Revista de metalurgia

Influencia del tamaño del grano en las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos

M.A. Martínez*, J. Ordieres*, J. Botella**, R. Sánchez** y R. Parra**

Resumen

En el presente trabajo se lleva a cabo un análisis de la influencia del tamaño del grano de aceros inoxidables austeníticos sobre algunas propiedades mecánicas de interés en estos materiales. Se han estudiado tanto aceros estables como metaestables para valorar las diferencias de comportamiento, considerando varias coladas de cada material para promediar los resultados y obtener un comportamiento más robusto de los estimadores. Se ha procedido a una preparación y adecuación de las probetas, previa a su ensayo en laboratorio. Se han observado los comportamientos habituales de modo que, a mayor número de tamaño de grano según norma ASTM, mayor límite elástico y resistencia a la tracción y menor alargamiento; llevándose a cabo estudios de detalle de valores de las tendencias de crecimiento, comportamiento comparado de estables y metaestables y valorándose cuidadosamente la influencia del níquel presente en el material. Finalmente se presentan las principales conclusiones y valoraciones, y un estudio estadístico de las propiedades mecánicas y de las distintas coladas para lograr una mejor predicción del comportamiento.

Palabras clave Tamaño de grano. Aceros inoxidables austeníticos estables. Aceros inoxidables austeníticos metaestables. Límite elástico. Resistencia a la tracción.

Influence of grain size in mechanical properties of austenitic stainless steels

Abstract

The goal of this work is to study the influence of the grain size on mechanical properties of austenitic stainless steels. The study covers both, stable stainless steels and metastable steels. A relevant topic is to identify the differences in the behaviour of both types of steels. First of all, several steel taps are taken into account and by this way the average of results are derived. A sorted collection of them show its behaviour. Several rules are identified, like straight relationship between the number of grain size (ASTM) and the 0.2 % proof stress and the tensile strength and inverse relationship with the elongation. Specific studies analyzing the relevance of nickel are performed. Finally main conclusions and valuations are presented and some statistic results of mechanics properties and steel taps are performed in order to get better prediction of their behaviour.

Keywords Grain size. Metastable steels. Stable steels. Elastic limit. Tensile strength.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidables austeníticos son ampliamente utilizados debido a su gran resistencia a la corrosión y trabajabilidad. Sin embargo, debido a su dureza relativamente alta es, a veces, difícil asegurar bastante formabilidad en el laminado y en el recocido. La producción e láminas de aceros inoxidables más blandas seguramente extenderá el uso de estos aceros.

(*) Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de la Rioja, España.
(**) Acerinox

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

Apuntando a este objetivo, se han investigado los efectos de los elementos de aleación en las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos estables.

Los aceros inoxidables austeníticos metaestables experimentan una transformación de austenita a martensita cuando se deforman. Esta transformación más el endurecimiento por deformación de la austenita antes de la transformación y el efecto de fortalecimiento de la martensita formada durante la misma, contribuyen apreciablemente a su comportamiento plástico. También se han investigado los efectos de los elementos de aleación[1] en las propiedades mecánicas, y en el fortalecimiento de la composición austenita-martensita en este tipo de aceros[2].

Se ha pretendido por tanto, realizar un estudio sobre una serie de aceros inoxidables austeníticos tanto estables como metaestables, con la finalidad de ver la influencia de la composición química y de la estructura en las propiedades mecánicas de los mismos, ya que, con el tiempo se van produciendo cambios en los sistemas de producción y se obtienen aceros inoxidables que son aparentemente iguales a los que se fabricaban hace décadas, y, sin embargo, presentan diferencias que pareciendo sutiles llegan a ser sustancialmente importantes en algunos aspectos.

Así se tomarán materiales con composiciones químicas diferentes según diferentes grupos, y dentro de cada grupo se elegirán varios materiales de distintas coladas pero de composiciones químicas prácticamente invariables.

Se propone para cada grupo de austenitas, establecer la relación entre tamaño de grano y propiedades mecánicas ya que los granos, según su tamaño y proceso de formación, dan al metal características muy distintas. Cuanto mayor es el grano de que está constituido un metal, peores son, en general, sus propiedades mecánicas.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se han tomado dos tipos de aceros inoxidables austeníticos estables, el AISI 316 y el 316L y dos tipos de aceros inoxidables austeníticos metaestables, del tipo AISI 304DDQ. De cada tipo de acero, se han tomado cuatro coladas[3] diferentes con pequeñas variaciones de composición (tabla I).

Los aceros han sido laminados en caliente[4] hasta un espesor de 2,5 mm y después han sufrido un recocido y un decapado. A continuación, con la cizalla, se cortaron siete tiras de cada tipo de 2,5 mm de espesor, 35 mm de anchura y 300 mm de longitud para laminar en frío[5] con un

Tabla I. Composición de los aceros empleados, % en masa

Table I. Composition of steels used, mass %

	Colada	S	B	C	Cu	Cr	Mn	Mo	Ni	N	Si	Ti	Al	Co	V	As	Nb	P	Sn
Coladas AISI 304DDQ Seleccionadas	1	0,003	5	0,028	0,299	17,432	1,025	0,315	8,489	0,0405	0,373	0,005	0,004	0,142	0,051	0,006	0,006	0,031	0,017
	2	0,004	6	0,025	0,357	17,654	1,049	0,362	8,738	0,0362	0,45	0,005	0,004	0,151	0,054	0,006	0,006	0,035	0,018
	3	0,005	5	0,031	0,285	17,411	0,975	0,353	8,597	0,0386	0,343	0,004	0,004	0,266	0,08	0,014	0,015	0,031	0,015
	4	0,004	4	0,037	0,284	17,572	1,028	0,25	8,6	0,0388	0,377	0,005	0,004	0,169	0,066	0,011	0,006	0,03	0,014
Coladas AISI 304DDQ Seleccionadas	5	0,004	4	0,025	0,351	17,818	1,017	0,272	9,204	0,0291	0,351	0,005	0,004	0,154	0,078	0,011	0,005	0,032	0,016
	6	0,003	6	0,038	0,424	17,707	1,124	0,438	9,343	0,0301	0,388	0,006	0,004	0,107	0,052	0,008	0,015	0,034	0,017
	7	0,004	18	0,033	0,298	17,845	0,995	0,301	9,149	0,0293	0,373	0,01	0,004	0,145	0,041	0,006	0,006	0,031	0,016
	8	0,004	28	0,028	0,29	17,754	1,065	0,329	9,255	0,0317	0,392	0,02	0,004	0,146	0,05	0,006	0,004	0,032	0,013
Coladas AISI 316 Seleccionadas	9	0,003	21	0,042	0,428	17,238	1,231	2,195	10,851	0,0355	0,362	0,015	0,004	0,184	0,068	0,006	0,012	0,034	0,011
	10	0,009	23	0,041	0,35	17,304	1,274	2,158	10,586	0,0403	0,465	0,012	0,005	0,152	0,066	0,007	0,008	0,033	0,01
	11	0,004	22	0,038	0,319	17,304	1,229	2,174	10,711	0,0451	0,302	0,024	0,005	0,146	0,078	0,008	0,01	0,028	0,011
	12	0,004	21	0,04	0,468	17,101	1,3	2,131	10,72	0,0413	0,383	0,019	0,005	0,251	0,087	0,006	0,061	0,031	0,011
Coladas AISI 316L Seleccionadas	13	0,005	22	0,021	0,294	17,225	1,674	2,494	10,662	0,043	0,355	0,006	0,004	0,193	0,074	0,009	0,012	0,033	0,011
	14	0,005	16	0,024	0,395	17,04	1,682	2,674	10,68	0,0519	0,471	0,015	0,005	0,153	0,076	0,006	0,017	0,026	0,008
	15	0,005	24	0,029	0,429	17,071	1,548	2,598	10,766	0,0392	0,377	0,015	0,005	0,217	0,087	0,006	0,035	0,029	0,011
	16	0,004	17	0,023	0,393	17,093	1,657	2,755	10,844	0,0431	0,437	0,012	0,005	0,19	0,084	0,007	0,01	0,029	0,009

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

laminador NORTON, hasta un espesor de 0,8 mm. Así, se obtienen para cada tipo de acero 28 probetas, 7 de cada colada. Se procede a recocer estas 7 probetas de cada colada en un horno CARBOLITE RAPID HEATING con CONTROLADOR EUROTHERM, a 1.100 °C y a siete tiempos diferentes, 60 s, 70 s, 95 s, 165 s, 200 s, 5 min y 12 min, enfriando las tiras con una pistola de aire comprimido, con el fin de conseguir tamaños de grano diferentes, que mediremos por el método de interceptación, según la norma ASTM, con un microscopio LEICA Modelo REICHERT MeF 3 A con 100 aumentos.

Tras los recocidos y la toma de los tamaños de grano, se procede a medir la dureza Vickers con 300 g (HV300) de las citadas muestras, con el Durómetro VICKERS LECO V-100-C1, para luego mecanizarlas y obtener probetas de tracción normalizadas según la norma ASTM. Se ensayan, entonces, las probetas a tracción a temperatura ambiente[6] con la Máquina Universal ZWICK 1486, 250 KN, y se obtienen los datos de las propiedades mecánicas restantes, a saber: límite elástico al 0,2%, resistencia a la tracción y alargamiento.

3. RESULTADOS

Tras el procedimiento experimental indicado se recogen, en las tablas II y III, los resultados correspondientes en cuanto al límite elástico al 0,2%, a la resistencia a la tracción, al alargamiento, a la dureza Vickers y al tamaño del grano de los aceros inoxidables austeníticos en estudio.

Tabla II. Propiedades mecánicas de los aceros AISI 304DDQ

Table II. Mechanicals properties of AISI 304DDQ steels

Probeta	$Rp_{0,2}$ (N/mm^2)	Rm (N/mm^2)	A(%)	HV 300 g	GS	Probeta	$Rp_{0,2}$ (N/mm^2)	Rm (N/mm^2)	A(%)	HV 300 g	GS
1a	259	647	51,7	146	9,6	5a	249	620	49,3	145	10,3
1b	248	641	55,8	144	8,2	5b	237	607	51,9	145	9,5
1c	238	631	53,5	145	7,2	5c	227	601	49,5	137	7,7
1d	223	629	58,3	135	6,6	5d	214	591	54	137	7,1
1e	220	625	56,5	136	6,4	5e	210	585	55,6	134	7
1f	212	615	56,4	140	6,1	5f	202	579	59,4	129	6,4
1h	207	611	59,8	141	4,9	5h	195	566	56,6	130	5,5
2a	267	641	49,2	149	9,9	6a	262	632	47,1	149	10,1
2b	259	634	52,8	152	9,6	6b	251	624	49,8	139	9,7
2c	248	640	55,5	144	7,9	6c	240	615	51,1	139	9,1
2d	234	626	54,5	147	7,7	6d	227	606	51,5	146	7,6
2e	226	609	56,1	141	7,1	6e	225	602	52	132	7,4
2f	225	614	56,3	135	6,8	6f	223	600	52,4	133	6,8
2h	217	610	55,8	137	5,2	6h	213	585	52,5	138	6,4
3a	263	658	50,8	155	9,8	7a	241	619	53,1	148	9,8
3b	253	651	52,6	150	9,8	7b	242	618	49,8	146	9,4
3c	243	647	53,7	147	7,8	7c	227	613	54,2	145	8,3
3d	224	634	54,9	149	6,8	7d	217	602	55,2	145	7,4
3e	223	631	54,6	139	6,4	7e	215	597	54,6	137	7,1
3f	215	626	55,6	140	6,0	7f	210	587	54,8	140	7,1
3h	208	620	56,4	132	5,1	7h	208	590	54,2	138	6,3
4a	288	665	47,1	166	15,2	8a	253	640	49,7	152	9,6
4b	276	663	49,0	170	11,1	8b	241	630	48,7	154	9,7
4c	259	654	52,8	155	10,0	8c	230	622	50,9	144	8,0
4d	241	640	52,4	157	7,9	8d	220	615	52,8	142	7,6
4e	238	640	53,6	149	7,7	8e	221	609	51,1	144	7,4
4f	230	632	53,9	139	6,9	8f	222	611	53,8	144	7,0
4h	223	624	55,2	142	6,2	8h	216	604	53,9	140	6,8

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

Tabla III. Propiedades mecánicas del AISI 316 y del AISI 316L

Table III. Mechanicals properties of AISI 316 and AISI 31 6L

Probeta	$Rp_{0,2}$ (N/mm^2)	Rm (N/mm^2)	A(%)	HV 300 g	GS	Probeta	$Rp_{0,2}$ (N/mm^2)	Rm (N/mm^2)	A(%)	HV 300 g	GS
9a	285	611	42,6	154	10,3	13a	300	632	43,4	160	10,5
9b	281	609	45,1	149	9,9	13b	285	618	47,6	154	9,9
9c	263	592	45,1	151	9,5	13c	273	611	45,7	157	9,3
9d	256	590	47,0	144	9,3	13d	253	594	49	148	7,5
9e	253	587	47,3	143	8,0	13e	247	587	48,4	142	7,3
9f	248	579	47,0	135	7,9	13f	241	584	49,6	142	6,8
9h	236	571	48,3	135	7,2	13h	228	570	49,4	138	5,2
10a	319	646	41,5	176	15,5	14a	295	615	39,1	170	10,8
10b	306	639	42,0	173	14,9	14b	276	603	43,7	163	9,9
10c	281	617	46,9	161	10,5	14c	275	606	44,7	151	9,4
10d	264	607	47,8	154	9,6	14d	265	597	45,9	153	7,6
10e	260	604	46,4	162	9,3	14f	261	596	46,1	153	7,6
10f	255	601	48,1	149	7,6	14e	255	588	45,5	147	7,5
10h	243	582	47,1	141	7,1	14h	245	578	46	137	7,0
11a	300	637	43,6	157	10,8	15a	293	613	38,9	156	10,4
11b	288	623	41,0	159	10,2	15b	277	601	42,9	144	9,6
11c	276	618	44,7	155	9,7	15c	265	595	45,8	150	9,3
11d	260	605	45,9	150	9,3	15d	258	585	46,7	143	7,9
11e	257	598	42,5	149	8,2	15e	257	594	43,0	142	7,7
11f	253	598	49,6	149	7,8	15f	243	574	44,7	143	7,5
11h	247	590	48,5	142	7,3	15h	236	573	45,1	140	7,0
12a	292	620	43,3	156	10,4	16a	326	635	40,2	185	15,7
12b	282	612	46,2	154	10,3	16b	297	617	40,1	171	14,4
12c	269	599	45,9	153	9,8	16c	279	611	42,0	156	10,2
12d	256	592	46,1	150	8,0	16d	264	593	43,0	153	9,7
12e	255	594	47,1	146	7,7	16e	257	590	47,1	147	9,6
12f	246	581	45,3	146	7,6	16f	251	586	47,1	140	7,8
12h	238	568	46,0	136	6,9	16h	241	576	48,1	136	6,7

Dentro de cada colada de los distintos aceros se designará como a, b, c, d, e, f, h a las muestras recocidas a los siete tiempos establecidos, esto es:

Para 60 s, a. Para 200 s, e.
Para 70 s, b. Para 5 min, f.
Para 95 s, c. Para 12 min, h.
Para 165 s, d.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, se aprecia, como era de esperar, que conforme aumentamos el tiempo de recocido, el número del tamaño del grano según ASTM, disminuye; y conforme a esto, van variando las propiedades mecánicas de los distintos materiales.

En todos los aceros inoxidables austeníticos estudiados, tanto estables como metaestables, se observa la misma tónica: a mayor número de tamaño de grano (tamaño de grano más pequeño), mayores valores se obtienen de límite elástico al 0,2 %, de resistencia a la tracción[7] y de dureza, y menores valores se obtienen en cuanto a los alargamientos.

Tomando como referencia un tamaño de grano igual a siete, observamos que los aceros metaestables tienen menores valores de límite elástico al 0,2 % que los estables; mientras que, en cuanto a alargamientos y resistencias a la tracción tienen valores mayores, siendo las durezas muy similares. Esto puede atribuirse a las cantidades de manganeso, molibdeno y níquel[1], que son mayores en los

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

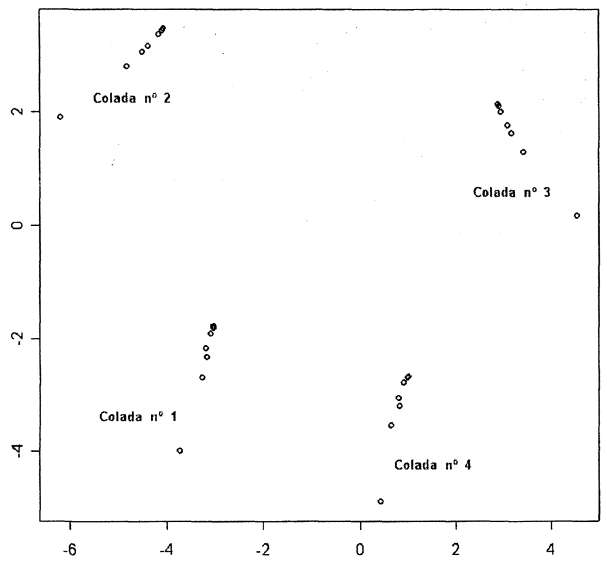

Figura 1. Proyección Sammon de las coladas correspondientes al AISI 304DDQ.

Figure 1. Proyection Sammon of tappings AISI 304 DDQ.

aceros inoxidables austeníticos estables. También influirá el tiempo de recocido, ya que en los aceros estables se consigue este tamaño de grano a mayor tiempo, 12 min, que en los metaestables, que se consigue con 200 s de recocido.

Para menores tiempos de recocido, se observa prácticamente el mismo comportamiento descrito anteriormente entre los aceros inoxidables austeníticos estables y metaestables estudiados, aunque se aprecian resistencias a la tracción muy similares, en este caso, para los cuatro aceros.

De los dos aceros austeníticos metaestables del tipo AISI 304 DDQ, entre los que hay pequeñas variaciones notables de composición, se puede indicar que es el níquel[7] el que más influye, de modo que el segundo de ellos, que tiene mayores proporciones de níquel, es el que tiene menores valores de sus propiedades mecánicas.

Analizando los resultados recogidos para los aceros inoxidables austeníticos estables[8], el AISI 316 y el AISI 316L, se observa que, en cuanto a sus composiciones, los cambios más notables se aprecian en las cantidades de manganeso y molibdeno, ya que las cantidades de los restantes elementos presentan muy pocas variaciones de uno a otro. El AISI 316L, que es el que mayores proporciones tiene de los citados elementos, manganeso y molibdeno, es el que presenta menores valores del límite elástico al 0,2 %.

A la vista del elevado número de parámetros que definen la colada, se procedió a un estudio de Análisis de Componentes Principales (PCA) con variables centradas y normalizadas, incluyendo el tiempo de recocido, empleando la herramienta R [9]. Este PCA revela que el 98 % de la varianza es explicado por 5 vectores principales:

3,414990e+01 2,447841e+01 1,952974e+01
1,092098e+01 1,092098e+01
1,423257e-15 8,496003e-16 4,394419e-16
1,586810e-17 1,001517e-17
5,171095e-18 3,335930e-18 2,892357e-18
1,624103e-18 1,359232e-18
7,033654e-19 6,207045e-19 1,429825e-19
0,000000e+00 0,000000e+00

Esto permitiría no tener que medir los 20 parámetros de composición química sino sólo 5 de ellos para identificar la familia correctamente.

Adicionalmente, se ha procedido a efectuar una proyección MDS de Sammon para visualizar las clases que cada colada, incluyendo el tiempo de recocido, genera en un plano bidimensional con la condición de mantener las interdistancias en R^{21} lo más parecidas posible al espacio original.

El resultado puede visualizarse en el gráfico adjunto (Fig. 1).

Agradecimientos

Los autores agradecen a todo el personal de los laboratorios de la factoría de Acerinox en el Campo de Gibraltar, sin cuya ayuda hubiera sido imposible toda la realización práctica de este proyecto.

REFERENCIAS

[1] R. E. TREVISAN, E. BRAGA y H.C. FALS, *Rev. Metal. Madrid* 38 (2002) 256-262.

[2] G.H. EICHELMAN, JR., y F.C. HULL, *Trans. Am. Soc. Met.* 45 (1952) 77-104.

[3] J. BOTELLA, C. MERINO, M.A. HEREDIA y J. ALMAGRO, *Rev. Metal. Madrid* 35 (1999) 173-181.

[4] C. CAMURRI, M. LÓPEZ, J. INOSTROZA, M. GUZMÁN y J. A. JIMÉNEZ, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 35-40.

[5] G. DE DIEGO, Mª L. CASTAÑO y M. HERNÁNDEZ, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 407-420.

[6] A. JIRONES, A. MATEO, L. LLANES y M. ANGLADA, *Rev. Metal. Madrid* 37 (2001) 150-154.

[7] K.A. MOHAMED, A.A. KHEDR, M.L. MISHREKY y A.A. ABDUL AZIM, *Surf. Technol.* 17 (1982) 11-18.

[8] N. OHKUBO, K. MIYAKUSU, Y. UEMATSU y H. KIMURA, *ISIJ Int.* 34 (1994) 764-772.

[9] http://www.r-project.org. *Paquete estadístico de clasificación avanzada.*

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es