

Diseño de nanocompuestos autolubricantes de Al-Cr-V-Bi-Cu: Del atrapamiento cinético a los retos de adhesión interfacial

U. Mejía, C. Ramos-Vilchis, B. Millán-Ramos, S. E. Rodil

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México

El desarrollo de recubrimientos superficiales autolubricantes avanzados requiere equilibrar una matriz dura que soporte cargas con una fase interfacial de baja resistencia al corte. Este estudio investiga la metalurgia física y la síntesis de un sistema multicomponente de película delgada de Al-Cr-V-Bi-Cu, diseñado para aprovechar la separación extrema de fases para favorecer el rendimiento tribológico.

La hipótesis planteaba que la integración de bismuto y cobre en una matriz refractaria de metales de transición introduciría una segregación de dichas fases debido a las severas restricciones termodinámicas. El bismuto presenta un enorme desajuste de tamaño atómico en relación con los metales de transición, junto con una entalpía de mezcla altamente positiva con elementos como el Cr y el V. Esto impide la formación de una solución sólida monofásica, impulsando al sistema hacia una separación de fases líquido-líquido extrema. Impulsados por esta inmiscibilidad, el bismuto y el cobre deberían ser rechazados de la red cristalina de Al-Cr-V. Esta fuerza motriz termodinámica serviría para crear un nanocompuesto funcional, en el que los elementos de Al-Cr-V formen una matriz estructural primaria que soporta cargas, mientras que el Bi y el Cu se segregan en los límites de grano como nanoclústeres inmiscibles de baja resistencia al corte.

La síntesis metalúrgica tradicional en masa no puede utilizarse para diseñar este material debido a la enorme disparidad en los puntos de fusión (**271.5°C** para el Bi vs. **1910°C** para el V), lo que causa una rápida vaporización del bismuto. Además, el depósito físico de vapor (PVD) estándar con un solo blanco fracasa debido a las diferencias catastróficas en los rendimientos de pulverización catódica (*sputtering yields*) de los elementos y al riesgo de fusión localizada del blanco. Para eludir estas barreras termodinámicas, se empleó un procesamiento mediante co-pulverización catódica (*co-sputtering*) con magnetrón de dos blancos. Al utilizar un flujo constante del blanco de BiCu a baja potencia junto con un flujo variable para la matriz de Al-Cr-V, los adátomos de bismuto, altamente móviles, quedaron atrapados cinéticamente en una arquitectura unificada de película delgada.

Los análisis composicionales y microestructurales revelaron que el oxígeno (aproximadamente un 25 at.%), derivado de la fuente pulvimetalúrgica de Al-Cr-V, reaccionó de manera preferencial con los metales de transición. Este efecto (*gettering*) selectivo atrapó cinéticamente a la matriz en un subóxido de Al-Cr-V-O amorfo a los rayos X y estabilizado con oxígeno. En consecuencia, los adátomos de bismuto resistieron la oxidación y se segregaron en dominios a micro o nanoescala altamente cristalinos dependiendo de la concentración, mientras que el cobre quedó atrapado como nanoclústeres amorfos a los rayos X. La nanoindentación reveló una arquitectura nanocompuesta, con una dureza promedio de 3.56 GPa y un módulo elástico de 80.70 GPa. Las relaciones mecánicas resultantes ($H/E \approx 0.044$ y $H^3/E^2 \approx 0.007$ GPa) demuestran que la matriz de subóxido amorfo posee la ductilidad necesaria para prevenir la fractura frágil bajo esfuerzos de contacto.

Sin embargo, la incompatibilidad química con el sustrato metálico (acero D2), combinada con la extrema segregación interfacial del bismuto, dio como resultado una tensión residual significativa y un fallo de adhesión durante el desgaste por deslizamiento. De modo que, aunque estructuralmente se logró el propósito de obtener bismuto nano-segregado dentro de la matriz de AlCrVOx, no fue posible determinar su respuesta tribológica.