



UNIVERSITAT DE BARCELONA



## **FACULTAT DE QUÍMICA**

**Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica**

Programa de doctorat: Tecnologia de Materials

Bienni: 2003-2005

# **ESTRUCTURES BAINÍTIQUES EN ACERS HSLA DE BAIX CONTINGUT EN CARBONI: INFLUÈNCIA DEL CONTINGUT EN MICROALEANTS I DEL TRACTAMENT TÈRMIC SOBRE L'ESTRUCTURA I PROPIETATS**

Memòria presentada per **Silvia Illescas Fernández**  
per a optar al grau de Doctor per la Universitat de  
Barcelona sota la direcció del Professor Josep M<sup>a</sup>  
Guilemany Casadamon i del Professor Javier  
Fernández González.

*Barcelona, Maig 2007*

## **IV. CONCLUSIONS GENERALS**

*El final es el lugar del que partimos*  
*Thomas S. Elliot*



## IV. CONCLUSIONS GENERALS

D'acord amb els resultats i la discussió realitzada al llarg dels diferents capítols sobre els acers microaleats estudiats es resumeixen les conclusions més destacades:

### *Sobre el material de partida:*

1. Els acers de partida presenten una estructura ferrític-perlítica, fruit d'un procés de laminació controlada que genera una estructura amb travessat de segregació
2. El Niobi genera un major afinatge de gra que el Vanadi durant el procés de laminació controlada. S'observa com l'acer 16Mn4 que no conté Niobi com a element de microaleació i per tant presenta un major tamany de gra, té una menor duresa.

### *Sobre el creixement de gra de la fase austenítica:*

3. En funció de la temperatura s'han identificat dos tipus de creixement de gra, homogeni (associat a un creixement de gra normal) i heterogeni (associat al creixement anormal o recristal·lització secundària. S'ha caracteritzat la condició de creixement anormal per a un valor del paràmetre d'heterogeneïtat superior a 0,9 per als dos acers estudiats.
4. El tractament tèrmic òptim per mitjà del qual s'aconsegueix un menor tamany de gra homogeni és el realitzat a 1050°C durant 30 minuts per a l'acer 16MnNi4, i a 1000°C i 15 minuts per a l'acer 16Mn4, obtenint-se tamanys de gra de 16  $\mu\text{m}$  i 27  $\mu\text{m}$  respectivament.
5. L'anàlisi de carburs i nitrurs simples constitueix una bona aproximació per a donar explicació al procés de creixement anormal. No obstant, no justifica, per exemple, per a l'acer 16MnNi4 el creixement anormal produït a 1250°C pel que seria necessari el tractament de carbonitrurs complexos que reflexa de forma més fidedigna la realitat del que succeeix en el material sotmès a austenitzacions prolongades.

6. S'han obtingut exponents cinètics amb valors diversos, compresos entre 2 i 8. Els valors superiors als predits per Atkinson (6-8) han estat associats a efecte d'inhibició de creixement de gra.

7. Cada una de les etapes involucrades en el procés de creixement de gra es caracteritza per presentar un diferent valor en l'energia d'activació, fenomen que s'observa per mitjà de les variacions en el pendent de les gràfiques  $\ln(D-D_0)$  enfront de  $1000/T$ , ja que aquest pendent està relacionat amb el valor de l'energia d'activació. És per això que cada tram de la representació diferenciat pel seu pendent, correspon a una etapa diferent en tal procés.

8. Per mitjà de TEM es corrobora la presència dels precipitats predits pel model de carburs i nitrurs simples, de manera que per a ambdós acers a temperatures d'austenització inferiors a  $1050^\circ\text{C}$  s'han trobat precipitats de VC i VN, encara que majoritàriament el V s'ha trobat combinat amb el Ti formant compostos de  $(\text{TiV})\text{C}$ . També en els dos acers per a totes les mostres sotmeses a diferents temperatures d'austenització s'han trobat TiN. A més per a l'acer 16MnNi4 s'han trobat precipitats rics en Niobi a temperatures inferiors a  $1100^\circ\text{C}$  el que fa pensar que es tracti de NbN.

#### *Sobre els registres dilatomètrics:*

9. A partir de les corbes d'escalfament dels materials en estat brut de laminació és possible trobar el valor del coeficient d'expansió tèrmica, trobant-se valors d' $1,46 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  i  $1,44 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  per a l'acer 16MnNi4 i 16Mn4 respectivament, valors corresponents a una microestructura majoritàriament ferrítica amb presència de constituent perlític.

10. A partir de les corbes de refredament s'observa com a velocitats ràpides de refredament (entre  $80^\circ\text{C/s}$  i  $40^\circ\text{C/s}$ ) es produeix la transformació d'austenita en martensita, a velocitats intermèdies (entre  $40$  i  $4^\circ\text{C/s}$ ) la transformació de l'austenita en bainita, i a velocitats de refredament lent (inferior a  $1^\circ\text{C/s}$ ) la transformació ferrítico-perlítica.

**11.** Per mitjà del Mètode de Kissinger s'han trobat valors d'energia d'activació de 16 i 17 KJ/mol en el cas de l'acer 16MnNi4, i de 15 i 16 KJ/mol en el cas de l'acer 16Mn4, per a la transformació martensítica i bainítica respectivament. Si correlacionem els valors obtinguts per a la transformació bainítics amb altres amb continguts mitjans i alts en carboni, s'observa un molt bon ajust a una dependència lineal entre contingut en carboni i energia d'activació de la transformació.

**12.** Els valors de temperatura de transformació experimentals i els obtinguts per mitjà d'aplicació de les equacions teòriques s'ajusten correctament. Les diferències observades es deuen al fet que aquestes equacions tan sols consideren els elements que afecten a la templançabilitat de l'acer, sense considerar el possible efecte que els elements de microaleació poden tenir en el valor d'aquestes temperatures.

***Sobre les estructures bainítics (caracterització i propietats):***

**13.** El Vanadi intervé en la formació de ferrita acicular, afavorint la seva nucleació en l'estructura.

**14.** L'estudi de relacions d'orientació a través del TEM resulta ser una tècnica oportuna per a poder discernir entre els dos possibles tipus de bainita: superior i inferior, ja que ambdós presenten diferents relacions d'orientació matriu-partícula. Hi ha una relació d'orientació tipus Pichs per a la Bainita Inferior i tipus Bayariatsky per a la Bainita Superior.

**15.** Per a ambdós acers s'arriben a establir les condicions de tractament tèrmic per a l'obtenció de bainita inferior o superior. Per als dos acers s'ha establert la temperatura de bainització de 500°C com el límit a partir de la qual s'obté bainita superior i per sota bainita inferior.

**16.** Les estructures obtingudes per a l'acer 16Mn4 (V) que presenten un major contingut en V, i per tant un major percentatge en ferrita acicular, presenten menors valors de duresa i resistència mecànica (12%), encara que s'obté una millor tenacitat a l'impacte (12%).

**17.** Les mostres amb estructura de bainita superior presenten valors de duresa i resistència a la tracció menors (un 8% i 6% respectivament) que les que contenen bainita inferior. A més la bainita superior presenta una milloria del 14% en el valor de tenacitat respecte a la bainita inferior, a causa del marcat caràcter groller dels seus carburs i el seu globulització per permanència prolongada.

**18.** Respecte al material en estat inicial (laminat), les mostres per a l'acer 16MnNi4 (V+Nb) després de tractament tèrmic mostren un descens de fins al 15% en el valor de l'energia absorbida en l'assaig d'impacte Charpy, mentre que per a l'acer 16Mn (V) es dona un increment de fins al 23% en la seva magnitud.

**19.** A partir dels assajos de tenacitat Charpy, per a l'acer 16MnNi4 (V+Nb) s'observa un descens de l'energia absorbida al disminuir la temperatura d'assaig que no supera el 13%, podent-se discernir entre dos comportaments: les mostres amb presència de bainita superior experimenten un descens de l'energia absorbida més abrupte (fins a un 50%), mentre que en les mostres amb constituent tenaç de bainita inferior, la disminució d'energia absorbida no és superior al 15%.

**20.** A partir dels assajos de tenacitat Charpy, per a l'acer 16Mn4 (V) s'observa com per als assajos a  $-10^{\circ}\text{C}$  els valors d'energia obtinguts superen en un 24% als obtinguts per al material de partida. A més hi ha una caiguda abrupta del 65% en els valors d'energia absorbida per als assajos a  $-20^{\circ}\text{C}$  i  $-50^{\circ}\text{C}$ , obtenint-se valors que formen part de la transició dúctil-fràgil de l'acer en estat de recuit isotèrmic i suposen una caiguda més abrupta que en el cas del material brut de laminació ( a  $-20^{\circ}\text{C}$  el material inicial presenta millors valors que el tractat tèrmicament, mentre que a  $-50^{\circ}\text{C}$  l'energia absorbida és major en el cas de les mostres sotmeses a tractament tèrmic).

**21.** En tots els casos, un augment en el temps de tractament tèrmic sobre la tenacitat del material genera una disminució de fins al 40% en el valor d'energia absorbida per efecte d'engrossiment de carburs a l'augmentar el temps de tractament tèrmic.

**22.** Com a mitjana, els materials després de tractament tèrmic són un 7-12% més tenaços en el cas de l'acer 16Mn4 (V) que en el cas de l'acer 16MnNi4 (V+Nb).

**23.** Els resultats de l'assaig de tracció per a l'acer 16MnNi4 (V+Nb) mostren que tots els tractaments augmenten un 2-10% els valors de resistència i límit elàstic, i disminueixen en un 10% l'allargament total a ruptura. En el cas de l'acer 16Mn4 (V) les millories observades resulten molt petites (1-2%), així com la ductilitat a penes es veu modificada. Per a ambdós acers es troba que el tractament tèrmic que aporta un major increment és el realitzat a 350°C durant 60 minuts. Cal destacar que la pèrdua de ductilitat després de tractament tèrmic és major en l'acer 16MnNi4 (V+Nb) que l'acer 16Mn4 (V).

**24.** Analitzant el conjunt de propietats mecàniques estudiades, s'arriba a establir que l'acer 16MnNi4 (V+Nb) presenta una millora del 7-12% comportament a tracció respecte a l'acer 16Mn4 (V), mentre que en el cas de la tenacitat, s'observa com a pesar que la corba de transició dúctil-fràgil presenta valors més elevats per a l'acer 16MnNi4 (V+Nb), l'efecte del tractament tèrmic ocasiona que sigui l'acer 16Mn4 (V) el que presenta els valors més elevats (7-12%) dels assajos realitzats.

**25.** S'estableixen com a condicions òptimes de tractament per a l'obtenció de l'estructura amb millor combinació de propietats: 400°C 30 min per a l'acer 16MnNi4 (V+Nb), i 450°C 60 min per a l'acer 16Mn4 (V).



### ***Sobre els assajos de Nanoindentació:***

**26.** Per a l'acer 16MnNi4 s'observa un efecte de càrrega aplicada a assajos de nanoindentació a càrregues de 5 mN i 500 mN, mentre que per a l'acer 16Mn4 aquest efecte encara no és significatiu pel que es faria necessari l'anar a càrregues inclús menors.

**27.** A partir dels resultats de nanoindentació i per tractament de resultats s'ha establert que l'efecte de pile-up no és significatiu i, per tant, no es recorre a mètodes de correcció de resultats com el proposat per Cheng i Cheng.

**28.** Estudiant més en detall l'efecte de càrrega aplicada per a l'acer 16MnNi4, s'han realitzat assajos de nanoindentació a valors de càrrega aplicada de 5, 10, 20, 50 i 100 mN, observant-se una càrrega crítica de 10mN per sota de la qual l'efecte de les dislocacions presents en el material i de les generades per geometria de l'indentador passen a influenciar significativament en els valors obtinguts, traduint-se en un augment del 8-15% en el mòdul efectiu i, per tant, un augment del 15-20% en la duresa determinada. Sobre aquest efecte de càrrega aplicada a més s'ha de considerar el tipus d'estructura composta per una matriu i precipitats. Així a valors menors de càrrega aplicada, la probabilitat d'indentar només sobre precipitat augmenta, traduint-se en un augment del valor de duresa observada.

**29.** Comparant els valors de nanoindentació amb els de microindentació, s'observa la mateixa tendència per als dos acers estudiats. Els valors obtinguts per nanoindentació són un 7-10% superiors als obtinguts per microindentació. En aquest fet influeixen per un costat el tipus de tècnica utilitzada (les diferents geometries d'indentador utilitzades originen camps elàstics diferents, i existeix una diferent metodologia de determinació dels valors de duresa) i per un altre costat per la menor magnitud de càrrega aplicada en nanoindentació respecte a microindentació.