

**CARACTERIZACION DE LAS CURVAS TENSION-DEFORMACION EFECTIVAS
OBTENIDAS POR DEFORMACION EN CALIENTE DE DIFERENTES
TIPOS DE ACERO**

POR

G.E. SAN MARTIN, J.E. RUZZANTE

Comisión Nacional de Energía Atómica
República Argentina

Trabajo a ser presentado en las 17. Jornadas metalúrgicas de la Sociedad Argentina de Metales; 2. Encuentro argentino de cerámicos y refractarios el 13-16 de April de 1993 San Carlos de Bariloche -Argentina-

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA TRAMITE DE PUBLICACIONES		NUMERO DE SERIE 0077/93
TITULO Y SUBTITULOS <i>Caracterización de las curvas Tensión-Deformación efectivas obtenidas por deformación en caliente de diferentes tipos de aceros</i>		FECHA DE ENVIO ORGANISMO PROMOTOR.
AUTORES G.E. San Martín J.E. Ruizarte		FECHA DE RECEPCION COMISION DE PUBLICACIONES 5-3-93
ORGANISMO PROMOTOR Y DEPENDENCIAS GCIA. DESARROLLO DPTO. MATERIALES		TIPO DE PUBLICACION JORNADAS SAM
DIRECCION POSTAL Y TELEFONO AV. LIBERTADOR 8250. CAC Int. 276		NUMERO DE EJEMPLARES
PALABRAS CLAVE INIS: HOT WORKABILITY, HOT DEFORMATION, STEELS		AREAS RELACIONADAS INIS

RESUMEN

77/93

The peak stress and the steady state values for free cutting, carbon and alloyed steels deformed at high temperatures were obtained in this paper as the result of two regressions. With these data and the peak deformation values obtained in a former work, strain-stress curves are characterized within industrial deformability conditions, in order to foresee strength and power consumption.

- Hacer Portada

INFORME DEL ORGANISMO PROMOTOR 1.- ASPECTOS CIENTIFICOS X	DICTAMEN COMISION PUBLICACION CALIFICACION <i>Aprobado</i>
2.1 IMPLICANCIAS TECNOLOGICAS X	CLASIFICACION NO RESTRINGIDA
2.2 IMPLICANCIAS COMERCIALES	FECHA 18/3/93
2.3 IMPLICANCIAS LEGALES	
2.4 IMPLICANCIAS DE IMAGEN INSTITUCIONAL	
FIRMA DEL RESPONSABLE DEL ORGANISMO Dr. ALBERTO POCHETTINO a/c. Gerente de Desarrollo E. Cabot	TRAMITE: A LA GAPCyC-DPTO. INF. TEC. ☐ AL ORGANISMO PROMOTOR ☒ <i>Se da fe de su recepción</i>

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA TRAMITE DE PUBLICACIONES		NUMERO DE SERIE 0077 / 93
TITULO Y SUBTITULOS <i>Caracterización de las curvas tensión-deformación efectivas obtenidas por deformación en caliente de diferentes tipos de aceros</i>		FECHA DE ENVIO ORGANISMO PROMOTOR .
AUTORES <i>G.E. San Martín J.E. Ruzzante</i>		FECHA DE RECEPCION COMISION DE PUBLICACIONES 5 - 3 - 93
ORGANISMO PROMOTOR Y DEPENDENCIAS <i>GCIA. DESARROLLO</i> <i>DPTO. MATERIALES</i>		TIPO DE PUBLICACION <i>JORNADAS SAM</i>
DIRECCION POSTAL Y TELEFONO <i>AV. LIBERTADOR 8250.</i> <i>CAC Int. 276</i>		NUMERO DE EJEMPLARES AREAS RELACIONADAS INIS
PALABRAS CLAVE INIS: <i>HOT WORKABILITY, HOT DEFORMATION, STEELS</i>		
RESUMEN En este trabajo se presentan los resultados de 2 regresiones que permiten calcular el valor de la tensión de pico y del estado estacionario para aceros de corte libre, al carbono y aleados, deformados a alta temperatura. Con estos valores y el de la deformación de pico, obtenida en un trabajo anterior, se caracterizan las curvas tensión-deformación para evaluar la resistencia de los materiales en las condiciones de conformado industrial con el objeto de predecir fuerza y potencia de trabajo.		
INFORME DEL ORGANISMO PROMOTOR 1.- ASPECTOS CIENTIFICOS ☒		DICTAMEN COMISION PUBLICACION CALIFICACION <i>Aprobado</i>
2.1 IMPLICANCIAS TECNOLOGICAS ☒		CLASIFICACION <i>NO RESTRINGIDA</i>
2.2 IMPLICANCIAS COMERCIALES		
2.3 IMPLICANCIAS LEGALES		
2.4 IMPLICANCIAS DE IMAGEN INSTITUCIONAL		FECHA 18 / 3 / 93
FIRMA DEL RESPONSABLE DEL ORGANISMO Dr. ALBERTO POCHETTINO a/c. Gerente de Desarrollo		TRAMITE: A LA GAPCyC-DPTO. INF. TEC. ☐ AL ORGANISMO PROMOTOR ☒

CARACTERIZACION DE LAS CURVAS TENSION-DEFORMACION EFECTIVAS OBTENIDAS POR DEFORMACION EN CALIENTE DE DIFERENTES TIPOS DE ACEROS

G. E. SAN MARTIN, J. E. RUZZANTE

³Grupo Deformación en Caliente FRBA UTM,
Geia. Desarrollo CNEA Av. Libertador 8250 (1429) Buenos Aires.

1. INTRODUCCION

Con el objeto de caracterizar las curvas tensión-deformación efectivas a alta temperatura de seis tipos diferentes de aceros (al carbono, de corte libre y aleados) en un trabajo anterior⁽¹⁾ se presentaron los resultados de los ensayos de torsión en caliente y, a partir de ellos se propuso una fórmula para calcular la deformación de pico $\bar{\epsilon}_p$ y la deformación crítica $\bar{\epsilon}_c$ para el comienzo de la recrystalización dinámica, en función del parámetro Z de Zener-Hollomon, del tamaño de grano austenítico inicial d_0 y de la energía de activación aparente de deformación en caliente Q :

$$\bar{\epsilon}_p = 75.34 d_0^{1/2} Z^{0.15} q^{2.63} \quad [1]$$

En este trabajo se obtienen expresiones para calcular el valor de la tensión de pico $\bar{\sigma}_p$ y de la del estado estacionario $\bar{\sigma}_{ss}$ para los aceros ensayados en los rangos de temperatura y velocidad de deformación estudiados. Se examina además la similitud entre los exponentes de Z en las expresiones de $\bar{\epsilon}_p$ y $\bar{\sigma}_p$, y la sensibilidad media del momento torsor respecto de la velocidad de deformación calculada en promedio para todos los aceros en el rango de temperaturas estudiado.

2. METODO EXPERIMENTAL - ELABORACION DE LOS DATOS DE TORSION

Se realizaron ensayos de torsión en caliente en probetas cuyas composiciones químicas se pueden ver en la Tabla 1. La descripción de los ensayos se puede ver en un trabajo anterior⁽¹⁾. Los ensayos fueron realizados a velocidades de deformación de 0.1, 1, y 8 s⁻¹, a temperaturas entre 900°C y 1200°C.

A partir de los valores de momento torsor T y deformación angular θ , medidos se obtuvieron las curvas tensión - deformación efectivas ($\bar{\sigma} = \bar{\epsilon}$) según:

$$\bar{\epsilon} = \frac{2 \pi r \theta}{43 l} \quad [2]$$

$$\bar{\sigma} = \frac{43 T}{2 \pi r^3} (3 + m + n) \quad [3]$$

donde m y n representan la sensibilidad del momento torsor a la deformación y a la velocidad de deformación respectivamente.

Para calcular n se realizó, para cada temperatura, un ajuste del tipo:

$$T_{\max} = T_0 \dot{\theta}^n \quad [4]$$

Los valores de n hallados se ajustaron finalmente con la temperatura. En la Tabla 3 se pueden ver los resultados así obtenidos.

Para correlacionar los parámetros $\bar{\epsilon}$, $\bar{\sigma}_p$ y T de los ensayos de torsión, se empleó la relación (2):

$$\dot{\epsilon} = C (\sinh(\alpha \bar{\sigma}_p))^{n*} \exp(-Q/RT) \quad [5]$$

y se calculó la energía de activación aparente de deformación en caliente Q y, a partir de ella, para cada ensayo, el parámetro Z correspondiente (2):

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad [6]$$

Los resultados de Q y de Z hallados se pueden ver en la Tabla 2.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Para calcular la tensión de pico $\bar{\sigma}_p$ se propuso, inicialmente, una regresión del tipo $\bar{\sigma}_p = A d_0^k Z^n Q^m$ como la empleada para calcular la deformación de pico en los mismos aceros, y se obtuvo un ajuste con un coeficiente de correlación $r^2 = 0.85$. Análogamente para hallar la tensión del estado estacionario se obtuvo un ajuste con un coeficiente de correlación $r^2 = 0.83$. Si no se tiene en cuenta la influencia del tamaño de grano se obtienen:

$$\bar{\sigma}_p = 10913398 Z^{0.15} Q^{-4.20} \quad [7]$$

$$\bar{\sigma}_{ss} = 1803528 Z^{0.13} Q^{-3.76} \quad [8]$$

con valores de $r^2 = 0.92$ y $r^2 = 0.89$ respectivamente, de donde se puede ver que el hecho de forzar una dependencia de las tensiones de pico y del estado estacionario con $d_0^{1/2}$ empeora el ajuste. En las figuras 1 y 2 se grafican respectivamente los valores de $\bar{\sigma}_p$ y $\bar{\sigma}_{ss}$ calculados en función de los medidos.

Tanto en estas expresiones como en las que siguen d_0 se mide en micrones, Z en s^{-1} , Q en kcal/mol y $\bar{\sigma}_p$ y $\bar{\sigma}_{ss}$ en kg/mm^2 .

Para obtener la tensión $\bar{\sigma}_{ss}$ se debería haber calculado el Q_{ss} a través de la fórmula [5] cambiando la tensión máxima por la del estado estacionario. Sin embargo ya que la tensión del estado estacionario no está tan claramente definida como la de pico y para calcular $\bar{\sigma}_p$ y $\bar{\sigma}_{ss}$ con el mismo parámetro, se prefirió emplear el valor de Q para las dos regresiones.

Para mejorar el ajuste entre las variables del problema se probaron otras regresiones. Se calculó la correlación entre $\bar{\sigma}_p$, Z y Q , y entre $\bar{\sigma}_p$, $\dot{\epsilon}$, T y Q . El coeficiente r^2 vario alrededor del 1%. Lo mismo ocurrió para los valores de $\bar{\sigma}_{ss}$, lo que muestra que el coeficiente Z tiene en cuenta correctamente la influencia conjunta de la temperatura y de la velocidad de deformación.

Si se tiene en cuenta el tamaño de grano los resultados son los siguientes:

$$\bar{\sigma}_p = 4715470 d_0^{0.10} Z^{0.15} Q^{-4.13} \quad [9]$$

$$\bar{\sigma}_{ss} = 660204 d_0^{0.12} Z^{0.14} Q^{-3.67} \quad [10]$$

con $r^2 = 0.93$ y $r^2 = 0.90$ respectivamente.

Cuando se comparan los coeficientes de correlación de las regresiones [9] y [10] con los de las [7] y [8] se puede ver que el tamaño de grano austenítico inicial no influye de manera importante en las tensiones de pico y del estado estacionario, en los rangos de T y $\dot{\epsilon}$ ensayados. Derivando la ecuación [9] se llega a que si se duplica el tamaño de grano la tensión de pico aumenta un 10 %.

Por otra parte si se calcula el valor medio del coeficiente n , para los aceros ensayados en los rangos de temperatura y velocidad estudiados se obtiene:

$$n = 0.151 \quad [11]$$

Recordando las fórmulas [1] y [7] se puede ver que los exponentes del parámetro Z son iguales a 0.15. Esto nos lleva a proponer para la deformación y la tensión de pico las siguientes expresiones:

$$\bar{\epsilon}_p = 75.34 d_0^{1/2} Z^n Q^{-2.63} \quad [12]$$

$$\bar{\sigma}_p = 10913398 Z^n Q^{-4.20} \quad [13]$$

4. DISCUSION

Al llegar al estado estacionario ($\bar{\sigma}_{ss}$) se debe tener en cuenta que los granos iniciales ya han recrystalizado y la estructura nueva presenta un tamaño de grano diferente del inicial.

Sakui y colaboradores⁽³⁾ estudiando un acero de 0.16% de carbono, obtienen una dependencia del tamaño de grano austenítico para grandes deformaciones D (en estado estacionario u oscilante), como una función sólo de Z. A esta relación llegan partiendo de distintos tamaños de grano iniciales. De este modo el tamaño de grano recrystalizado sería independiente del grano inicial y sería sólo función de la temperatura y de la velocidad de deformación. Si asumimos una dependencia entre D y la tensión del estado estacionario esta se reduciría entonces a una dependencia entre $\bar{\sigma}_{ss}$ y Z.

Sah y colaboradores⁽⁴⁾ encontraron que el tamaño de grano inicial afecta a la tensión de pico $\bar{\sigma}_p$ sólo levemente y prácticamente no influye sobre el valor de la tensión del estado estacionario $\bar{\sigma}_{ss}$, cuando se deforma por torsión en caliente probetas de níquel. Además muestran que el tamaño de grano medio que se alcanza en el estado estacionario de recrystalización dinámica es independiente del tamaño de grano inicial y depende de $\bar{\sigma}_{ss}$.

Roberts y colaboradores⁽⁵⁾ encuentran que al comprimir en caliente dos tipos de aceros austeníticos, la tensión de pico es virtualmente independiente del tamaño de grano inicial lo mismo que el tamaño de grano recrystalizado y la tensión del estado estacionario.

Roberts y Ahlblom⁽⁶⁾ recopilan para un acero de 0.15 % C, 1.3 % Mn y para un inoxidable de 18 % Cr, 9 % Ni ensayados por torsión y compresión en el rango austenítico, valores de la variación de $\log \bar{\sigma}_p$ con $\log Z$. El resultado hallado es 0.18. Presentan además un modelo de recrystalización para calcular dicho valor y sus resultados están de acuerdo con los datos experimentales.

En este trabajo se obtuvo que ni la tensión del estado estacionario, ni la tensión de pico presentan una dependencia importante con el tamaño de grano austenítico inicial ya que no mejoran de manera notable la correlación en las fórmulas propuestas para predecirlas en función de las condiciones de deformación. Para explicar la dependencia de la deformación de pico con el tamaño de grano obtenida en [1], y la independencia de la tensión de pico observada en este trabajo [7], se asume que existe una densidad de dislocaciones crítica para que el material recrystalice, cuyo valor depende sólo de la temperatura y de la velocidad de deformación. Como el material de grano más pequeño contiene, a igualdad de volumen, mayor cantidad de borde de grano y por lo tanto mayor cantidad de dislocaciones, llegará con menor deformación a la densidad crítica para recrystalizar. Sin embargo como la tensión $\bar{\sigma}_p$ depende de dicha densidad, no variará con el tamaño de grano.

5. CONCLUSIONES

- 1) Se observó que en los aceros estudiados ni la tensión de pico ni la tensión del estado estacionario dependen de modo importante del tamaño de grano austenítico inicial.
- 2) Se propusieron las fórmulas [7] y [8] para predecir los valores de la tensión de pico y la tensión del estado estacionario en función del parámetro Z y las energías de activación de deformación en caliente.
- 3) Se calculó el valor medio de la sensibilidad del momento torsor a la velocidad de deformación n para los aceros estudiados y se encontró que era igual al exponente del parámetro Z en las fórmulas que predicen las coordenadas del pico de las curvas tensión deformación.

6. REFERENCIAS

- (1) G.E. SAN MARTIN, S.L. NUÑEZ P., J.E. RUZZANTE, G.F. FERRIONE Scripta Metallurgica et Materialia, 26 (1992) 405
- (2) C.M. SELLARS, W.J. MC G. TEGART Int. Met. Reviews 17, March 1972 1
- (3) S. SAKUI, T. SAKAI, K. TAKESHI Trans. ISIJ, 17 (1979) 718
- (4) J.P. SAH, G.J. RICHARDSON, C.M. SELLARS Metals Science, 3 (1974) 325
- (5) W. ROBERTS, H. BODEN, B. AHLBLUM Metals Science, March April 1979 195
- (6) W. ROBERTS, B. AHLBLUM Acta Metallurgica, 26 (1978) 801

TABLA 1
COMPOSICION QUIMICA DE LOS ACEROS ENSAYADOS

Acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Sn	As	Cu	V	Pb
1041	0.40	1.55	0.22	0.020	0.025										
9260	0.586	0.855	1.985	0.011	0.020	0.072	0.089	0.023	0.005	0.009	0.010	0.01	0.118		
52100	1.06	0.35	0.27	0.015	0.022	1.47									
10L60	0.593	0.842	0.309	0.016	0.026	0.202	0.093	0.039	0.012	—	0.006	0.019	0.076	0.012	0.231
32NiCr MoV12 3	0.35	0.55	0.13	0.014	0.021	0.60	3.12	0.69						0.131	
15NiCr Mo16 5	0.163	0.439	0.299	0.015	0.021	1.185	4.147	0.254	0.044	0.028	0.01	0.021	0.079	0.041	

TABLA 2
Características de los Aceros ensayados
Tamaño de grano inicial - Energía de Activación
Rango de Z

Acero	d ₀ (μm)	Q (kcal/mol)	Rango de Z (σ ⁻¹)
SAR 1041	125	73.25	7.4 10 ⁹ - 3.6 10 ¹⁴
SAR 9260	88	74.25	1.0 10 ¹⁰ - 4.5 10 ¹³
SAR 52100	150	72.35	5.4 10 ⁹ - 3.0 10 ¹³
SAR 10L60	90	84.00	2.9 10 ¹¹ - 3.6 10 ¹⁶
32NiCrMoV12 3	180	92.57	7.3 10 ¹¹ - 1.8 10 ¹⁷
15NiCrMo16 5	44	98.85	4.7 10 ¹³ - 2.1 10 ¹⁹

TABLA 3
Valores del coeficiente $n = \frac{3 \ln \Gamma}{\ln \theta}$
Ajustados según la fórmula: $n = a + b T$

Acero	T (°C)	900	1000	1100	1200	1300
SAR 1041		0.137	0.151	0.106	0.180	
SAR 9260		0.114	0.145	0.178	0.207	
SAR 52100		0.142	0.131	0.106	0.186	
SAR 10L60		0.120	0.147	0.174	0.202	
32NiCrMoV12 3		0.077	0.104	0.131	0.158	0.185
15NiCrMo16 5		0.090	0.123	0.156	0.190	

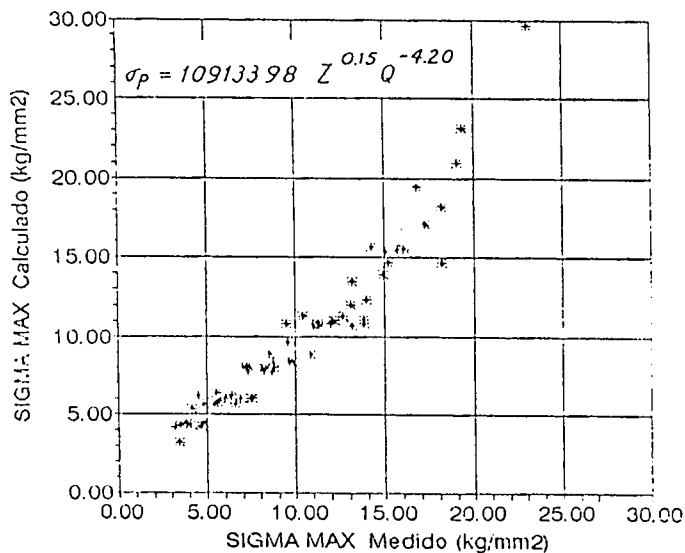


Fig 1

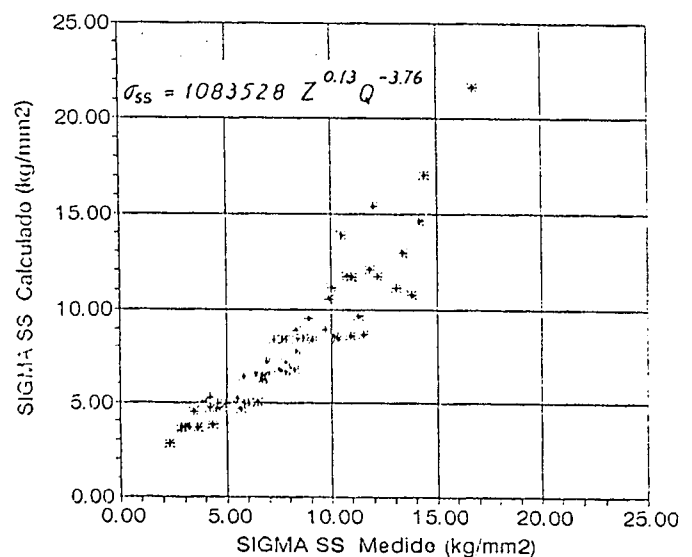


Fig 2