

Análisis de la fragilización por envejecimiento a baja temperatura de los aceros CF8M^(*)

L. Mazorra (*), F. Gutiérrez-Solana (*), J. González (*) y J. M. Varona (*)

C.D.U. 539.56:621.785.784:669.15=60

Resumen

En el marco de una investigación de carácter más general, en la que se analiza la fragilización térmica a 280 °C de los aceros inoxidable austenoferríticos moldeados, en el presente trabajo se estudia el comportamiento de los aceros CF8M frente a este problema como continuación a los resultados expuestos en un artículo anterior. Los modelos de comportamiento a que se llega, se basan en los efectos que ejercen los diferentes elementos que entran en la composición del acero y en la cantidad de ferrita que éste contiene. La influencia de la composición química sobre el comportamiento dúctil del acero sugiere, para evaluar el estado de fragilización, la conveniencia del empleo de la relación existente entre el trinomio Si + Cr + Mo y la tenacidad a temperatura ambiente. El contenido de ferrita presenta un nivel crítico asociado al umbral de continuidad geométrica del camino de fractura a lo largo de aquella.

Analysis of Low Temperature Aging Embrittlement of CF8M Stainless Steel Castings

Abstract

As part of a more general work about the embrittlement of austenoferritic stainless steel castings by exposure at 280 °C, this article analyses the expected behaviour of CF8M steels following the results obtained in a previous one. The behaviour models show the effects of both the chemical composition and the ferrite amount. The influence of the chemical composition on the ductile behaviour of the steel suggests the use of the correlation between the trinomial Si + Cr + Mo and the toughness at room temperature to determine the embrittlement achieved. The content of ferrite shows a critical value for embrittlement associated to the continuity of the fracture path through it.

1. INTRODUCCION

Los aceros inoxidable moldeados dúplex tienen una importante aplicación en elementos de alta responsabilidad en centrales nucleares. En un artículo anterior (1) se analizó la modelización teórica existente acerca del problema de la fragilización térmica de dichos aceros por envejecimiento a temperatura de 280 °C, análoga a la existente en circuitos de recirculación, al tiempo que se desarrolló un ejemplo-aplicación real correspondiente a un elemento de carcasa de bomba de acero CF8M. Las conclusiones obtenidas para

dicho acero resultaron de todo punto ilustrativas y avisaban de una importante fragilización. La trascendencia de los resultados obtenidos recomienda una mayor profundización que indique la magnitud del fenómeno estudiado desde un punto de vista más global. El presente artículo, con ese objetivo, amplía el alcance del estudio a los aceros CF8M utilizando, en las aplicaciones, la muestra de aceros ensayados disponible en bibliografía (2 y 3). El estudio así acometido permitirá llegar a conclusiones que, superando lo puntual de la aplicación a un acero en particular, se erijan en criterios de diagnóstico de una situación de fragilización dada en aceros análogos (CF3, CF8 y CF8M). Poder definir parámetros de diseño basados en los modelos de fragilización

(*) Trabajo recibido el día 16 de noviembre de 1988.

(*) E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Univ. de Cantabria. Avda. de los Castros, s/n. 39005-Santander.

que resulten, requeriría una exhaustiva experimentación que complementara y contrastara las conclusiones obtenidas.

2. FRAGILIZACION DEL ACERO CF8M

Habida cuenta del objetivo planteado en el presente artículo, entre todos los modelos estudiados en nuestro artículo anterior (1), el desarrollado por los investigadores franceses Slama, Petrequin y Mager (3), mediante las expresiones polinómicas para la energía de activación U , y para la tenacidad a temperatura ambiente, KCU_1 ($T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $t = 10.000\text{ h}$), KCU_2 ($T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $t = 30.000\text{ h}$), es el elegido como base del análisis (1-3). La bondad de estas expresiones ha sido contrastada para diferentes coladas.

Inicialmente, se exige discutir la sensibilidad matemática de las «funciones-medida de fragilización» propuestas con respecto a las variaciones de las cantidades de cada uno de los elementos de composición de efecto importante, así como del porcentaje de fase ferrítica presente. Posteriormente, se intentará la aplicación de lo establecido a los aceros CF8M, por su composición y microestructura, contrastando las previsiones con la experimentación realizada, presente en la bibliografía.

2.1. Estudio de la sensibilidad de las expresiones polinómicas para U y KCU

El estudio se centra en el efecto de la cantidad de ferrita y de los elementos silicio, cromo y molibdeno, parámetros que Slama, Petrequin y Mager proponen como críticos. La cantidad de fase ferrítica es función de las variables independientes, contenido en elementos de aleación, por lo que el estudio deviene en un ejercicio de derivación compuesta.

2.1.1. Sensibilidad de la expresión de la energía de activación U

La expresión de la energía de activación, U , base del análisis es (1-3):

$$U = - 43,64 + 4,76 \% \text{ Si} + 2,65 \% \text{ Cr} + 3,44 \% \text{ Mo} \text{ (kcal/mol)} \quad [1]$$

Derivando parcialmente respecto a las variables independientes y aplicando el resultado a los incrementos correspondientes a los intervalos de composición de los aceros CF8M (Tabla I), se confecciona la tabla II (teórico). Se aprecia que

TABLA I.— Intervalo de composición de los aceros CF8M (4)

Composición, %		F, %
C (máx)	< 0,08	Ferrita < 25
Mn (máx)	< 1,50	
Si (máx)	< 2,00	
Cr	18,0 a 21,0	
Ni	9,0 a 12,0	
Mo	2,0 a 3,0	

la variación del silicio es la que resulta más influyente, al menos en potencia. Al ser las derivadas parciales positivas, la energía de activación aumenta con el contenido de los elementos analizados, con lo que disminuye la velocidad de precipitación-fragilización.

Tomando todas las coladas de CF8 y CF8M disponibles en la bibliografía consultada (2 y 3), se hace un tratamiento similar en la tabla II (medido). Atendiendo a este muestreo, son las variaciones de cromo y silicio las que, de hecho, tienen mayor influencia sobre la energía de activación. Los porcentajes de variación de la cantidad de molibdeno se encuentran dentro de un intervalo muy reducido y, por tanto, el efecto de su variación resulta poco significativo.

Se sigue un método análogo para la obtención de los valores extremos (Tabla III).

2.1.2. Sensibilidad de las expresiones para la energía de impacto KCU_1

La expresión de la tenacidad a temperatura ambiente, para condiciones de envejecimiento de $400\text{ }^\circ\text{C}$ y 10.000 h , que se analiza es (1-3):

$$KCU_1 = 52,5 - 2,19 (\text{Si} + \text{Cr} + \text{Mo}) + 46/F \text{ (daJ/cm}^2\text{)} \quad [2]$$

En este apartado, se utilizará el modelo de Hull (1) para la expresión de la ferrita teórica supuesta:

$$\% F = 0,599 \Phi^2 + 1,715 \quad [3]$$

$$\Phi = - (\% \text{ Ni} + 0,11 \% \text{ Mn} - 0,0086 \% \text{ Mn}^2 + 18,4 \% \text{ N} + 24,5 \% \text{ C} + 4,7 - 0,94 \% \text{ Cr} - 1,14 \% \text{ Mo} - 0,45 \% \text{ Si}) \quad [4]$$

Planteado como un ejercicio de derivación compuesta, se obtienen las expresiones que se detallan

TABLA II.— Sensibilidad de U para los incrementos teóricos y medidos experimentalmente de silicio, cromo y molibdeno, en el intervalo de composición de los aceros CF8M

Teórico	Derivadas parciales	Incremento de la variable (CF8M), %	Función U	
			Incremento del valor absoluto, kcal/mol	Incremento relativo, %
Silicio	$\partial U/\partial \text{Si} = 4,76$	$\Delta \text{Si} \leq 2$	$\Delta U \leq 9,52$	$\Delta U \leq 46$
Cromo	$\partial U/\partial \text{Cr} = 2,65$	$\Delta \text{Cr} \leq 3$	$\Delta U \leq 7,95$	$\Delta U \leq 38$
Molibdeno	$\partial U/\partial \text{Mo} = 3,44$	$\Delta \text{Mo} \leq 1$	$\Delta U \leq 3,44$	$\Delta U \leq 16$
Medido				
Silicio	$\partial U/\partial \text{Si} = 4,76$	$\Delta \text{Si} \leq 1,46$	$\Delta U \leq 6,95$	$\Delta U \leq 46$
Cromo	$\partial U/\partial \text{Cr} = 2,65$	$\Delta \text{Cr} \leq 2,34$	$\Delta U \leq 6,20$	$\Delta U \leq 41$
Molibdeno	$\partial U/\partial \text{Mo} = 3,44$	$\Delta \text{Mo} \leq 0,61$	$\Delta U \leq 2,10$	$\Delta U \leq 14$

TABLA III.— Valores extremos de la función U para composiciones extremas teóricas y medidas experimentalmente

Teórico	Si, %	Cr, %	Mo, %	U kcal/mol
Mínimo	0	18	2	10,94
Máximo	2	21	3	31,85
Medido				
Mínimo	0,35	18,66	2,30	15,39
Máximo	1,81	21,00	2,91	30,64

en la tabla IV. A modo de ejemplo, un orden de magnitud de los valores de estas funciones se obtiene por aplicación a las características del acero CB (Tabla V). Los valores así obtenidos se utilizarán como «representativos». En un primer análisis se aprecia que la fragilización será tanto más acusada cuanto mayor sea el incremento de la presencia de los elementos de composición.

TABLA IV.— Derivadas parciales de las funciones F y KCU₁ respecto al silicio, cromo y molibdeno

	$\Delta F, \%$	$\Delta KCU_1, \text{ daJ/cm}^2$
ΔSi	$\partial F/\partial \text{Si} = 0,5391 \Phi$	$\partial KCU_1/\partial \text{Si} = -2,19 - 24,799 \Phi/F^2$
ΔCr	$\partial F/\partial \text{Cr} = 1,1278 \Phi$	$\partial KCU_1/\partial \text{Cr} = -2,19 - 51,879 \Phi/F^2$
ΔMo	$\partial F/\partial \text{Mo} = 1,3680 \Phi$	$\partial KCU_1/\partial \text{Mo} = -2,19 - 62,918 \Phi/F^2$

TABLA V.— Valores de las derivadas parciales de las funciones F y KCU₁ para el acero CB

	$\Delta F, \%$	$\Delta KCU_1, \text{ daJ/cm}^2$
ΔSi	$\partial F/\partial \text{Si} = 3,05$	$\partial KCU_1/\partial \text{Si} = -2,51$
ΔCr	$\partial F/\partial \text{Cr} = 6,38$	$\partial KCU_1/\partial \text{Cr} = -2,86$
ΔMo	$\partial F/\partial \text{Mo} = 7,74$	$\partial KCU_1/\partial \text{Mo} = -3,01$

Siguiendo un esquema análogo al utilizado en el apartado anterior, se aplican los resultados de la tabla V para la determinación de la variabilidad de KCU₁ en función de los incrementos teóricos máximos correspondientes al intervalo de composición de los aceros CF8M, así como de los medidos en los trabajos referenciados (Tabla VI). De dicha tabla se deduce que es el cromo el elemento para el que la tenacidad al impacto a temperatura ambiente tiene mayor sensibilidad de variación, dentro del intervalo de composición de los aceros CF8M.

TABLA VI.— Sensibilidad de la función KCU_1 a la variación, teórica y medida según los datos tomados de la bibliografía, de silicio, cromo y molibdeno en el intervalo de composición de los aceros CF8M

Teórico	Derivadas parciales	Incremento de la variable (CF8M), %	KCU_1 Incremento del valor absoluto, J/cm ²
Silicio	$\Delta KCU_1 / \Delta Si \approx -25,1$	$\Delta Si \leq 2$	$ KCU_1 \leq 50,2$
Cromo	$\Delta KCU_1 / \Delta Cr \approx -28,6$	$\Delta Cr \leq 3$	$ KCU_1 \leq 85,8$
Molibdeno	$\Delta KCU_1 / \Delta Mo \approx -30,1$	$\Delta Mo \leq 1$	$ KCU_1 \leq 30,1$
Medido			
Silicio	$\Delta KCU_1 / \Delta Si \approx -25,1$	$\Delta Si \leq 1,46$	$ KCU_1 \leq 36,6$
Cromo	$\Delta KCU_1 / \Delta Cr \approx -28,6$	$\Delta Cr \leq 2,34$	$ KCU_1 \leq 66,9$
Molibdeno	$\Delta KCU_1 / \Delta Mo \approx -30,1$	$\Delta Mo \leq 0,61$	$ KCU_1 \leq 18,4$

2.1.3. Sensibilidad de las expresiones para la energía de impacto KCU_2

La expresión de la tenacidad a temperatura ambiente, para condiciones de envejecimiento de 400 °C y 30.000 h, que se analiza, es (1-3):

$$KCU_2 = 32,8 - 1,39 (Si + Cr + Mo) + 60/F \text{ (daJ/cm}^2\text{)} \quad [5]$$

Las tablas VII, VIII y IX recogen los resultados obtenidos. Como se puede observar, de nuevo la tenacidad es más sensible a la variación del contenido de cromo que a la de otros elementos, siendo el efecto de éste más acusado a medida que aumenta el envejecimiento.

2.1.4. Consideración final. Análisis cualitativo de la sensibilidad

Los incrementos de concentración de los elementos citados, silicio, cromo y molibdeno, ac-

túan en sentidos opuestos sobre la velocidad de fragilización, asociada a la energía de activación U , y sobre la fragilización misma, resiliencia residual, KCU_1 y KCU_2 . La energía de activación aumenta con el contenido de estos elementos, disminuyendo la velocidad de precipitación y, por tanto, ralentizándose el problema, mientras que la tenacidad disminuye, aumentando la capacidad fragilizante. Esto implicará, por tanto, que aceros inoxidables que, por su composición química, dan lugar a valores de KCU no preocu-

TABLA VIII.— Valores de las derivadas parciales de las funciones F y KCU_2 para el acero CB

	$\Delta F, \%$	$\Delta KCU_2, \text{ daJ/cm}^2$
ΔSi	$\partial F / \partial Si = 3,051$	$\partial KCU_2 / \partial Si = -1,81$
ΔCr	$\partial F / \partial Cr = 6,383$	$\partial KCU_2 / \partial Cr = -2,27$
ΔMo	$\partial F / \partial Mo = 7,743$	$\partial KCU_2 / \partial Mo = -2,45$

TABLA VII.— Derivadas parciales de las funciones F y KCU_2 respecto a los contenidos en silicio, cromo y molibdeno

	$\Delta F, \%$	$\Delta KCU_2, \text{ daJ/cm}^2$
ΔSi	$\partial F / \partial Si = 0,5391 \Phi > 0$	$\partial KCU_2 / \partial Si = -1,39 - 32,346 \Phi / F^2 < 0$
ΔCr	$\partial F / \partial Cr = 1,1278 \Phi > 0$	$\partial KCU_2 / \partial Cr = -1,39 - 67,668 \Phi / F^2 < 0$
ΔMo	$\partial F / \partial Mo = 1,3680 \Phi > 0$	$\partial KCU_2 / \partial Mo = -1,39 - 67,667 \Phi / F^2 < 0$

TABLA IX.— Sensibilidad de la función KCU_2 a la variación, y medida según los datos tomados de la bibliografía, teórica de silicio, cromo y molibdeno en el intervalo de composición de los aceros CF8M

Teórico	Derivadas parciales	Incremento de la variable (CF8M), %	KCU_2 Incremento del valor absoluto, J/cm^2
Silicio	$\Delta KCU_2 / \Delta Si \approx -18,1$	$\Delta Si \leq 2$	$ KCU_2 \leq 36,2$
Cromo	$\Delta KCU_2 / \Delta Cr \approx -22,7$	$\Delta Cr \leq 3$	$ KCU_2 \leq 68,1$
Molibdeno	$\Delta KCU_2 / \Delta Mo \approx -24,5$	$\Delta Mo \leq 1$	$ KCU_2 \leq 24,5$
Medido			
Silicio	$\Delta KCU_2 / \Delta Si \approx -18,1$	$\Delta Si \leq 1,46$	$ KCU_2 \leq 26,4$
Cromo	$\Delta KCU_2 / \Delta Cr \approx -22,7$	$\Delta Cr \leq 2,34$	$ KCU_2 \leq 53,1$
Molibdeno	$\Delta KCU_2 / \Delta Mo \approx -24,5$	$\Delta Mo \leq 0,61$	$ KCU_2 \leq 14,9$

pantes para un valor de P , parámetro de envejecimiento prefijado, alcanzan, con mayor celeridad que otros más fragilizables, esa situación de envejecimiento y la pérdida de tenacidad correspondiente. Por el contrario, aceros cuyos KCU , según la expresión polinómica, resultarían preocupantes, alcanzarán esta situación en períodos más prolongados que otros menos fragilizables.

El estudio realizado, teniendo en cuenta los períodos de vida reales de las estructuras a las que se aplica, indica que la situación pésima está más próxima a celeridades bajas y fuertes fragilizaciones finales. Pese a demorarse algo más en el tiempo llegan a alcanzar valores preocupantes dentro de períodos de vida razonables. Todo ello queda ilustrado con el estudio sistemático realizado para los aceros CF8M.

2.2. Análisis de la fragilización de los aceros CF8M referenciados en bibliografía

Se dispone de dos métodos para afrontar este análisis una vez que se ha estudiado la sensibilidad de las expresiones:

- Estudio del intervalo del proceso teórico, acotando los valores de las funciones U y KCU .
- Estudio del comportamiento de los aceros CF8M de que se dispone por la bibliografía existente.

El primer enfoque sólo lleva a resultados de utilidad en los valores extremos de la función U . Si se aplica este método a los valores de KCU_1 y

KCU_2 , se llega a obtener desde resiliencias remanentes ínfimas, para las concentraciones pésimas de los elementos fragilizantes, hasta valores en torno a los $100 J/cm^2$ ($10 daJ/cm^2$), de lo que pocas conclusiones podrían obtenerse si se exceptúa la indeterminación que muestra.

El segundo enfoque es mucho más ilustrativo, y es el que se afronta a continuación, utilizándose para este estudio los aceros CF8M, de los que se dispone una caracterización válida por las publicaciones de Trautwein y Gysel (2) y de Slama, Petrequin y Mager (3).

Los resultados obtenidos al sustituir las características de estos aceros en las expresiones polinómicas correspondientes se relacionan en la tabla X. En los casos en que las previsiones llevan a una relación de la forma: $KCU_2 > KCU_1$, se ha desestimado la misma, ya que se considera como única relación posible la de inecuación: $KCU_2 \leq KCU_1$.

Los resultados obtenidos acotan los valores de U y de KCU de la manera que se cita en la tabla XI, en la que se aportan los datos estadísticos del muestreo analizado. Estos datos estadísticos se obtuvieron desestimando los extremos, considerados como no representativos, alcanzándose así dispersiones en torno al 10 % para la energía de activación y al 25 y 15 % para las tenacidades en las condiciones de envejecimiento de cálculo. Aun así resultan poco ilustrativos, fundamentalmente por el hecho de que corresponden a diferentes tiempos de envejecimiento a $280 ^\circ C$ ($P = cte$). Por ello resulta más coherente agrupar los datos en función de los tiempos de fragilización y volver a realizar el estudio de los datos estadísticos. La tabla XII presenta el resultado de este tratamiento, que pone de manifiesto la

TABLA X.— Valores de U , KCU_1 y KCU_2 según las expresiones polinómicas para los aceros CF8M (2-3)

Aceros CF8M							$P = 4$	(T = 280 °C)		$P = 4,48$	
Colada	Si, %	Cr, %	Mo, %	Si+Cr+Mo, %	F, %	U , cal/mol	KCU_1 , J/cm ²	t, años	I_{P4} , J _{DVM}	KCU_2 , J/cm ²	t, años
Slama, Petrequin y Mager											
B	0,93	20,12	2,52	23,67	14,5	22.774	38,35	44,8	27	38,35	135
D	0,94	19,15	2,44	22,53	12,5	19.975	68,39	28,5	48	62,83	86
I	0,98	19,36	2,40	22,74	15,5	20.585	56,67	31,5	40	50,62	95
J	0,38	18,66	2,91	21,95	8,5	17.628	98,41	19,5	69	93,48	59
K	0,75	20,80	2,62	24,17	14,0	24.063	28,53	55,1	20	28,53	166
L	0,81	20,76	2,48	24,05	17,5	23.761	24,59	52,5	17	24,59	159
Trautwein y Gysel											
285	0,86	18,8	2,35	22,01	10	18.358	88,98	22,0	62	82,06	66
286	1,33	20,2	2,44	23,97	22	24.614	20,97	60,2	15	20,97	182
287	0,51	20,5	2,58	23,59	38	21.988	20,48	39,5	14	15,89	119
288	1,71	19,6	2,53	23,84	28	25.095	19,55	65,1	14	18,19	197
289	1,44	19,7	2,30	23,44	30	23.331	27,00	49,0	19	22,18	148
290	1,51	20,0	2,40	23,91	32	24.804	15,75	62,1	11	14,40	188

TABLA XI.— Acotación de los valores de U , KCU_1 y KCU_2 obtenidos

	Mínimo	Máximo	Valor medio	Dispersión
U , cal/mol	17.628	25.095	22.059	2.439
KCU_1 , J/cm ²	15,75	98,41	25,64 * (34,25) **	6,08 * (17,28) **
KCU_2 , J/cm ²	14,40	93,48	23,80 * (33,20) **	3,78 * (15,21) **

* Sin valores extremos, 2.ª iteración.

** Sin valores extremos, 1.ª iteración.

TABLA XII.— Valores medios del KCU_1 e I_{P4} en función del tiempo de envejecimiento correspondiente

Tiempo de envejecimiento, h	años	KCU_1 medio, J/cm ²	I_{P4} medio, J _{DVM}	F, %	Comentarios sobre la ferrita
0-87.600	0-10	-	-	-	
-175.200	10-20	98,41	69	8,5	No fragilizable (< 10 %)
-262.800	20-30	78,69	55	11,3	Ligeramente fragilizable (< 12 %)
-350.400	30-40	38,58	27	25,8	Fragilizable intervalo comercial
-438.000	40-50	32,50	23	22,3	Fragilizable intervalo comercial
-525.600	50-60	24,70	17	17,8	Fragilizable intervalo comercial
-613.200	60-70	18,76	13	30,0	Fragilización intervalo no comercial (> 25 %)
-700.800	70-80	-	-	-	

asociación de situaciones de mayor fragilización, medida por la pérdida de tenacidad, con tiempos de envejecimiento más prolongados, conforme a lo previsto en el apartado anterior en el análisis de la sensibilidad de las expresiones polinómicas utilizadas.

Asimismo, en ella se puede observar cómo la fragilización concuerda con los contenidos de ferrita respectivos. Los valores más altos de resiliencia remanente coinciden con contenidos de ferrita por debajo o próximos al valor del 10 %. De otro lado, los aceros con porcentajes de ferrita próximos o superiores al 20 % presentan una

fragilización drástica, tal como ya se establecía en la introducción teórica de nuestro artículo anterior (1). Las cantidades de ferrita superiores al 25 % corresponden a aceros de laboratorio, fuera del intervalo de composición comercial, que muestran una fragilización aún más acusada.

Si se correlaciona gráfica y analíticamente la tenacidad al impacto remanente, representada por el parámetro KCU_1 , como medida de la fragilización, con respecto al trinomio (Si + Cr + Mo), en representación del control que la composición tiene en el proceso fragilizante, y al contenido de ferrita, obtenemos los resultados que se represen-

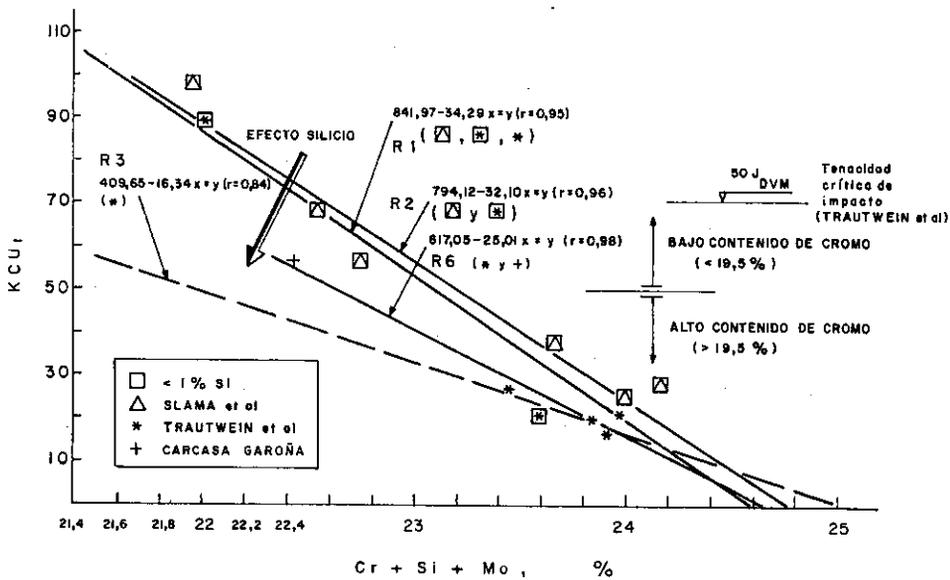


FIG. 1.— Regresión KCU_1 frente al trinomio (Si + Cr + Mo) para aceros CF8M. Efecto del contenido de silicio.

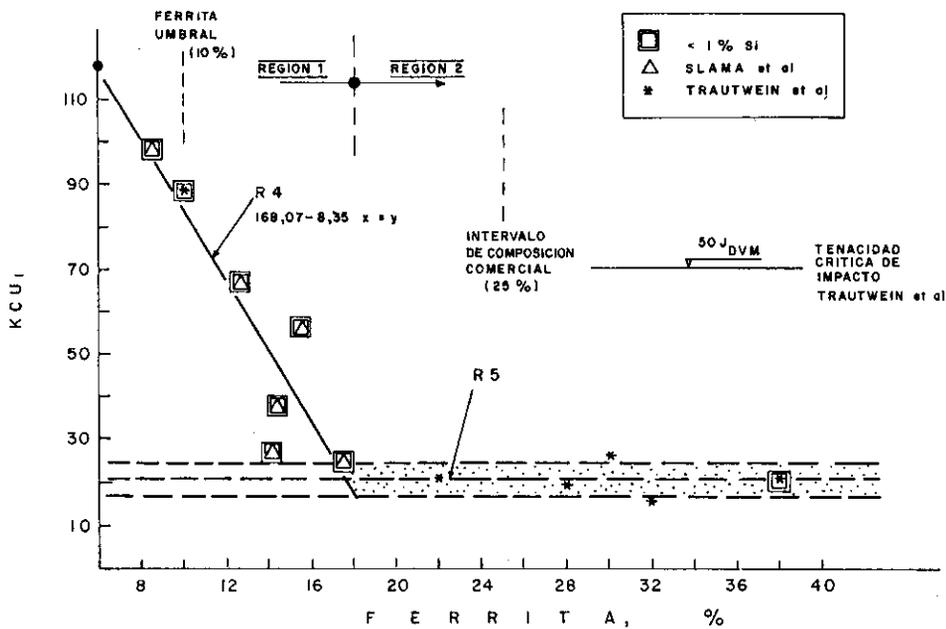


FIG. 2.— Regresión KCU_1 frente al contenido de ferrita para aceros CF8M.

TABLA XIII.— *Expresiones de las rectas de regresión y valores del coeficiente de correlación de la figura 1.*

Recta	Expresión, J/cm ²	Coefficiente de correlación	Si, %
R ₁	841,97-34,29 (Si+Cr+Mo) = KCU_1	0,95	< 2
R ₂	794,12-32,10 (Si+Cr+Mo) = KCU_1	0,96	< 1
R ₃	409,65-16,34 (Si+Cr+Mo) = KCU_1	0,84	> 1

TABLA XIV.— *Expresiones explícitas de las rectas de regresión R₂ y R₆*

Recta	Expresión, J/cm ²	Coefficiente de correlación	Si, %
R ₂	794,12-32,10 (Si+Cr+Mo) = KCU_1	0,96	< 1
R ₆	617,05-25,01 (Si+Cr+Mo) = KCU_1	0,97	> 1

TABLA XV.— *Expresiones de las rectas de regresión y valores del coeficiente de correlación de la figura 2*

Recta	Expresión, J/cm ²	Coefficiente de correlación	F, %
R ₄	168,07-8,35 % F = KCU_1	0,90	< 18
R ₅	Banda $KCU_1 = 20,7 \pm 4,0$	-	> 18

tan en las figuras 1 y 2 y en las tablas XIII a XV. Resultados análogos se hubieran obtenido para el parámetro KCU_2 .

La correlación obtenida frente al trinomio (Si + Cr + Mo) resulta ser muy ajustada; la recta R₁ presenta un elevado coeficiente de correlación, $r = 0,95$. Sin embargo, dicha expresión enmascara el efecto producido por cada uno de los elementos aleados, que se produce con pesos muy diferentes: derivadas parciales estudiadas. A fin de plasmar dicho efecto de forma discriminada se han estudiado diferentes correlaciones, disgregando la muestra en función del contenido de determinados elementos:

- El contenido de silicio presenta un expresivo efecto sobre la tenacidad al impacto remanente. Se han tratado por separado los ace-

ros con más de 1 % de silicio y los de menor contenido. El resultado son las correlaciones R₂ y R₃. Como puede apreciarse, el silicio desplaza hacia menores valores de tenacidad, en abanico, las rectas de regresión. Introduciendo el dato correspondiente al acero de carcasa CB (1), partiendo de su ferrita teórica, 20,45 %, se obtienen las rectas de regresión R₂, que no varía, y R₆, modificación de la R₃. Las expresiones de éstas se indican en la tabla XV. Es de hacer notar la evidente mejora que se alcanza en el ajuste con este tratamiento discriminado, abundando en la bondad de la hipótesis realizada.

Si se representan estas últimas rectas, queda corroborada la anterior apreciación. El haz de rectas obtenido barre en abanico el espacio (Si + Cr + Mo) - KCU_1 , pivotando sobre el margen izquierdo, en función del contenido de silicio.

- El contenido de cromo presenta un efecto evidente a la vista de las gráficas. Los aceros que presentan tenacidades remanentes superiores a 50 J/cm² tienen contenidos de cromo inferiores a la media, 19,5 %, para el intervalo de composición del acero CF8M de 18-21 % de Cr, y, al revés, las tenacidades al impacto remanentes de aceros con mayor contenido de cromo, superior a la media, se centran en una banda de valores muy inferiores al considerado crítico.

La regresión realizada con respecto a los contenidos de ferrita de estos aceros parece establecer una relación $KCU_1 - \% F$ en dos regiones claramente diferenciadas. Una primera, para contenidos de ferrita inferiores al 18 %, donde la fragilización puede ser asimilada mediante una recta de regresión R₄ con un ajuste razonable, $r = 0,90$, y una segunda, a partir de dicho porcentaje, 18 %, donde la fragilización se estabiliza sobre una banda de tenacidades al impacto remanentes en torno a los 20 J/cm² con una dispersión de 4 J/cm².

Resulta interesante, desde un punto de vista más cualitativo que cuantitativo, a modo de orden de magnitud, conocer el nivel de ferrita para el que las resiliencias remanentes, para condiciones de envejecimiento definidas por un parámetro $P = 4$, empiezan a ser menores a la crítica para elementos de alta responsabilidad: 50 J_{DVM} (2). La cantidad crítica obtenida es:

$$\% Ferrita_{50 J_{DVM}} = 11,5 \% \quad [6]$$

Por tanto, el intervalo para el que los valores de tenacidad remanente resultan ser inferiores al crítico es de: $11,5 \% < \% F < 25 \%$.

Teniendo en cuenta que puede considerarse como umbral de fragilización un 10 % de ferrita, se concluye que prácticamente todo el intervalo de contenidos de ferrita para estos aceros en situación comercial resulta preocupante de cara a su fragilización, siendo a partir de, aproximadamente, el 18 % de ferrita cuando la resiliencia resulta estabilizarse en un valor de 20 J/cm^2 , $14 \text{ J}_{\text{DVM}}$, lo que supone una fragilización en torno al 93 %, cifra que no necesita mayores comentarios.

3. CONCLUSIONES

El énfasis que en la bibliografía se hace sobre la influencia del molibdeno en la fragilización, puede ser debido a que éste es el elemento que distingue los aceros CF8M de los CF8, y a su efecto sobre la formación de ferrita. Dentro de los aceros CF8M, la sensibilidad de variación de los parámetros de fragilización es superior para modificaciones de otros elementos y preferentemente del cromo, factor importante en la constitución de la ferrita y de los propios precipitados fragilizantes. De ello se concluye que el análisis de la fragilización de estos aceros debe comprender, a ser posible, el estudio de la influencia de todos sus componentes y de la presencia de ferrita, a su vez condicionada por aquellos.

En un análisis simplista se encuentra una buena correlación del nivel de fragilización con el contenido de ferrita, estableciéndose el efecto de ésta en los niveles siguientes:

- a) Los aceros con contenido de ferrita inferiores o próximos al 10 % no presentan fragilización preocupante, aún con un importante contenido de molibdeno. Puede hablarse, por tanto, de un umbral de fragilización del contenido de ferrita.
- b) Los aceros con un contenido de ferrita en el intervalo 11,5-25 % presentan un valor del parámetro que mide su tenacidad, I_{P4} , por debajo del valor considerado como crítico para elementos de alta responsabilidad. El descenso de la tenacidad en estos aceros es especialmente acusado cuando el contenido de ferrita es superior al 18-20 %.

Este efecto se ha podido resumir con una correlación en dos niveles; para contenidos de ferrita inferiores a 18-20 % hay un efecto creciente de la fragilización (región I), caracterizado por el des-

censo en la tenacidad del acero y, a partir de un contenido de ferrita de un 20 %, el efecto de fragilización es prácticamente constante (región II), alcanzándose un nivel de KCU_1 de 20 J/cm^2 a temperatura ambiente.

Este hecho se puede explicar con la necesidad de un valor mínimo del contenido de ferrita, establecido en un 20 %, para que exista una continuidad geométrica en el camino de fractura del material, de forma que a partir de ese valor la rotura tiene lugar exclusivamente a través de la fase ferrítica. Para porcentajes de ferrita inferiores al 20 %, el camino de fractura atraviesa fases austenítica y ferrítica, y el efecto de fragilización de la ferrita es amortiguado por la mayor tenacidad de la austenita en función de su porcentaje. Sin embargo, al estar presente la ferrita en proporciones superiores, el camino de fractura se orienta preferentemente a través de ella, haciendo que la tenacidad remanente del acero sea independiente del contenido en ferrita y sólo dependiente del grado de fragilización de ésta.

El nivel de fragilización depende del tiempo, a través del valor de la energía de activación U correspondiente. Para obtener mayores grados de fragilización es necesario más tiempo, aunque se observa un efecto estabilizador del proceso para un tiempo que nunca supera los 40-60 años.

El análisis de la fragilización, medido por el parámetro KCU_1 , en relación con la suma de los contenidos de molibdeno, cromo y silicio, muestra una excelente correlación, dependiente del contenido de silicio. El grado de correlación observado es mejor que el encontrado en relación con el contenido de ferrita. Ello permite, únicamente con el conocimiento de la composición química de los aceros, una previsión de su fragilización bastante plausible.

REFERENCIAS

- (1) L. MAZORRA, F. GUTIÉRREZ-SOLANA, J. GONZÁLEZ y J. M. VARONA. *Rev. Metal. Madrid*, 25 (5), 1989.
- (2) A. TRAUTWEIN y W. GYSEL, «*Influence of Long-Time Aging of CF8 and CF8M Cast-Steel at Temperatures Between 300 °C and 500 °C on Impact Toughness and Structural Properties*». *Stainless Steel Casting ASTM STP 756*, 1982: 165-189.
- (3) G. SLAMA, P. PETREQUIN y T. MAGER, «*Effect of Aging on Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Casting and Welds*». SMIRT Post-Conference Seminar, Monterrey, Ca, 1983.
- (4) *Metals Handbook*. Desk Edition, ASM, 1986.