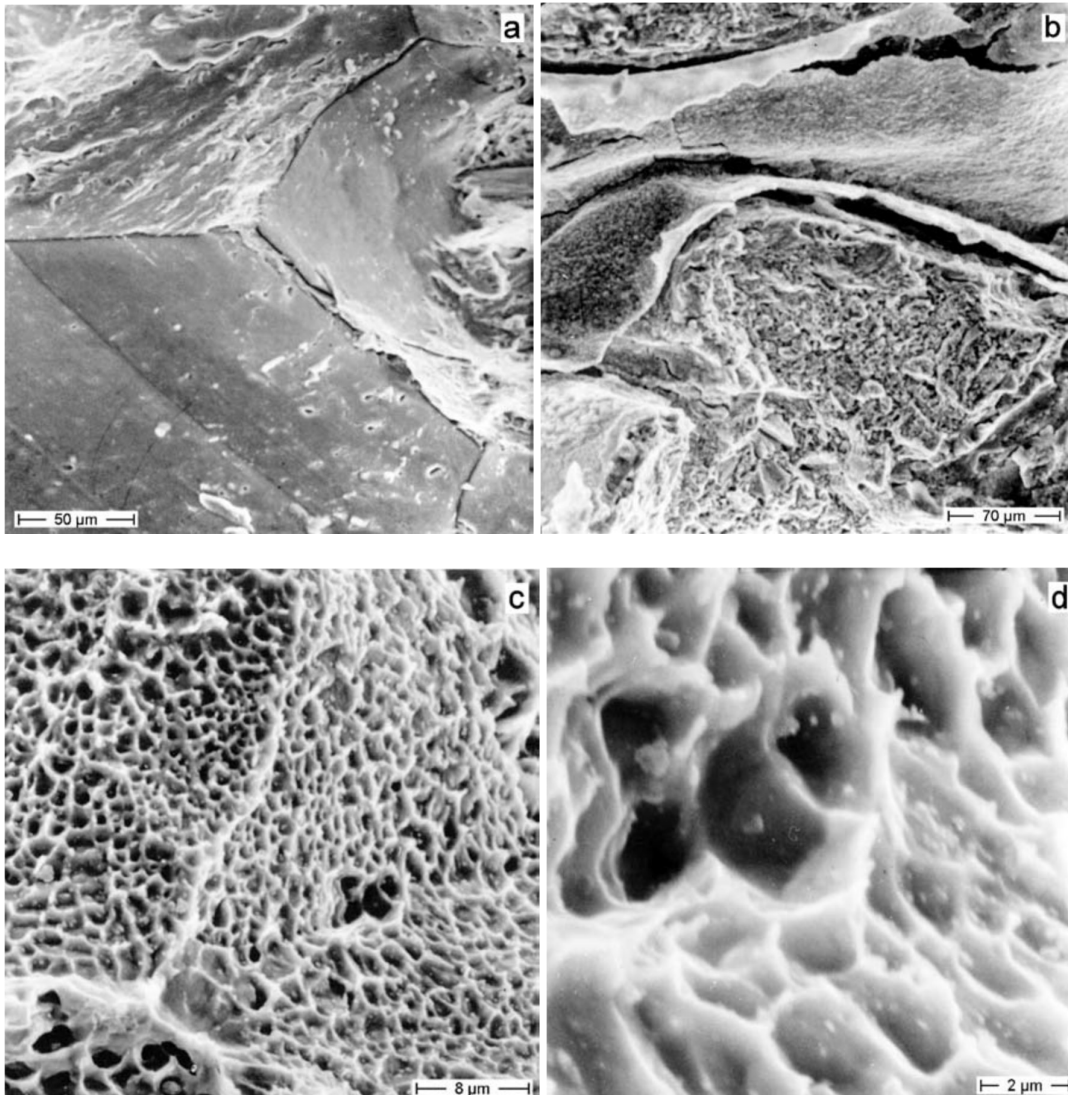
У принципу, када се прслина креће по границама зрна нема трагова процеса деформације. Заједничко за све узроке интеркристалног лома је да су последица значајно ослабљених граница зрна.

Један од примера за интеркристални лом, слика 11а, је и челик који је подвргнут цементацији. Током цементације дифузија у процесу обогаћивања површинских слојева угљеником преференцијално се јавља дуж граница зрна, тако да су границе аустенитних зрна области презасићене угљеником. Даље, током каљења аустенит се трансформише у мартензит, а након тога током отпуштања, угљеник се везује у карбиде, стварајући карбидне низове који спречавају клизање и на тај начин се стварају места погодна за раст прслина.

Још један узрок слабљења граница зрна је отпусна кртост, која се често јавља код великих отковака, јер се хладе веома споро. Због спорог хлађења се, у температурном интервалу од 575-350°C, дифузијом издвајају атоми арсена (As), антимона (Sb), фосфора (P), итд. Издвајање се одвија у границама аустенитних зрна у којима се већ налазе сулфидни укључци, који у већини случајева и нису велики проблем, међутим заједно са накупљеним нечистоћама значајно слабе границе зрна.

Отпусна кртост може да се уклони, загревањем материјала на температуре изнад  $600^{\circ}\text{C}$ , када долази до растварања издвојених фаза на границама зрна, и након тога брзим хлађењем да би се спречило издвајање нечистоћа (ово не важи за сулфидне укључке који се растварају на много вишим температурама).

Такође, ако челик жаримо мало испод температуре топљења може да дође до појаве „прегоревања”, тј. кисеоник дифундује дубоко у структуру. Дифузија кисеоника се првенствено јавља дуж граница зрна као у случају цементације, доводећи до појаве унутрашње оксидације, сл. 11б, и ефекта љуспања у области граница зрна.



Слика 11. Интеркристални крти лом

- а) прслина на границама зрна због обогаћивања угљеником;
- б) унутрашња оксидација: љуспање границе зрна;
- ц) прслине настале током отпуштања: границе зрна су прекривене финим шупљинама;
- д) детаљ из ц) ситни сулфидни укључци у шупљинама;

Растварање је разлог зашто током заваривања долази до појаве „релаксационих прслина” у челицима отпорним на пузање. Границе зрна у зони у близини линије стапања су богате веомаfino диспергованим карбидима и сулфидима. Челици отпорни на пузање су више или мање легирани хромом, молибденом и евентуално ванадијумом или ниобијумом или неким сличним

елементом, да би формирали карбиде који су термички стабилни и дају високу отпорност на пузање. Ови фино дисперговани карбиди се растварају током процеса заваривања у близини зоне стапања, нестају и тиме смањују отпорност на пузање. Током загревања сулфиди се укрупњавају - коагулирају (пречник од 0,1-0,5 $\mu$ m), али сами по себи они нису критични. Процес клизања, неопходан за отпуштање заосталих напона (накнадна термичка обрада), је ограничен на ове зоне које су ослобођене талога јер су оне најслабије, а истовремено су додатно ослабљене коагулацијом сулфида.

Током пузања сулфиди и карбиди постају места настанка пора, које се повезују и формирају прслину. На површини лома се појављују fine јамице које покривају границе зрна сл. 11ц. Честице у јамицама су слабо видљиве због својих малих димензија (сл. 11д). Укупна деформација пузања неће премашити вредности 0,2 – 0,3%, односно, у питању је крти лом када се посматра на макроскопском нивоу, док се на микро нивоу посматра као дуктилан лом. Иста појава се може наћи и код аустенитних челика, код месинга, легура алуминијума и никла, и увек је везана за појаву зона које су ослобођене од ојачавајућег талога.

**Грифитова једначина:** 
$$\delta = \left\{ \frac{2E \times \gamma_s}{\pi \times a} \right\}^{\frac{1}{2}}$$
 где је  $\delta$  - напон до лома,  $E$  Јунгов модул

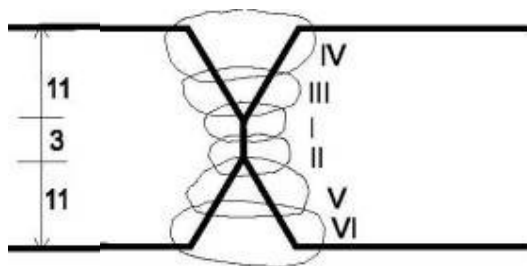
еластичности,  $a$  дужина прслине и  $\gamma_s$  површинска енергија за формирање прслине.

**Пример Б\*:** Употреба СЕМ и ТЕМ код испитивања карактеристика завареног споја микрелегираног челика

Главне одлике микрелегираних челика повишене чврстоће су високе вредности напона течења, ниска прелазна температура кртости, погодност за обликовање, као и релативно добра заварљивост. Постизање жељених особина код ових челика остварује се углавном на два начина: уситњавањем зрна и таложним ојачавањем. У оба случаја, значајну улогу имају честице талога микрелегираних елемената. Међутим, добра комбинација механичких особина се ипак може у великој мери нарушити при процесима заваривања топљењем. Као најзначајнији проблеми који се јављају у току заваривања су појава неравнотежних структура, и таложење честица микрелегираних елемената по границама зрна.

За побољшање особина заварених спојева веома је битна термичка обрада након заваривања, због релаксације заосталих напона, побољшања микроструктуре, смањења опасности од кртог лома, смањења концентрације дифундованог водоника и постизања димензионалне стабилности. Међутим, показало се да термичка обрада после заваривања може довести до погоршања особина завареног споја.

У наставку је приказан утицај параметара заваривања, температуре предгревања и отпуштања на механичке особине заварених спојева микрелегираног 0.15C1.5Mn0.5Ni0.15V0.18Mo челика. Заваривање је изведено електролучним поступком под прахом (жица EPP 2 Ni у комбинацији са прашком OP121 TT –Јесенице, прашак је сушен на температури од 300°C/2h) и завариване су три серије проба чије су димензије и редослед заваривања приказане на слици Б1. Заваривање је вршено са уносом топлоте од 2 kJ/mm (I серија AW), затим са предгревањем од 150°C и са уносом топлоте од 3 kJ/mm (II серија AW). Део узорака је додатно отпуштан на температури од 580°C/2h (III серија - SR). Параметри заваривања су приказани у табели Б1.



Слика Б1 Облик и димензије жљеба и редослед nanoшења слојева

Заваривање је изведено у 6 пролаза, по три са сваке стране. Количина линијски унете топлоте је одређена изразом:

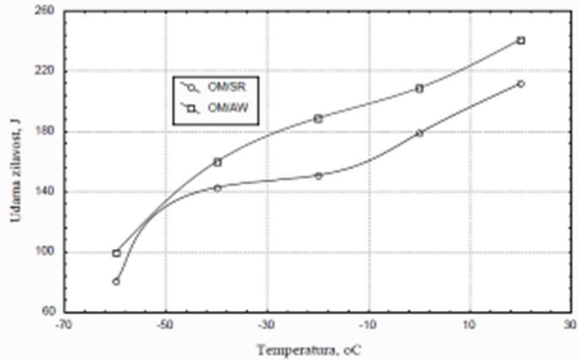
$$Q = U \cdot I \cdot 60 / v$$

где је: Q – количина линијски унете топлоте, kJ/mm; U – напон лука, V; I – јачина струје заваривања, A; v – брзина заваривања, cm/s.

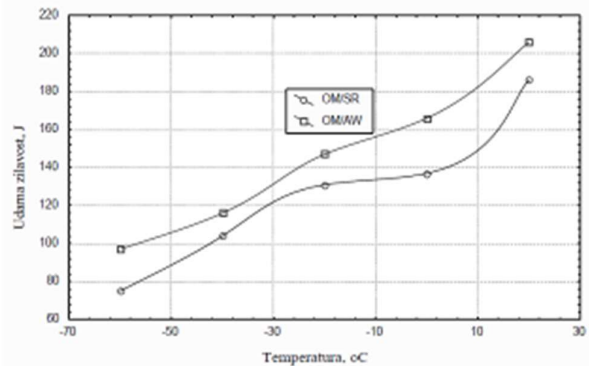
Табела Б1 Параметри заваривања за све три серије

Параметри заваривања	Број пролаза							
	Серије I и II				Серија III			
	I	I	III и IV	V и VI	I	II	III и IV	V и VI
U – напон лука, V	26	26	31	30	26	26	33	34
I – јачина струје заваривања, A	610	650	600	600	600	650	630	630
v – брзина заваривања, cm/s	55	55	52	50	55	55	40	40
Q – количина унете топлоте, kJ/mm	1.75	1.84	2.14	2.16	1.70	1.84	3.12	3.21

Резултати испитивања ударне жилавости су приказани на сликама Б2 и Б3. Генерални закључак који произилази из испитивања жилавости ЗУТ је да су добијене веома високе вредности, чак и на температури испитивања од  $-60^{\circ}\text{C}$ . Највише вредности су добијене код серије И т.ј. код заваривања са мањом количином унете топлоте. Међутим, није запажен утицај температуре предгревања на жилавост ЗУТ. Може се уочити позитиван утицај термичке обраде након заваривања који је израженији на температури испитивања од  $+20^{\circ}\text{C}$ .

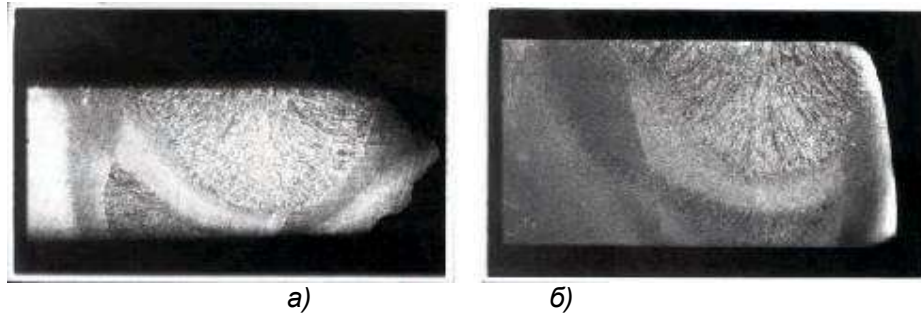


**Slika 2** Udarna žilavost osnovnog materijala u AW i SR stanju (zarez normalan na pravac valjanja)



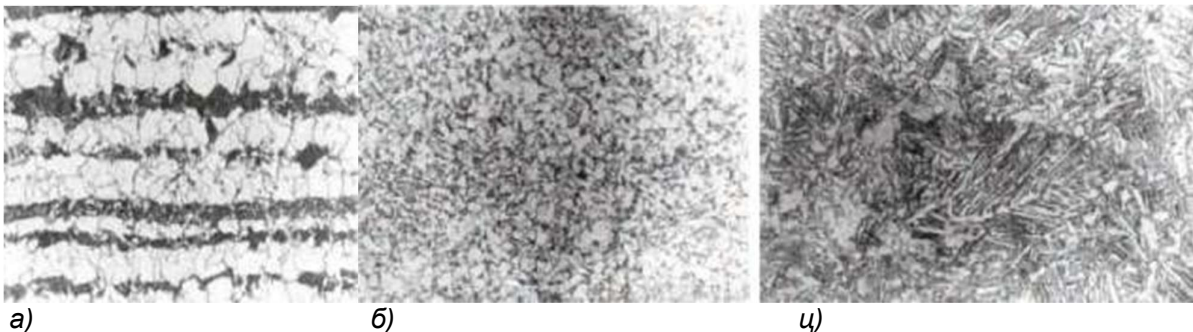
**Slika 3** Udarna žilavost osnovnog materijala u AW i SR stanju (zarez paralelan sa pravcem valjanja)

Макро и микроструктурна испитивања. На слици Б4 (а и б) су приказане макрофотографије преломљених Шарпи епрувета са зарезом у ЗУТ испитаних на  $+20^{\circ}\text{C}$  и  $-60^{\circ}\text{C}$ . Помоћу ових фотографија утврђена је путања ширења прслине од врха зареза до лома епрувете.



**Слика Б4** Макрофотографије преломљених Шарпи епрувета са зарезом у ЗУТ  
а)  $t +20^{\circ}\text{C}$ ; б)  $t -60^{\circ}\text{C}$

На слици Б5 је приказана микроструктура ОМ, микролегираног  $\text{MnNiV}$  челика, и карактеристична подручја ЗУТ-а. Најближе ОМ током заваривања је интеркритично подручје (сл.5б) или подручје непотпуне  $\gamma/\alpha$  трансформације, у коме се ОМ загрева између  $A1$  и  $A3$  температура. Као резултат непотпуне трансформације, перлит и део ферита се трансформишу у ситнозрни аустенит. Услед накнадног хлађења ферит остаје непромењен, док се аустенит трансформише у ситнозрни перлит.



**Слика Б5** Карактеристична подручја: а) ОМ, ЗУТ; б) ситнозрно, ц) крпунозрно, увећање 500X

Електронска микроскопија изведена на трансмисионом електронском микроскопу (ТЕМ), типа ЈЕОЛ 7А, где је за припрему узорача коришћена техника графитних реплика и на скенирајућем електронском микроскопу (СЕМ), типа ЈЕОЛ 733.

На ТЕМ микрофотографијама јасно се виде феритна зрна и перлитне колоније, које су веома добро оформљене са правилно поређаним цементитним ламелама, слика Б6 а). Присуство карбида и других фаза по  $\alpha/\alpha$  границама зрна је врло мало. Са слике Б6 б) се види да се у основном материјалу у АУ стању запажа присуство фино диспергованих честица у феритној основи, највероватније карбида ванадијума, (присутан у ОМ). За разлику од ниобијума и титана, код повољних брзина хлађења ванадијум се таложи у феритној основи у облику фино диспергованих кохерентних честица које повећавају чврстоћу ОМ.

Услед термичке обраде (сл.Б6 ц) долази до делимичног распада перлита. Правилност ламела је нарушена, а запажа се њихово скраћење и сфероидизација. Пречник колонија је смањен, што је вероватно и основни разлог за побољшање жилавости основног материјала. Запажа се и веће присуство секундарних фаза по  $\alpha/\alpha$  границама, од којих је један део вероватно резултат распада перлитних колонија. Други закључак који се намеће је да је смањено присуство ванадијумових честица највероватније резултат њиховог делимичног растварања услед термичке обраде.



а) ОМ у полазном (АУ) стању, ТЕМ, увећање 20000X

б) исталожене В честице у фериту, ТЕМ увећање 5000 X

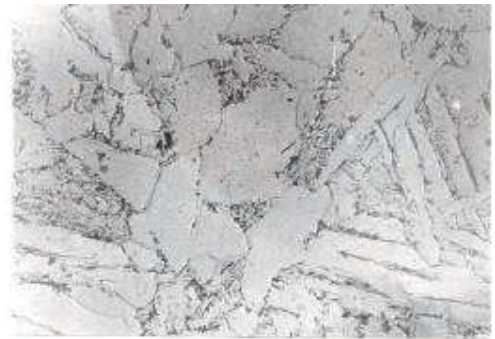
ц) термички третирано (СР) стање, ТЕМ увећање 20000X

Слика Б6 Микроструктура основног материјала

ТЕМ фотографије интеркритичног и крупнозрног подручја је приказане су на сликама 7 а) и б). Најближе граници топљења је крупнозрно подручје са главном феритно-беинитном и Видманстатен-овом структуром. На ТЕМ фотографији (сл.11б) је приказан део крупнозрног подручја. Запажа се да у микроструктури доминира ферит који је у облику зрна и иглица. У фериту се запажа мали број релативно крупних ванадијумових честица. Може се рећи да је ово подручје било загрејано нешто испод 1050°C, јер се сматра да су изнад ове температуре ванадијумове честице практично потпуно растворене у фериту.



а)

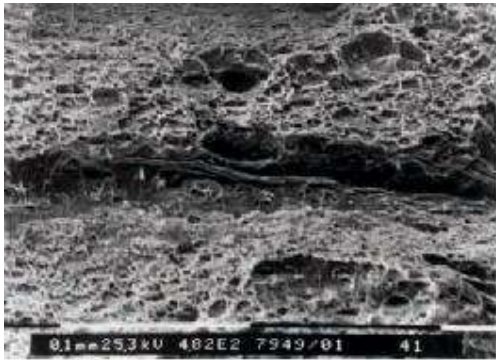


б)

Слика Б7 Микроструктура са ТЕМ а) интеркритичног подручја ЗУТ, б) крупнозрног подручја ЗУТ, 5000X

На сликама Б8 а) и б) приказана преломна површина лома Шарпи епрувете добијена

на СЕМ. Пошто је ОМ је микролегирани ванадијумов челик са садржајем 0.15% V и 0.15%С, присуство мангана од 1.5% доприноси изразито тракавој феритно-перлитној микроструктури ОМ. Претходна сазнања указују да манган у присуству веће концентрације сумпора ствара манган сулфидне укључке који су веома пластични и који се лако издужују у правцу ваљања. Међутим, због слабе везе на граници укључак/матрица лако долази до стварања прслина, што се може видети и на преломној површини, слици Б8а). Такође, са микрофотографије (слика Б8 б) се види да дуж самих трака ваљања веома лако долази до цепања у ОМ иако није запажен утицај правца ваљања као и термичке обраде након заваривања на затезне карактеристике ОМ. При испитивању ударне жилавости ОМ, у складу са очекивањима, веће вредности су добијене код епрувета са зарезом нормалним на правац ваљања, јер је у оваквим случајевима ширење прслине праћено већим утрошком енергије. Са дијаграма (сл.2 и 3) се може видети и позитиван утицај термичке обраде након заваривања на жилавост основног материјала, чему у прилог иду и резултати ТЕМ микроскопије.



а)



б)

Слика Б8 Прелом са Шарпи епрувете (СЕМ) основног материјала са издуженим укључком а) и ширење прслине у основном материјалу б); [14]

\*ЛИТЕРАТУРА

С. Цветковски, В. Грабулов, Д. Славков, Ј. Магдески КАРАКТЕРИСТИКЕ ЗАВАРЕНОГ СПОЈА МИКРОЛЕГИРАНОГ ЧЕЛИКА У ЗАВИСНОСТИ ОД ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА И ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ НАКОН ЗАВАРИВАЊА УДКУДЦ: 621.791.754.051:669.15'74'24'292, 2003.год.