

Análisis Microscópico de un dado de forja para cigüeñales dañado por fatiga térmica: Caso de estudio

Microscopy analysis of a damaged crankshaft die by thermal fatigue: Case of study

Jorge Zuno-Silva ^a, Ismael Ruiz-López ^b, Martín Ortiz-Domínguez ^c, José L. Rodríguez-Muñoz ^d,
Carlos E. Borja-Soto ^e, Arnoldo Bedolla-Jacuinde ^f

Abstract:

Die hot forging failure is mainly to thermal fatigue that is defined as the appearance of cracks due to repetitive changes in load and temperature; the reason for this failure is the temperature gradient between the surface of the die and its internal part. In the present study, a microscopic analysis of the microcrack initiation is carried out and its interaction with the forge oxides on a die hot forging. The hot forging die analysed correspond to an H13 microalloyed with vanadium. The die surface was thermal treated with an average hardness of 47 HRC and after 12000 cycles the die was removed. Optical microscopic was undertaken with a Nikon - MA 100 using polarized light. Stereomicroscopic was done with a Luxeo 4D equipment and for the hardness measurement the Dura Scan Emco-TEST was used. For the Scanning Electron Microscopy analysis, a JEOL JSM-IT300 (3.0 nm (30 kV) 15.0 nm (1.0 kV)) was utilized. It was found that complex oxides, clearly, are formed on the forging scale as a result of its interaction with the atmosphere at high temperature (1300°C) and compressed during the forge process. The oxides corrode and degrade the die surface when these are placed on the grain boundaries initiating a microcrack at high temperature.

Keywords:

Microscopy, Die, Crankshaft, Forged, Thermal Fatigue

Resumen:

La fractura y/o fallas en los troqueles para el forjado en caliente, se debe principalmente a la fatiga térmica que se define como la aparición de grietas debido a cambios repetitivos de carga y temperatura; el motivo de este fallo es el gradiente de temperatura entre la superficie del troquel y su parte interna. En el presente estudio se lleva a cabo un análisis microscópico del inicio de microfisuras y su interacción con los óxidos de forja en un troquel de forja en caliente. Las matrices de forja en caliente analizadas corresponden a una micro - aleación H13 con vanadio. La superficie del troquel se trató térmicamente con una dureza promedio de 47 HRC y después de 12000 ciclos se retiró el troquel. La microscopía óptica se realizó con un microscopio óptico Nikon - MA 100 utilizando luz polarizada. La estéreo-microscopía se realizó con un equipo Luxeo 4D y para la medición de dureza se utilizó un equipo Dura Scan Emco-TEST. Para el análisis de microscopía electrónica de barrido, se utilizó un JEOL JSM-IT300 (3,0 nm (30 kV) 15,0 nm (1,0 kV)). Se encontró que los óxidos complejos, claramente, se forman en el área de compresión de la forja como resultado de su interacción con la atmósfera a alta temperatura (1300°C) y se comprimen durante el proceso de forja. Los óxidos corroen y degradan la superficie de la matriz cuando estos se colocan en los límites de los granos, iniciando una micro-fisura a alta temperatura.

Palabras Clave:

Microscopia, dado, cigüeñal, forja, fatiga térmica

Introducción

-

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

^b PEMSA – Celaya, CdTi, <https://orcid.org/0000-0001-6018-5869>, Email: ismael.ruiz@cieautomotive.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-4475-9804>, Email: martin_ortiz@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodriguez@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^f Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-9762-9750>, Email: arnoldo.bedolla@umich.mx

Las fallas en los troqueles de forja en caliente se pueden definir en términos económicos como una falla operativa que produce un retraso y retrabajo en la producción de piezas. En el caso de la industria automotriz, estos fallos representan al mismo tiempo, un riesgo en la calidad de cada pieza debido al desgaste del troquel que provocará un defecto en las dimensiones de la pieza y no cumplir con las especificaciones de forma y tamaño haciendo propenso a una falla en el servicio. En el caso de las fracturas o fallas de los dados de forja en caliente y/o matrices para cigüeñales, varios trabajos de investigación clasifican las fallas como catastróficas. Durante el proceso de forja, factores clave como temperatura, tiempo de mantenimiento, la carga de compresión y la velocidad de enfriamiento, juega un papel determinante en la vida útil del troquel de forja del cigüeñal (Christiansen, 2014; Scandian, 2015; Pantazopoulos, 2004) Trabajos de investigación han concluido que las tres fallas principales en las fallas de estos troqueles de forja son: el desgaste abrasivo, la fatiga termo - mecánica y la deformación plástica que actúan simultáneamente, incluso en las primeras etapas de vida de la matriz de forja (Lynch, 2006; Pantazopoulos, 2011; Akhtar A. 2010).

En este contexto, la fatiga térmica se define como la aparición de grietas debido a esfuerzos repetitivos, cambios de carga y temperatura; La razón de este fallo es el gradiente de temperatura, entre la superficie del troquel y su parte interna. En su trabajo de investigación, S. Chander, 2017, señala que la aparición de grietas es el primer signo de falla de una matriz de forja debido a fatiga térmica, también dice que los óxidos formados durante el proceso de deformación y los residuos de forja pueden rellenar las grietas durante la operación y producir mayores tensiones y esfuerzos en el interior del material, generando deformación plástica lo que conduce a una mayor apertura de las grietas durante la fase de enfriamiento. Esto es completamente cierto, pero es necesario tener evidencia de la presencia de óxidos y su forma de insertarse en las grietas. En el presente estudio, se realiza un análisis microscópico del inicio de microfisuras y su interacción con los óxidos de forja.

Procedimiento Experimental

El troquel de forja en caliente analizado se muestra en las Figuras 1, 2 y 3 y su composición química se presenta en la Tabla 1, que corresponde a un acero tipo “H13” microaleado con vanadio. La superficie del dado fue tratada térmicamente con una dureza promedio de 47 HRC y que después de 12000 ciclos de trabajo (piezas forjadas) el troquel fue removido. Como primer paso, se llevó a cabo una inspección visual y después se cortó una sección transversal cercana a la fractura, para lo cual se

utilizó un corte por descarga eléctrica con alambre (WEDM). La sección transversal (10 cm x 5 cm) se limpió en un baño ultrasónico con acetona durante 20 min para eliminar el exceso de lubricante (grafito) y FeO adherido en la zona de trabajo. Después se cortó una sección (20 mm x 30 mm x 15 mm) para ser preparado mediante un procedimiento de metalografía convencional. Se aplicó un ataque químico mediante una combinación de Nital (3%) y Picral durante 15 minutos para revelar la microestructura. La microscopía óptica se realizó con un equipo Nikon - MA 100, usando luz polarizada. El análisis de estereomicroscopía se realizó con un equipo Luxeo 4D y para la medición de dureza se utilizó el equipo Dura Scan Emco-TEST. Para el Análisis de microscopía electrónica de barrido, se utilizó un JEOL JSM-IT300 (3,0 nm (30 kV) 15,0 nm (1,0 kV)) fue utilizado.

Resultados y Discusiones

Como se puede ver en la Tabla 1, la composición química del acero H13 mostró un importante contenido de vanadio que ayuda a aumentar la resistencia al desgaste a altas temperaturas (~600°C) y se supone que ayuda a retrasar la fatiga térmica, pero en la Figura 1 se puede observar el daño térmico (encerrado en un círculo), también en la Figura 2, haciendo un acercamiento de la sección, se distinguen de una forma bastante claras las características de fatiga térmica, incluido el desgaste abrasivo.

Steel	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%V
H13	0.39	1.0	0.4	5.2	0.3	1.4	1.2

Tabla 1 Composición química del acero H13. Fuente: Elaboración propia,

Análisis Metalográfico

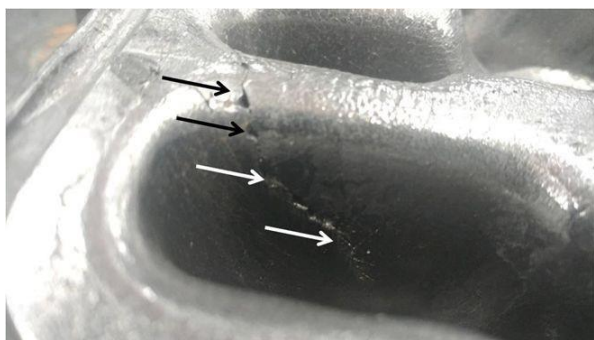


Figura 1. Sección transversal del troquel de forjado en caliente que muestra el daño por calor. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Desgaste abrasivo en la zona de trabajo del troquel de forja en caliente. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3, la propagación de la fractura se muestra en la zona del pallet, en la que hay una alta concentración de carga, por lo que es importante determinar dónde se inició la fractura. Se observó que el FeO producto del recalentamiento de la materia prima (acero 38MnVS) quedó adherido en la superficie del dado y es fuertemente incrustado en las grietas formadas como resultado de la fatiga térmica, ver Figura 4. Mediante el análisis estereomicroscopio, se encontraron pequeñas grietas (0.5 mm) que muestran la iniciación de la fractura, y que fue comprobado con el Microscopio Electrónico de Barrido.



Figura 3. Fractura a lo largo de la forma de la paleta en el troquel de forja en caliente. Fuente: Elaboración propia.

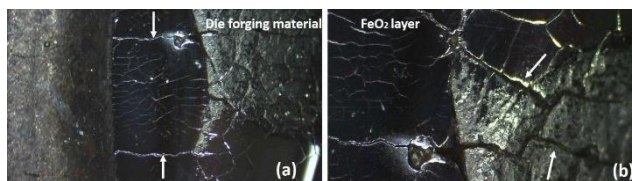


Figura 4. Vista estereomicroscópica de la superficie (a) fractura y grietas y (b) capa de FeO incrustados en una sección erosionada. Fuente: Elaboración propia.

No es de extrañar que las grietas se formen en la superficie de la matriz como consecuencia de la acción fatiga térmica. Mecánicamente, la propagación de la fractura es promovida por la acción cíclica de la carga y cambios de temperatura (Figuras 5,6 y 7) llenando la fractura con grafito y FeO (Figuras 8, 9 y 10) pero esta grieta tiene su inicio en micropartículas de óxidos complejos formados por: Fe + O + Si (Figuras 12, 13 y 14) que se encuentran principalmente en los límites de grano donde una micro-fisura tiene la posibilidad de crecer y propagarse en el material (Figuras 7, 11 y 13). Los óxidos complejos, claramente, se forman en el area de forja como resultado de su interacción con la atmósfera a alta temperatura (1300°C) y comprimida durante el proceso de forja. Los óxidos corroen y degradan la superficie del dado cuando estos se colocan sobre los límites de los granos e inician una micro-fisura a alta temperatura (Amitava Ray, 2004, Mohamed, 2012).

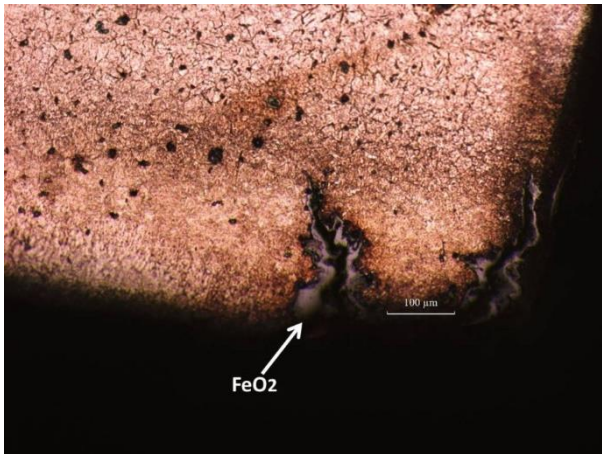


Figura 5. Infiltración de FeO en la fractura, también se encontraron algunos rastros de grafito (usado como lubricante) mezclado con el FeO. Fuente: Elaboración propia.

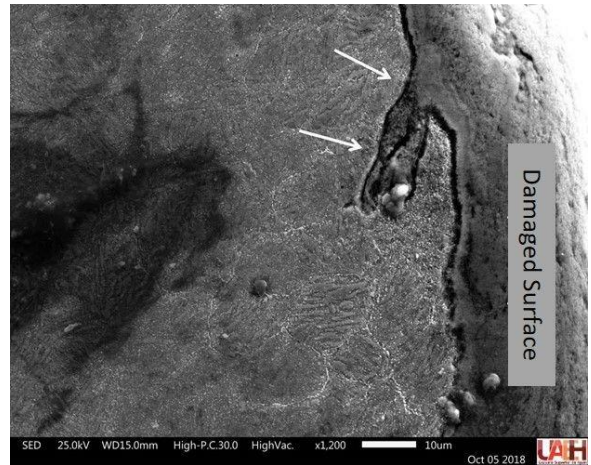


Figura 8. Infiltración de FeO en el troquel a lo largo de la grieta superficial. Fuente: Elaboración propia.

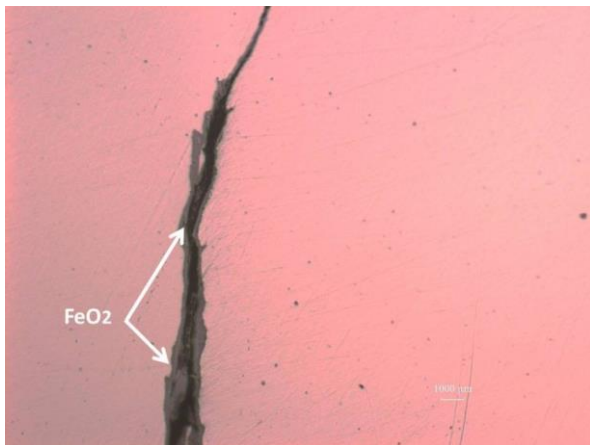


Figura 6. Propagación de FeO dentro de la fractura. Fuente: Elaboración propia.

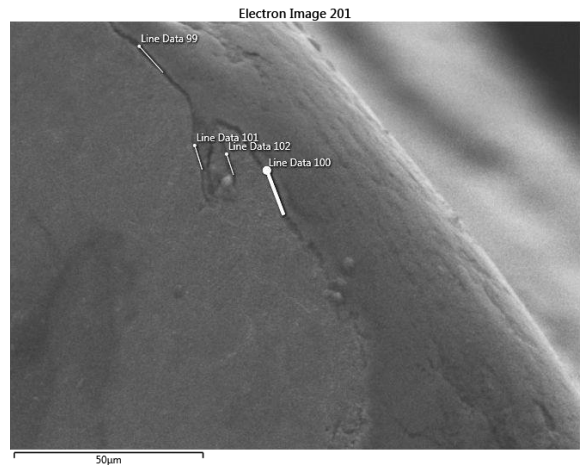


Figura 9. Análisis químico del FeO parcialmente infiltrado en la matriz. Fuente: Elaboración propia.

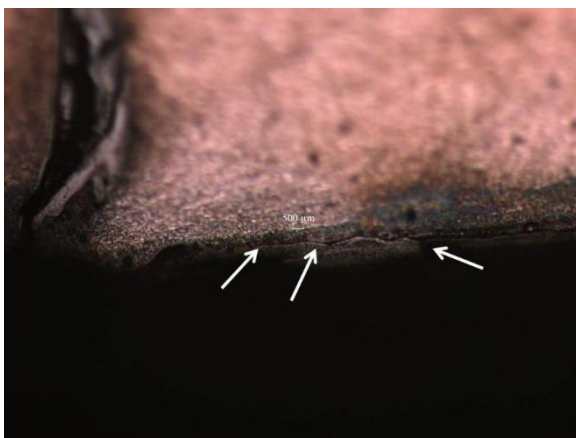


Figura 7. Sección transversal de una grieta superficial e infiltración de FeO en el molde. Fuente: Elaboración propia.

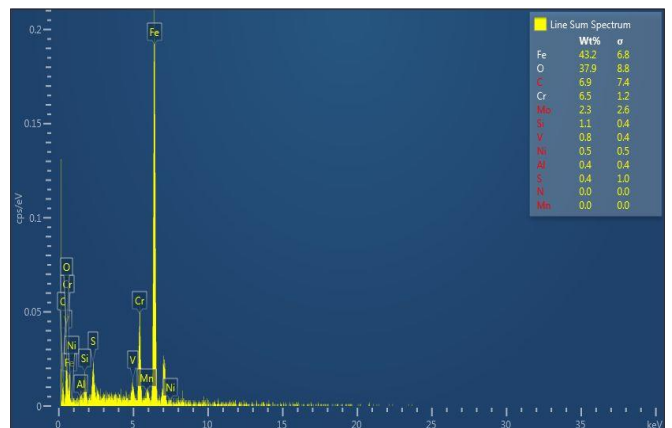


Figura 10. Análisis químico del FeO parcialmente infiltrado en la matriz. Fuente: Elaboración propia.

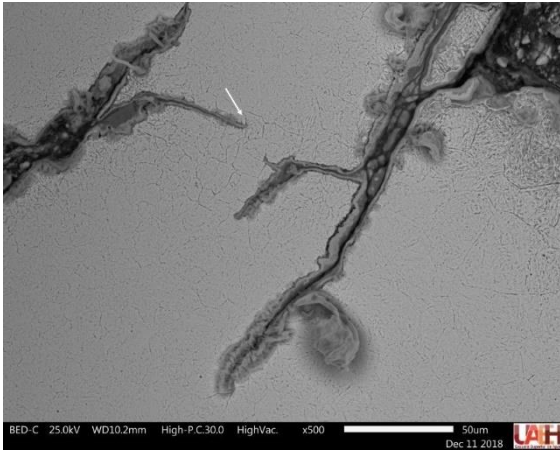


Figura 11. Vista superficial de las grietas en el troquel de forja. Elaboración propia.

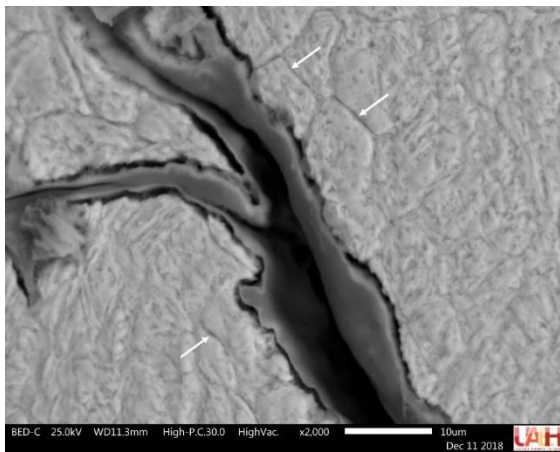


Figura 12. Grieta con FeO y algunos límites de grano que tienen FeO son señalados. Fuente: Elaboración propia.

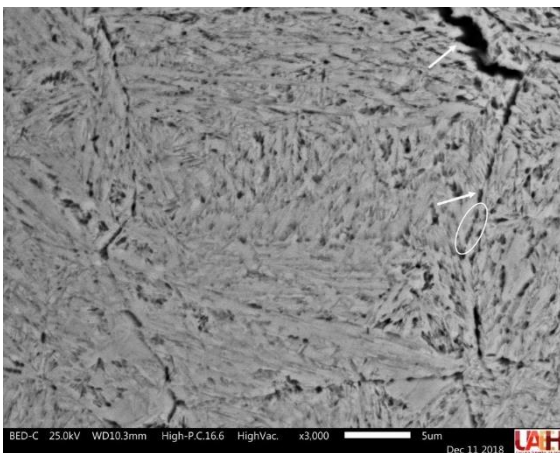


Figura 13. Micro-fisura en un límite de grano y pequeños puntos de FeO son señalados. Fuente: Elaboración propia.

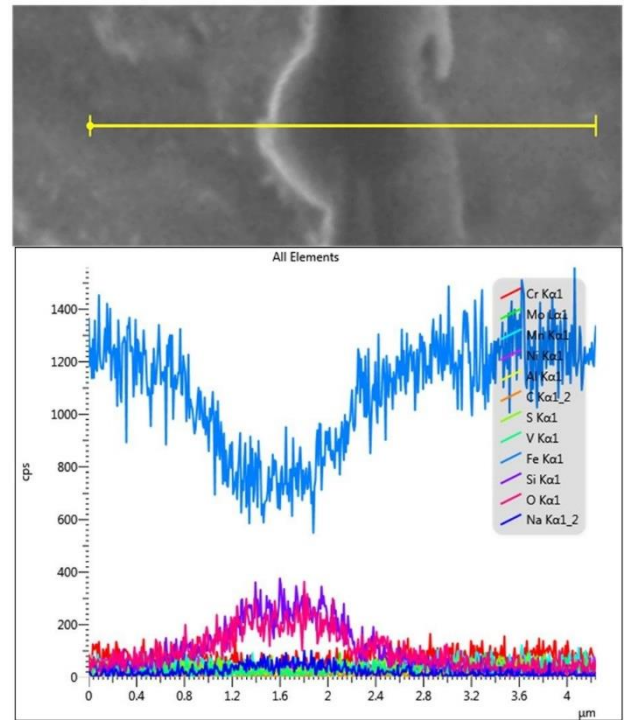


Figura 14. The small dots found on the grain boundaries are a combination of Fe+O+Si. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La fractura en un troquel de forja tiene su origen en las microfisuras generadas por la presencia de óxidos ubicados en los límites de los granos que corroen y degradan la superficie del troquel cuando estos se colocan en los límites de los granos iniciando una micro-fisura a alta temperatura. La cascarilla de FeO de la forja forja tiene un efecto abrasivo en la superficie de la matriz que daña cualquier recubrimiento duro y después que comienzan a desgastarse en la superficie del material ayudando a propagar la grieta.

Referencias

- Akhtar, S. S. A. And Arif, F. M., (2010). Fatigue Failure of Extrusion Dies: Effect of Process Parameters and Design Features on Die Life, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Volume 10, Issue 1, pp 38–49.
- Amitava Ray M. Prasad, S., Barhai, P. K., Mukherjee, S. K., (2004). Metallurgical investigation of prematurely failed hot-strip mill work-rolls: Some microstructural observations, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Volume 4, Issue 3, pp 58–66.
- Chander, S. and Vikas Chawla, (2017). Failure of Hot Forging Dies –An Updated, Perspective, *Materials Today: Proceedings* 4, pp 1147–1157.

- Christiansen, P. N. and Bay, J. HenriHattel, (2014). Multi-objective Optimization of Die Geometry in Ingot Forging, *Procedia Engineering*, Volume 81, Pages 2457-2462.
- George A. Pantazopoulos, (2011). Damage Assessment Using Fractography as Failure Surface Evaluation: Applications in Industrial Metalworking Machinery, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Volume 11, Issue 6, pp 588–594.
- Lynch, S.P. and Moutsos, S., (2006), A Brief History of Fractography, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Volume 6, pp 54-69.
- Pantazopoulos, G. and Antoniou, S., (2004). Wear-Related Failures of Nitrocarburized Steels: Some Microstructural and Morphological Observations, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Volume 6, pp 51-57.
- Mohamed, F. N., Riadh, K., Foued, E., Halouani, E., (2012), Analysis of Degradation and Failure Mechanisms that Develop in Hot Forging Die, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Volume 12, Issue 3, pp 273–280.
- Scandian, C. T., Luz, S., Pardal, J. M., Tavares, S. S. M., (2015). Failure Analysis of Guides Made of High-Strength AISI D2 Tool Steel, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Volume 15, Issue 6, pp 789–793.