



7mo encuentro de jóvenes investigadores en ciencia y tecnología de los materiales

5 y 6 de septiembre de 2019
Rosario, Santa Fe, Argentina

ANÁLISIS COMPUTACIONAL MULTI-FÍSICO DE EXPERIMENTOS DE COMPRESIÓN IN-SITU DE MICROPILARES CON CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

K. Silva*⁽¹⁾, **H. Honig**⁽²⁾, **P. Schaaf**⁽²⁾

(1) Grupo de Ingeniería de Superficies, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Ing. Pereira 676, E3264BTD, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina

(2) Instituto de Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Tecnologías de la Información, Universidad Técnica de Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Str. 5, 98693, Ilmenau, Thüringen, Alemania.

* Correo Electrónico (autor de contacto): silvak@frcu.utn.edu.ar

Tópicos: T6 Ciencia y tecnología de superficies; **Categoría:** C2. Fin de Carrera de Grado.

Se investigó la influencia de los fenómenos físicos y la interacción entre ellos, debidos a la caracterización eléctrica, durante la deformación plástica en experimentos de compresión en micropilares mediante el método de los elementos finitos. Basado en las simulaciones, se realizaron sugerencias en cuanto a parámetros óptimos para llevar a la realidad los experimentos, con el objetivo de minimizar la influencia de los fenómenos involucrados durante los experimentos y obtener una caracterización satisfactoria.

Introducción: Desde hace algunas décadas, las propiedades mecánicas de los recubrimientos y materiales han sido determinadas por la nanoindentación, debido a su capacidad de proveer una estimación razonable del módulo elástico y la dureza en la microescala. Sin embargo, introducir un nanoindentador en la superficie de la muestra produce un complejo estado de tensiones, lo cual puede volver compleja la determinación de algunos parámetros, tales como la tensión de fluencia o la resistencia a la tracción. Con motivo de estudiar el comportamiento mecánico de los materiales y recubrimientos en la micro- y nanoescala, ha crecido el interés por los experimentos de compresión de micropilares [1]. Técnicas como el FIB milling permiten fabricar las muestras tanto en recubrimientos como en materiales masivos. Los experimentos de micro-compresión in-situ se llevan a cabo utilizando un micromanipulador, que aplica una determinada fuerza en la dirección del eje de simetría del micropilar con indentador de punta plana. En la actualidad, existen numerosos trabajos donde se predice el comportamiento mecánico de los micropilares [2-3]. No obstante, también resulta interesante el estudio del comportamiento eléctrico de los mismos. En este trabajo se presenta un estudio numérico de los efectos termo-eléctricos y la interacción entre ellos, producidos por la caracterización eléctrica durante la deformación plástica en los ensayos de micro-compresión.

Metodología: Se realizaron simulaciones numéricas empleando un modelo axisimétrico en 2D. Las simulaciones se llevaron a cabo empleando el software comercial COMSOL Multiphysics. Específicamente, se estudió la influencia del calentamiento por efecto Joule, efecto Seebeck, resistencia eléctrica de contacto y en menor medida, la deformación plástica. Se consideró un sistema de multicapas de Ni/Al compuesto por 10 capas, sobre un contra-electrodo de níquel, una intercapa de Si₃N₄, depositados sobre un sustrato de Silicio. Para el indentador, se utilizó diamante y tungsteno para analizar el comportamiento mecánico y eléctrico, respectivamente. En el análisis, se tuvieron en cuenta 3 diámetros diferentes para los pilares (0.3, 1 y 2 μm), conservando una relación de aspecto de 2,5:1 y una relación $r_{empalme}/r_{pilar}$ igual a 0,3. Con respecto a la caracterización eléctrica, se emplearon cuatro valores de corriente (1, 10, 100 y 1000 μA). La resistencia eléctrica de contacto se modeló aplicando el modelo propuesto en la literatura [4], según la ecuación:

$$R_c = \sqrt{\frac{\rho^2 \cdot \pi \cdot H}{4 \cdot F}} \quad (1)$$

Donde H es la dureza del material más blando, ρ es la resistividad eléctrica y F la fuerza aplicada. Se consideró un comportamiento elasto-plástico isotrópico no cristalino para el pilar y el contra-electrodo de Níquel, mientras que para la intercapa, el sustrato y el indentador, se conservó el comportamiento elástico. Por simplicidad, las propiedades mecánicas de los materiales se describieron mediante la ecuación de Ramberg-Osgood [5].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \cdot \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \quad (2)$$

Donde E es el módulo elástico y K y n son constantes del material. Se utilizó un mallado triangular con un tamaño máximo de cada elemento de $0,05 \mu\text{m}$ en la región del micropilar, mientras que para el sustrato y el indentedor se empleó un mallado más grueso con motivo de reducir la potencia de cálculo requerida por el software.

Resultados y Discusión: Las simulaciones permitieron evaluar la caída de potencial a través del pilar U_P respecto a la caída total del sistema U_T y analizar la variación de temperatura a través del pilar. Se observó que la relación U_P/U_T alcanza entre un 75 y 85%, cuando la fuerza llega a un 30% de su valor máximo (figura 1.a). Al inicio del experimento, mientras la fuerza aplicada aún es baja, la resistencia de contacto R_C es considerablemente alta (figura 1.b). Este comportamiento origina una elevación en la temperatura en el pilar por efecto Joule.

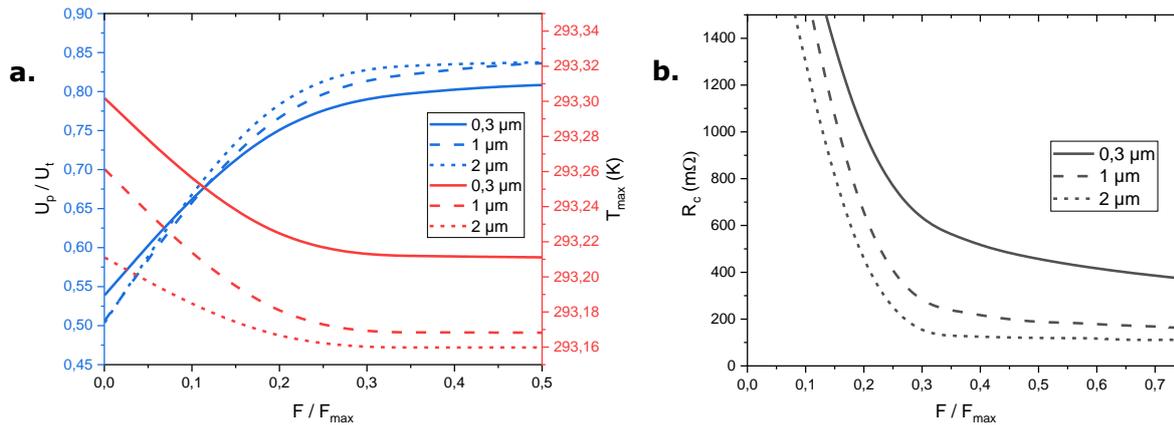


Figura 1: a) Potencial eléctrico relativo U_P/U_T y Temperatura máxima T_{max} vs. Reacción resultante relativa F/F_{max} para 1mA. b) Resistencia de contacto R_C vs Reacción resultante relativa F/F_{max} .

Se observó en las imágenes obtenidas en el software, que la temperatura máxima T_{max} tiene lugar en la interfaz entre el indentedor y la primera capa del pilar. En el caso del pilar de $0,3 \mu\text{m}$, resultó una elevación de temperatura de $0,15 \text{ K}$ al inicio del experimento (figura 1.a). Con respecto a la influencia del efecto Seebeck, se observó también que una vez que R_C disminuye y la mayor parte del potencial eléctrico cae a través del pilar, la temperatura presenta cambios en su distribución. La temperatura en la interfaz de las capas de Al-Ni resulta levemente superior que la interfaz entre las capas de Ni-Al. También se evaluó la variación de T_{max} con y sin Efecto Seebeck al inicio del experimento, obteniendo una diferencia en T_{max} de $0,05 \text{ K}$.

Conclusiones: El modelo desarrollado permitió estudiar la interacción entre los fenómenos termo-eléctricos y establecer parámetros para llevar a cabo una caracterización eléctrica de micropilares en sistemas multicapas. Se observó que la resistencia de contacto afecta significativamente al experimento mecánico. Esto se produce durante el comienzo del experimento, cuyo efecto se atribuye a la elevada R_C . Por el contrario, la influencia del efecto Seebeck no resultó relevante en el alcance estudiado. Este fenómeno puede tomar importancia en caso de emplear corrientes más elevadas, aunque no se recomienda el uso de corrientes mayores a 1 mA . También se recomienda efectuar una compresión mayor al 10% de la altura del pilar para minimizar el efecto de R_C .

Agradecimientos: Los autores agradecen a la UTN y al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por la beca de intercambio en la Universidad Técnica de Ilmenau de K. Silva.

Referencias

- [1] N. Ranganathan, Materials Characterization: Modern Methods and Applications, 2016, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [2] R.J. Milne, A.J. Lockwood, B.J. Inkson, Size-dependent deformation mechanisms of Al nanopillars, J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 2011, 485301.
- [3] R. Schwaiger, M. Weber, B. Moser, P. Gumbsch, O. Kraft, Mechanical assessment of ultrafine-grained nickel by microcompression experiment and finite element simulation, J. Mater. Res., Vol. 27, 2012, 266-277.
- [4] P.G. Slade, Electric Contacts: Principles and Applications, 2014, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [5] W. Ramberg, W.R Osgood, Description of stress-strain curves by three parameters, 1943, Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics.