

ASPECTOS NUMÉRICOS DE LA COLAMINACIÓN DE MINI-PLACAS CON NÚCLEO DE U-Mo RECUBIERTO POR Zry-4

PICCHETTI B., MOSCARDA M.V. TABOADA H.¹
¹taboada@cnea.gov.ar

Gerencia del Ciclo de Combustible Nuclear, CAC, CNEA
Avenida General Paz 1499 - San Martín- Pcia. Buenos Aires - Argentina

RESUMEN

El propósito de este trabajo es apoyar mediante modelos adecuados el desarrollo del proceso de colaminación de miniplacas y placas partiendo de un compacto formado por un núcleo laminar de U-Mo con marco y tapas de Zry-4.

Se estableció un modelo de la colaminación mediante la identificación de parámetros relevantes del proceso y el cálculo de variables. El objetivo es diseñar una estrategia óptima de colaminación mediante el uso de dicho modelo, respecto de los resultados esperados.

Para ello se describe el proceso de laminación y se usan ciertos elementos de la teoría de tensiones y deformaciones sobre metales. La deformación plástica depende de las componentes desviadoras del tensor de tensión y no de las hidrostáticas

La laminación de flejes metálicos consiste en un proceso de deformación plástica por compresión plana a volumen constante. También se supone que el ancho del fleje permanece constante durante la laminación siendo la pieza de metal libre de fluir en la dirección de su largo.

En este trabajo se determina la relación existente entre la tensión de fluencia de los materiales constitutivos: el recubrimiento de Zry-4 y el núcleo de U-Mo cuando son colaminados a $T = 650$ °C.

Esto nos permite modelar la reducción que se produce en cada paso de colaminación para cada una de las fases presentes, lo cual habilita el diseño de un lazo de control que optimice el proceso de colaminación.

NUMERICAL ASPECTS OF U-Mo CORE COVERED BY Zry-4 MINIPLATES CO-ROLLING

PICCHETTI B., MOSCARDA V.M., TABOADA H.¹

¹taboada@cnea.gov.ar

Gerencia del Ciclo de Combustible Nuclear, CAC, CNEA
Avenida General Paz 1499 - San Martín- Pcia. Buenos Aires - Argentina

ABSTRACT

The aim of this work is to support through adequate modeling the development of the co-rolling process of miniplates and plates starting with compacts including a monolithic U-Mo core with Zry-4 frame and cladding,

Through relevant parameter identification and specific variables calculation a co-rolling process model was set. The goal is to design a co-rolling optimal strategy related to the expected results through the use of such model.

To that end the rolling process is depicted and some elements of strain stress theory on metals are employed. Plastic strain depends on deviator components of the stress tensor but no on the hydrostatic one.

Metal sheet co-rolling is a plastic strain by planar compression at constant volume. During the co-rolling process the width constancy is assumed, being the piece of metal free to flow along its length.

In this work the relationship between constitutive materials shield stresses U-Mo core and Zry-4 cladding under $T= 650^{\circ}\text{C}$ co-rolling is determined.

This allows us to model the reduction that exist in each co-rolling step for each one of phases present, which enables the design of a loop control lace optimizing the co-rolling process.

Introducción

La laminación de flejes metálicos consiste en un proceso de deformación plástica por compresión plana a volumen constante. También se modela suponiendo ancho constante con la libertad de fluir en la dirección de su largo.

La deformación plástica depende de las componentes desviadoras del tensor de tensión y no de las hidrostáticas. Dados los tres ejes principales y los invariantes del tensor de tensión I_1 y s_m , los componentes del tensor desviador S son¹:

$$I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3); s_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (1)$$

$$s_{xy} = \sigma_{xy} - \sigma_m \cdot \delta_{xy}$$
$$s = \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

Su invariante de 2º orden es:

$$I_2(s) = -\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3)$$

A expensas de este invariante se define el tensor equivalente siendo la condición de fluencia de Von Mises:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} > \sigma_F \quad (4)$$

Dado que las deformaciones por laminación superan largamente el límite elástico (alrededor de 0,5% de deformación) se utiliza para el análisis del laminado la teoría de Levy-Von Mises, por lo que vale:

$$d\varepsilon_2 = \frac{2}{3} d\lambda [\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1)] \quad (5)$$

Para un parámetro genérico de deformación $d\lambda$. Si coinciden los ejes principales de tensiones y deformaciones siendo el eje principal 1 normal a la pieza bajo laminación, el 2 según dirección de su ancho y el 3 según el largo resulta que por tratarse de una laminación, el aumento de deformación según 2 es nulo, lo mismo que la tensión según 3:

$$d\varepsilon_2 = 0 \Rightarrow \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1)$$

$$\sigma_3 = 0 \Rightarrow \sigma_2 = \frac{1}{2}\sigma_1 \quad (6)$$

Luego, el valor del tensor equivalente es:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_1 > \sigma_F \quad (7)$$

Dependencia del tensor de fluencia con la temperatura

A modo de ejemplo, se presenta el gráfico de la tensión de fluencia vs $T(^{\circ}\text{C})$ $\sigma_F = Y(\text{U-Mo})^{\text{ii}}$. Un gráfico análogo puede establecerse para $\sigma_F = Y(\text{Zry-4})$.

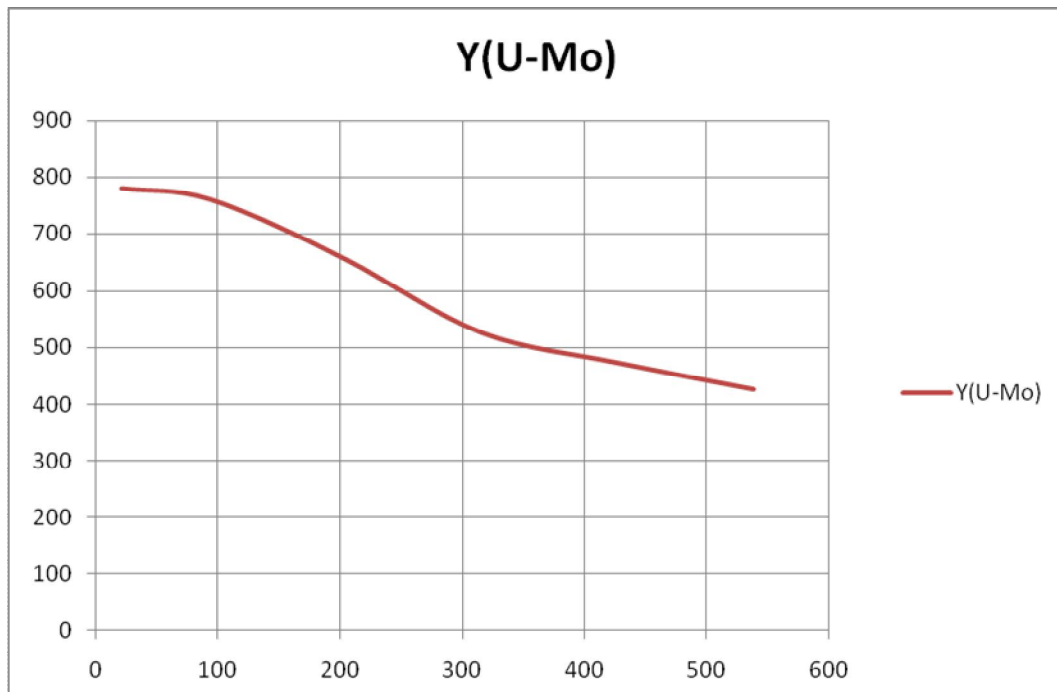


Figura 1: gráfico de la tensión de fluencia en función de la temperatura

Esquema de laminación: Se muestran los principales parámetros geométricos intervinientes en él. Si a_p denota el ancho de laminación, se demuestra que el área sobre la cual ejerce presión la fuerza de laminación es:

$$a_p * L_p = a_p * \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{h_0 - h_f}{2}\right)^2} \approx a_p * \sqrt{R(h_0 - h_f)} \quad (8)$$

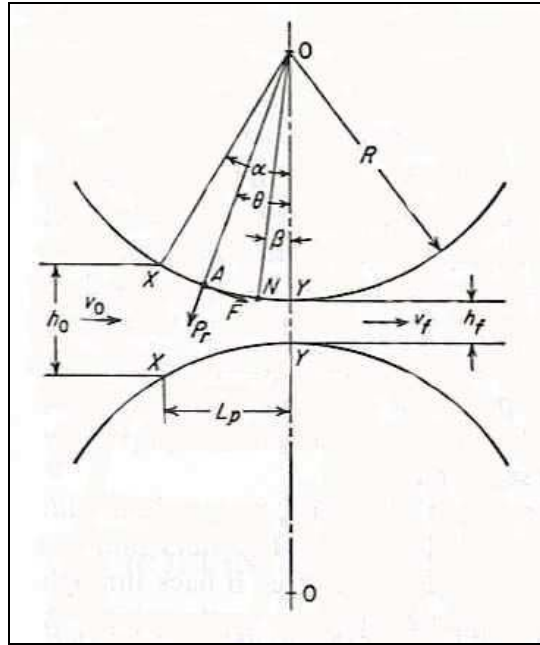


Figura 2:

Asimismo se demuestra que la condición de laminación es que la diferencia de espesores debe ser inferior al cuadrado de la fricción por el radio de los rodillos:

$$\Delta h \leq \mu^2 R \quad (9)$$

Potencia de laminación y tensión equivalente aplicada durante un régimen de bajo rozamiento

P equivale al producto de la fuerza de laminación por la velocidad tangencial, ésta es igual a la longitud de prensado por la velocidad angular de los rodillos

$$P = F \cdot v_t; v_t = L_p \cdot \omega \quad (10)$$

La velocidad angular es 2π veces la frecuencia ν (1/s). Si el coeficiente de rozamiento es inferior a 0,15 la fuerza de laminación es el producto de la tensión aplicada por la superficie de contacto. Resulta:

$$\omega = 2\pi\nu; F = \bar{\sigma} \cdot L_p \cdot a_p \quad (11)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{2\pi \cdot R \cdot \Delta h \cdot a_p \cdot \nu} \quad (12)$$

Ensayos de laminación y valores de tensión aplicada

Se laminaron diversas miniplacas con núcleos de U-Mo y con tapas y marcos de Zry-4. Para llevar a cabo esos ensayos se emplearon dos laminadoras, una de baja y la otra (comparativamente) de alta potencia. Sus características técnicas son:

	Baja potencia	Alta potencia
Potencia pico (W)	746	29840
Radio laminador (mm)	37,8	137,5
Vueltas/minuto (RPM)	21	16
Temperatura (°C)	650-800	650-800

Tabla 1: características técnicas de las laminadoras empleadas.

Con estos datos se calcularon el límite inferior del coeficiente de rozamiento y la tensión máxima aplicada durante la fabricación de una muestra en laminadora de baja potencia y otra en la de altaⁱⁱⁱ. Los resultados pueden verse en la siguiente tabla:

ENSAYO	R (m)	Potencia (w)	Coef. Fricción	RPM	ENSAYO	R (m)	Potencia (w)	Coef. Fricción	RPM
	0,032775	746		21		0,1375	29840		16
Orden	Espesor (mm)	Δe (mm)	$\mu >$	σ_{max} (MPa)	Orden	Espesor (mm)	Δe (mm)	$\mu >$	σ_{max} (MPa)
1	5,78	-			1	6,6	-		
2	5,45	0,33	0,100	653,15	2	6,46	0,14	0,031	24987,53
3	5	0,45	0,117	478,98	3	5,97	0,49	0,058	7139,29
4	4,77	0,23	0,084	937,13	4	5,45	0,52	0,060	6727,41
5	4,46	0,31	0,097	695,29	5	4,81	0,64	0,066	5466,02
6	3,88	0,58	0,133	371,62	6	4,01	0,8	0,074	4372,82
7	3,42	0,46	0,118	468,56	7	3,51	0,5	0,059	6996,51
8	2,89	0,53	0,127	406,68	8	3,06	0,45	0,056	7773,90
9	2,5	0,39	0,109	552,66	9	2,47	0,59	0,064	5929,24
10	2,18	0,32	0,099	673,56	10	2,08	0,39	0,052	8969,88
11	1,91	0,27	0,091	798,29	11	1,92	0,16	0,033	21864,09
12	1,62	0,29	0,094	743,24	12	1,65	0,27	0,043	12956,50
13	1,46	0,16	0,070	1347,12	13	1,53	0,12	0,029	29152,12
14	1,37	0,09	0,052	2394,88					

Tabla 2: valores calculados del límite inferior del coeficiente de rozamiento y la tensión máxima aplicada durante la fabricación de las miniplacas.

Interpretación de los resultados

- En ambas colaminaciones se desarrolla una fina capa de ZrO_2 sobre cada miniplaca.
- La laminadora de menor potencia trabaja más cerca de la tensión de fluencia del U-Mo a las temperaturas de trabajo elegidas. Por eso es necesario controlar la magnitud de Δe , procurando al mismo tiempo limitar la cantidad de pasadas de laminación debido a la oxidación superficial.
- La de mayor potencia no tiene esas limitaciones pues realiza una tensión compresiva 15 veces superior a la laminadora chica. No obstante deben considerarse los re-

sultados sobre el conjunto de laminaciones para ajustar la potencia aplicada limitando la presencia del efecto dog-bone y de fases indeseadas de interacción U-Mo-Zr.

Relación entre las tensiones de fluencia

Cuando se trabaja bajo un régimen de laminación con bajo rozamiento y cuando la potencia aplicada es la estrictamente necesaria para materializar la laminación, la tensión aplicada resulta ser la de fluencia, valiendo para cada pasada de laminación:

$$\Delta h = \frac{P}{2\pi \cdot R \cdot \sigma_F \cdot a_p \cdot v} \leq \rho^2 \cdot R \Rightarrow P \leq 2\pi \cdot \sigma_F \cdot a_p \cdot v \cdot \rho^2 R^2 \quad (13)$$

Es decir, la condición de laminación (9) impone también límites en la potencia aplicada durante una colaminación a bajo rozamiento. A la temperatura empleada el tensor de fluencia del U-Mo es inferior a 420 MPa (ver Figura 1) y el del Zry-4 es aún menor que éste. Vale la tabla 3: para cualquier valor de la tensión de fluencia entre 420 y 300 MPa la potencia límite para una colaminación de bajo rozamiento es inferior a la potencia entregada por la laminadora de menor potencia (746 W).

σ	P1 <
420	1071,981
400	1020,935
380	969,888
360	918,841
340	867,795
320	816,748
300	765,701

Tabla3

Por razones prácticas los datos registrados durante la laminación son los sucesivos espesores de la miniplaca entre cada pasada. Este espesor está constituido por los de las tapas de Zry-4 y el núcleo de U-Mo. La fórmula anterior es aditiva, es decir la suma de diferencia de espesores (delta) es proporcional a la suma de las potencias aplicadas, es decir:

$$\sum \Delta h = \frac{\sum P}{2\pi \cdot R \cdot \sigma_F \cdot a_p \cdot v} \Rightarrow \frac{\sum_{Zry-4} \Delta h}{\sum_{U-Mo} \Delta h} = \frac{\sigma_F^{U-Mo}}{\sigma_F^{Zry-4}} \quad (14)$$

Como se dispone de las dimensiones iniciales y finales de la miniplaca y de aquellas aportadas por las radiografías tomadas tras la laminación fue posible realizar la siguiente tabla 4:

Ensayo	$\Delta h_{\text{miniplaca}}$	$\Delta h_{\text{núcleo}}$	Δh_{Zry-4}	Razón de deltas
1	4,480	0,636	1,922	3,024
2	4,550	0,592	1,979	3,343
3	4,660	0,780	1,940	2,487
4	4,826	0,720	2,053	2,853
5	4,830	0,713	2,059	2,889
6	4,600	0,650	1,975	3,037
7	5,130	0,661	2,234	3,379
8	4,960	0,731	2,114	2,892

Tabla 4:

Pero de acuerdo a (14) y a la tabla 4, esa razón de diferencia de espesores inicial y final, coincidente con la razón inversa de tensiones de fluencias a esa temperatura de trabajo resulta tener un valor medio de 2,988. Por lo tanto:

$$\frac{\sum \Delta h^{Zry-4}}{\sum \Delta h^{U-Mo}} = \frac{1}{2} \frac{\sum (\Delta h^{MP} - \Delta h^{U-Mo})}{\sum \Delta h^{U-Mo}} = \frac{\sigma_F^{U-Mo}}{\sigma_F^{Zry-4}} \Rightarrow \sum \Delta h^{MP} \approx 6,98 \sum \Delta h^{U-Mo} \quad (15)$$

Posibilidad de establecer un lazo de control

Si se lamina bajo un régimen de bajo rozamiento (para lo cual conviene mantener la diferencia de espesores por pasada acotada y también la potencia de acuerdo a (13), la fórmula anterior permite llevar a cabo una aproximación a la cantidad de pasadas necesarias para conseguir los espesores de núcleo y recubrimiento deseados. En efecto, teniendo en cuenta las dimensiones finales del núcleo de la miniplaca o placa, la conservación del volumen y que es despreciable el cambio en el ancho del mismo durante la colaminación y que tanto el espesor, el ancho como el largo final del núcleo vienen predeterminados por especificación, de acuerdo al tipo de reactor y dispositivo de irradiación disponible, resulta:

$$h_{NI} = \frac{h_{NF} * L_{NF}}{L_{NI}} = \frac{h_{NF} * L_{NF}}{a_{NF}} \Rightarrow (h_{NI} - h_{NF}) = h_{NF} \left(\frac{L_{NF} - a_{NF}}{a_{NF}} \right) \quad (16)$$

Donde NI y NF denotan núcleo inicial y final. Por lo tanto:

$$\sum \Delta h^{U-Mo} = (h_{NF} - h_{NI}) \Rightarrow \sum \Delta h^{MP} \approx 6,98 * h_{NF} \left(\frac{L_{NF} - a_{NF}}{a_{NF}} \right) \quad (17)$$

La colaminación en régimen de bajo rozamiento exige que $\mu < 0,15$. Por lo tanto vale:

$$\Delta h \leq 0,0225 * R \quad (18)$$

Fijando como límites de seguridad

$$0,015 * R \leq \Delta h \leq 0,02 * R \quad (19)$$

Surge que la cantidad de pasadas de laminación viene dada por:

$$\frac{349 * h_{NF} \left(\frac{L_{NF} - a_{NF}}{a_{NF}} \right)}{R} \leq \frac{\sum \Delta h^{U-Mo}}{\Delta h^{U-Mo}} \leq \frac{465 * h_{NF} \left(\frac{L_{NF} - a_{NF}}{a_{NF}} \right)}{R} \quad (20)$$

Tomando como referencia los datos de la laminadora A y especificaciones genéricas para las muestras, resulta:

Laminadora	Radio (mm)	$\Delta e_{\text{mín}}$ (mm)	$\Delta e_{\text{máx}}$ (mm)	Cantidad de pasadas
Baja potencia	32,775	0,491	0,6555	$7 < n < 10$

Tabla 4

A los fines prácticos, conviene maquinar galgas de acero inoxidable de espesor creciente con el menor de los límites indicados, proceder a colaminar calibrando la luz de los rodillos en cada pasada hasta cerca de la cantidad de pasadas necesarias para finalmente ajustar el espesor final. Lo cual posibilita establecer el lazo de control propuesto.

ⁱ “Elementos de la Teoría de Plasticidad”. Principios Fundamentales. Alfredo Sáenz López-A.O. Lucaioli CNEA-AC 11/83 PMTM/A-47

ⁱⁱ Steven Burkes. Jefe de I+D BWXT. Comunicación personal.

ⁱⁱⁱ “Desarrollo alcanzado en el proceso de fabricación de placas y miniplacas de U-Mo Zry-4” López M, Picchetti B, Taboada H y González A.G.. Reunión XL AATN, Buenos Aires, 9-13/12/2013