



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "CUAUTITLAN"

"ANALISIS Y PREVENCION DE FALLAS"

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A N

JOSE ANGEL MARTINEZ VILLEGAS

FRANCISCO JAVIER ALVARADO COLIN

Director de Tesis: IME. Eric Paredes Villanueva



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

OBJETIVO E INTRODUCCION

El análisis de las causas que producen fallas, en la actualidad ha tomado gran interés sobre todo cuando se producen millones de piezas metálicas y se ponen en servicio, ya que no es raro que algunas fallarán prematuramente. Desde el punto de vista estadístico esto sucede a menudo; sin embargo aunque el número de fallas de cierto componente sea mínimo, es muy importante considerarlas y corregirlas porque dichas fallas pueden afectar al fabricante - en lo que se refiere a confiabilidad.

Tomando como ejemplo un engrane que fallo prematuramente; algunas preguntas que se hacen normalmente son:

- 1.- ¿Cuanto tiempo estuvo el engrane funcionando?
- 2.- ¿Estuvo el engrane sometido a una sobrecarga?
- 3.- ¿Tuvo el engrane un mantenimiento adecuado?
- 4.- ¿El engrane tuvo un tratamiento térmico adecuado?

Estas y muchas preguntas más nos podemos hacer, y aquí es donde toma importancia nuestro objetivo que es el de lograr dentro de la industria metal-mecánica el mas bajo índice de fallas , mediante el conocimiento más profundo de las causas que las producen; tales como fatiga, corrosión, distorsión, fricción, etc.

INDICE

CAPITULO I

PUNTES PRINCIPALES DE FALLAS

Deficiencias en el diseño.....	1
Deficiencias en la selección del material.....	2
Imperfecciones del material.....	3
Deficiencias del proceso.....	4
Errores de montaje.....	6
Condiciones inadecuadas de servicio.....	6

CAPITULO II

PRACTICA GENERAL EN EL ANALISIS DE FALLAS

Objetivos de la investigación de fallas.....	8
Etapas de un análisis.....	8
Recolección de antecedentes y selección de muestras.....	9
Examen preliminar de la pieza fallida.....	11
Pruebas no destructivas.....	12
Pruebas mecánicas.....	17
Selección, preservación y limpieza de superficies fracturadas.....	18
Examen macroscópico de las superficies de la fractura.....	19
Examen microscópico de las superficies de fractura.....	21
Examen y análisis de las selecciones metalográficas.....	24
Determinación del tipo de fractura.....	24
Clasificación de las fracturas en terminos de su mecanismo de crecimiento.....	25
Fractografía de fracturas dúctiles.....	26
Fracturas por fatiga.....	26
Características generales de las fracturas por fatiga.....	26
Grietas de corrosión por esfuerzo.....	27
Agrietamiento por metales líquidos.....	28
Agrietamiento por hidrógeno.....	28
Fallas por deslizamiento y ruptura por esfuerzo.....	29
Aplicación de la mecánica de fractura.....	30
Pruebas de simulación de servicio.....	31
Análisis de evidencias, formulación de conclusiones y elaboración del reporte.....	31

CAPITULO III

TENACIDAD Y MECANICA DE LA FRACTURA

Tenacidad de muesca.....	35
Tenacidad de fractura.....	37

Aplicación de la mecánica de la fractura.....	41
Prueba de tenacidad de muesca.....	45
Prueba y evaluación de la tenacidad de fractura.....	48

CAPITULO IV

FALLAS POR FATIGA

Predicción de la fatiga.....	50
Conceptos relacionados con la fatiga.....	51
Etapas de fractura a partir de la fatiga.....	54
Características de la fractura reveladas por macroscopia.....	54
Características de la fractura reveladas por microscopia.....	55
Agrietamiento por fatiga.....	56
Iniciación de la grieta.....	56
Efecto del tipo de carga y forma de la pieza.....	57
Efecto de sobreesfuerzo y concentración de esfuerzo.....	59
Efecto del esfuerzo sobre la resistencia a la fatiga.....	61
Influencia del diseño en la resistencia a la fatiga.....	62
Endurecimiento del trabajo.....	66
Tratamiento térmico.....	66
Efecto de las discontinuidades en la resistencia a la fatiga.....	66
Segregación de aleaciones.....	67
Efecto del tratamiento térmico en la resistencia a la fatiga.....	69
Influencia de las prácticas de fabricación sobre la resistencia a la fatiga.....	71
Fallas por fatiga a temperaturas elevadas.....	74
Fatiga térmica.....	76
Fatiga por contacto.....	77
Fatiga por corrosión.....	77
Programas y técnicas de inspección.....	78
Determinación del daño de fatiga y duración.....	79

CAPITULO V

FALLAS POR DISTORSION

Sobrecarga.....	81
Especificaciones incorrectas.....	85
Incumplimiento de especificaciones.....	85
Análisis de fallas por distorsión.....	88
Tipos de fallas por distorsión especiales.....	90

CAPITULO VI

FALLAS POR DESGASTE

Tipos de desgaste.....	92
------------------------	----

Papel de la fricción en el desgaste.....	95
Mecanismo del desgaste adhesivo.....	98
Desgaste abrasivo.....	99
Teoría del desgaste abrasivo con aplicación cinética de fuerza.....	103
Desgaste lubricado.....	105
Modalidad de lubricación.....	105
Efectos sobre las características superficiales.....	108
Lubricante.....	109
Fallas de lubricación que producen el desgaste.....	112
Prevención de fallas del lubricante.....	113
Desgaste no lubricado.....	115
Análisis de fallas por desgaste.....	115
Importancia del historial de servicio en el análisis de fallas.....	116
Efecto de las propiedades del material sobre el desgaste.....	117
Efecto de la microestructura.....	119
Mecanismo de desgaste combinados.....	121
Configuración de la superficie.....	122
Coefficiente de fricción.....	125
Efectos del ambiente.....	126
Clasificación del desgaste.....	126

CAPITULO VII

FALLAS POR ROZAMIENTO

Características del rozamiento.....	128
Fundamentos de rozamiento.....	128
Adhesión inicial.....	128
Generación de desecho.....	129
Reconocimiento del rozamiento.....	131
Prevención del rozamiento.....	132
Rozamiento de cables de alambre.....	134
Rozamiento en flechas deslizantes.....	134

CAPITULO VIII

AGRIETAMIENTO DE METAL-LIQUIDO

Mecanismo.....	136
Susceptibilidad de varios metales.....	137

CAPITULO IX

FALLAS EN DADOS

Características de los dados.....	139
-----------------------------------	-----

Influencia del diseño en la falla.....	140
Fallas causadas por mal tratamiento térmico.....	141
Efecto de la temperatura de austenización.....	141
Fallas causadas por operaciones siguientes al tratamiento térmico.....	142

CAPITULO X

FALLAS DE ENGRANES

Materiales para engranes.....	145
Clasificación de las fallas de engranes.....	146
Desgaste de engranes y fallas por desgaste.....	147
Fallas por fatiga de la superficie.....	153
Fallas por fluencia plástica.....	154
Fallas por ruptura.....	157
Estadísticas de tipos y causas de fallas de engranes.....	160

CAPITULO I

FUENTES PRINCIPALES DE FALLAS

FUENTES PRINCIPALES DE FALLA

Una parte o componente se considera que ha fallado en una de tres condiciones: (a) cuando deja de funcionar totalmente (b) Cuando aún funciona, pero no es ya capaz de hacerlo de manera satisfactoria, o (c) cuando un deterioro grave a causado que ya no sea digna de confianza o insegura para su uso continuo, necesitando para ello su retiro inmediato del servicio para reparación o remplazo.

Las fuentes fundamentales de falla incluyen muchos aspectos de diseño, selección de material, imperfecciones del material, fabricación y proceso, reparación, ensamble, inspección, prueba, control de calidad, almacenamiento y embalaje, condiciones de servicio, mantenimiento y exposiciones imprevistas a sobrecarga o daño mecánico o químico en servicio.

Frecuentemente más de una fuente contribuye a que ocurra una falla dada.

DEFICIENCIAS EN EL DISEÑO

Algunas fallas de deficiencias en el diseño son de tal naturaleza que indica que se dedicó poca atención al aspecto de ingeniería para evitar características de diseño que según se sabe, originarán fallas. Por otro lado, algunas veces hasta un diseño concebido cuidadosa y completamente evaluado puede ser deficiente y contribuir a una falla prematura en el servicio.

Muecas Mecánicas. Quizá la deficiencia de diseño observada más frecuentemente y fácilmente evitable sea la presencia de muecas mecánicas en puntos de alto esfuerzo. El uso de un radio de filete demasiado agudo en un cambio de sección de una flecha o pieza similar que esté sujeta a flexión o carga torsional, ejemplifica este tipo de deficiencia de diseño.

Una característica del diseño que conduce especialmente a falla y que se debe evitar siempre, es la intersección de dos muecas mecánicas, tales como un cuñero y un filete en una flecha.

El mejorar una pieza para una nueva aplicación en la cual dicha pieza debe soportar condiciones de servicio más severas que en su uso anterior, algunas veces ocasiona una falla prematura, revelando que el diseño original es deficiente para la nueva aplicación. Algunas de las razones más comunes de falla prematura en una aplicación nueva, incluyen: Especificaciones incorrectas de material y de tratamiento térmico para la aplicación nueva, campos de esfuerzo complejos —

que se vuelven factores críticos al mejorar la pieza.

Criterios de Diseño Insuficientes. Las deficiencias del diseño pueden ser resultado de la imposibilidad de elaborar cálculos de esfuerzo dignos de confianza para piezas complejas y de información insuficiente acerca de los tipos y magnitudes de las cargas a las cuales estará expuesta una pieza en el servicio, como en equipo de gruas, remoción de tierra, excavación, agricultura y demás equipos fuera de carretera.

Aun en partes para las cuales la carga en servicio se conoce con precisión en el análisis de esfuerzo es correcto pueden surgir deficiencias mayores en el diseño a consecuencia de confiar en la capacidad de carga estática basados en datos de resistencia a la tensión y resistencia a punto cedente sin tomar en consideración la posibilidad de falla por mecanismos tales como fractura frangible, fatiga de bajo ciclo, corrosión por esfuerzo y fatiga por corrosión.

DEFICIENCIAS EN LA SELECCION DEL MATERIAL

La selección del material, como parte del diseño general de un producto, se debe hacer en relación con los aspectos dimensionales y geométricos del diseño.

Insuficiencia de los Datos de Ensayo a la Tensión. Aunque la mayor parte de las especificaciones de norma requieren datos de ensayo a la tensión, estos datos son indicativos tan solo en parte de la resistencia mecánica inherente a condiciones específicas de servicio. El amplio uso de ensayos a la tensión estándar es útil principalmente como una prueba rutinaria de la calidad relativa de lotes diferentes de un material dado. Los datos resultantes de las pruebas sirven principalmente como un índice de la variabilidad de lote a lote del material.

Salvo en aquellos pocos casos en que la fractura dúctil o la deformación mayor puede ser la condición limitante para la falla, la resistencia a la tensión y la resistencia a la deformación no solamente son criterios inadecuados para evitar la falla, sino también pueden conducir de hecho a la selección de un material no satisfactorio. La alta resistencia a la tensión frecuentemente es perjudicial en piezas en las cuales están presentes elevadores severos de tensión y en las cuales el mecanismo potencial de falla probablemente sea la fractura por fatiga o la fractura frangible o que implique corrosión en combinación con carga estática o cíclica.

Criterio para la Selección del Material. Para cada mecanismo previsible de falla, hay solo algunos criterios de importancia primordial para la selección de un material óptimo estas son las características específicas del material que miden cuantitativamente su resistencia a la falla mediante un mecanismo dado. En algunos casos será necesario transigir esta característica del material y también entre factores tales como el costo, factibilidad de fabricación, disponibilidad y duración esperada de servicio en la aplicación a la que se destina.

No se pueden hacer generalizaciones válidas para todos los problemas de selección de material; cada problema se debe considerar individualmente o bien sobre base de experiencia estrechamente relacionada. Sin embargo, la tabla 1. proporciona una guía general en cuanto a los criterios que ordinariamente son los más importantes en la selección de un material respecto a posibles mecanismos de falla, tipos de carga, tipos de tensión y temperatura de operación.

Los aspectos más difíciles de la selección del material son los relacionados con el comportamiento mecánico en el cual las propiedades del material son influidas por el efecto del tiempo de servicio. Algunas de estas características son: (a) Resistencia al desgaste; (b) Efecto de temperatura elevada sobre las propiedades; y (c) Resistencia a la corrosión, corrosión por tensión, fatiga por corrosión y radiación. Esta aplicación requiere de muy buen juicio en la interpretación de los datos de prueba de laboratorio y su extrapolación a periodos largos de tiempo en servicio, pudiendo ser necesaria la prueba en servicio simulado muy apegado a la realidad.

IMPERFECCIONES DEL MATERIAL

Muchas fallas se originan en las imperfecciones del material. Tanto las imperfecciones internas como las superficiales pueden reducir la resistencia general del material, — ofrecer vías preferenciales para la propagación de grietas, obrar como muescas, servir como sitios para el ataque preferencial del tipo de picadura u ofrecer vías para la corrosión intergranular.

Moldes. Las gotas frías, inclusiones, porosidad, huecos y cavidades por encogimiento, pueden presentar problemas especiales en las fundiciones. Por ejemplo una fundición de aleación de aluminio para una bomba que contenía un imperio de acero, falló por fractura frangible debido a una imperfección preexistente. La discontinuidad de la microestructura

re en los lados de la grieta de esta fundición, la apariencia lustrosa de las superficies coincidentes de la fractura, la presencia de la porosidad de gas y la ausencia de cualquier otra anomalía en el material fundido identificaron la imperfección en la cual se originó la fractura como una gota — fría que se produjo durante la operación de fundido.

Forjas. Solapaduras, costuras, contracción, cavidades y dibujos de líneas de flujo, frecuentemente se relacionan con fallas en forjas.

Deficiencias del Proceso

Algunas veces la susceptibilidad a la falla esta relacionada con procedimientos inadecuados, especificaciones incompletas o ambiguas, cambios a las especificaciones hechas sin una evaluación completa, inobservancia de los procedimientos específicos, errores del operario o daño accidental.

El formado en frío y operaciones relativas, tales como estirado profundo, expansión, reducción y flexión, producen altos esfuerzos residuales. Estas operaciones alteran algunas veces propiedades mecánicas mayores o locales, producen micro o macrogrietas y causan depleción localizada de la ductilidad.

Los efectos superficiales y cambios metalúrgicos causados por el procesamiento tienen una influencia sobre la resistencia a la fatiga, la resistencia a la fractura frangible y la resistencia a la corrosión. Se pueden introducir también propiedades anisotrópicas, cambios de orientación de esfuerzos residuales con probables efectos dañinos sobre la susceptibilidad del producto terminado a fallar en servicio.

El corte, estampado y perforado dejan esfuerzos residuales que frecuentemente introducen también bordes ásperos o desgarrados que constituyen elevadores de esfuerzo.

El maquinado y esmerilado frecuentemente dejan esfuerzos residuales y aspereza que eleva el esfuerzo. El esmerilado severo es una fuente de sobrecalentamiento y de ablandamiento local consecuente; se ha sabido que produce agrietamiento, usualmente del tipo de cuarteadura, en los aceros endurecidos.

Las marcas de identificación por indentación de impacto o electrograbado es una fuente potencial de falla si se hace

en una región de la pieza sujeta a alto esfuerzo. El maquinado por descarga eléctrica produce fusión y una zona afectada por el calor; estos pueden ocasionar grietas en el servicio si no se controlan adecuadamente, especialmente en áreas sujetas a esfuerzo de un acero más duro de 50 - 55 Rc aproximadamente.

El tratamiento térmico incorrecto ocurre en una variedad de formas, tales como sobrecalentamiento, templado insuficiente, uso de temperatura de endurecimiento inaceptablemente baja, introducción de gradientes de temperatura excesivos y uso de condiciones de enfriado, templado, recocido y envejecimiento inadecuadas para una aleación o pieza específica.

La descarburización durante el tratamiento térmico induce algunas veces a falla por (a) fatiga, porque reduce considerablemente el límite de resistencia de la superficie; y (b) por distorsión en piezas pequeñas, en las cuales reduce la resistencia media de la sección.

La soldadura puede conducir a la falla mediante varios mecanismos a menos que se tomen precauciones adecuadas.

Uno de los tipos de falla por soldadura más graves es el agrietamiento por corrosión con esfuerzo de aceros inoxidables austéniticos soldados, especialmente en calderas, intercambiadores de calor y recipientes a presión. En algunos casos la operación de soldado misma, si ocasiona un calentamiento muy alto, puede volver al metal susceptible al agrietamiento por corrosión con esfuerzo; en otras situaciones el alivio del esfuerzo después de la soldadura puede ser el factor sensibilizante que conduzca a la falla.

Reparación. Cuando la soldadura se hace bajo condiciones de severa sujeción, como en el caso de piezas grandes o con plantillas de sujeción inadecuadas, la contracción del metal de soldadura y la zona afectada por el calor durante el enfriamiento, induce esfuerzos de tensión residual que pueden ocasionar el agrietamiento inmediatamente o promover el agrietamiento en el servicio. La selección de un metal de aporte inadecuado o el uso de calor excesivo durante la soldadura puede causar efectos similares.

A no ser que se haga según procedimientos cuidadosamente desarrollados y estrechamente controlados, es factible que el

agrietamiento de piezas o la reconstrucción de las mismas desgastadas por medio de soldadura (especialmente las construidas de acero de alta resistencia) ocasiona agrietamiento al momento o reduce la resistencia a la fatiga.

La reparación de una pieza que halla sido rechazada durante alguna fase de la fabricación saca a la pieza de los canales de producción normales y de esta manera es más probable que ocurran errores de procesamiento.

Errores de Montaje

Las fallas en servicio algunas veces resultan de errores de montaje que no se detectan al inspeccionar el fabricante o el comprador y que al parecer no impidían el funcionamiento normal cuando el producto armado se puso en servicio por primera vez.

Esta clase de falla está más frecuentemente relacionada con piezas móviles de conjuntos mecánicos o conjuntos eléctricos, pero muchas fallas causadas por errores de montaje ocurren también en componentes estructurales. Por ejemplo errores pequeños en la colocación de barrenos para remachas, han causado fallas por fatiga en miembros estructurales de alas de aeroplanos.

Algunas veces las deficiencias de este tipo tienen relación con especificaciones inexactas, incompletas o ambiguas de montaje, pero también ocurren frecuentemente como consecuencia de error o negligencia del operario.

La negligencia del operario puede ocurrir en una amplia variedad de formas comunes y novedosas y puede ocasionar costosos perjuicios, así como interrupción de la producción.

Las especificaciones o procedimientos inadecuados de ensamble contribuyen algunas veces a que ocurran fallas en el servicio. El desalineamiento de flechas, engranes y cojinetes, sellos y coples es con frecuencia un factor que contribuye a las fallas en el servicio.

Condiciones Inadecuadas de Servicio

La operación de equipo bajo condiciones anormalmente severas de velocidad, carga, temperatura y ambiente químico o sin programa regular de mantenimiento, inspección o vigilancia, es frecuentemente una contribución importante a la ocurrencia de fallas de servicio.

agrietamiento de piezas o la reconstrucción de las mismas desgastadas por medio de soldadura (especialmente las construidas de acero de alta resistencia) ocasiona agrietamiento al momento o reduce la resistencia a la fatiga.

La reparación de una pieza que halla sido rechazada durante alguna fase de la fabricación saca a la pieza de los canales de producción normales y de esta manera es más probable que ocurran errores de procesamiento.

Errores de Montaje

Las fallas en servicio algunas veces resultan de errores de montaje que no se detectan al inspeccionar el fabricante o el comprador y que al parecer no impedirían el funcionamiento normal cuando el producto armado se puso en servicio por primera vez.

Esta clase de falla está más frecuentemente relacionada con piezas móviles de conjuntos mecánicos o conjuntos eléctricos, pero muchas fallas causadas por errores de montaje ocurren también en componentes estructurales. Por ejemplo errores pequeños en la colocación de barrenos para remaches, han causado fallas por fatiga en miembros estructurales de alas de aeroplanos.

Algunas veces las deficiencias de este tipo tienen relación con especificaciones inexactas, incompletas o ambiguas de montaje, pero también ocurren frecuentemente como consecuencia de error o negligencia del operario.

La negligencia del operario puede ocurrir en una amplia variedad de formas comunes y novedosas y puede ocasionar costosos perjuicios, así como interrupción de la producción.

Las especificaciones o procedimientos inadecuados de ensamble contribuyen algunas veces a que ocurran fallas en el servicio. El desalineamiento de flechas, engranes y cojinetes, sellos y coples es con frecuencia un factor que contribuye a las fallas en el servicio.

Condiciones Inadecuadas de Servicio

La operación de equipo bajo condiciones anormalmente severas de velocidad, carga, temperatura y ambiente químico o sin programa regular de mantenimiento, inspección o vigilancia, es frecuentemente una contribución importante a la ocurrencia de fallas de servicio.

Los procedimientos de inspección y vigilancia pueden ser de poco o ningún valor a menos que se basen en una consideración integral de los diversos mecanismos de falla que pueden ser factibles para la pieza de que se trate. Tales procedimientos deben de ser capaces de detectar deterioro significativo durante las operaciones normales de inspección y mantenimiento, a intervalos regulares.

Un aspecto particularmente crítico de la operación, es el período inicial de varios tipos de equipo, especialmente cuando se ponen a funcionar equipo complejo por primera vez, pero también cuando el equipo se ha parado para mantenimiento o cuando es normal operarlo intermitentemente.

Durante el período inicial, el equipo puede estar sujeto a condiciones que no se encuentran en el funcionamiento normal, incluso cambios rápidos en el parámetro de operación, gradientes extremos de temperatura y otras condiciones anormales. Con frecuencia surge lo inesperado a pesar de que se han análisis completos y planeación anticipada.

Cuando se establecen procedimientos adecuados de iniciación bien planeados y controlados, el mal funcionamiento y posible falla de algunos componentes no debe de ocurrir de manera inesperada.

Los procedimientos de paro y mantenimiento de condiciones apropiadas durante el período de paro (especialmente con respecto a equipo complejo) conllevan esencialmente el mismo potencial para contribuir a las fallas que los procedimientos de iniciación.

El mantenimiento inadecuado es con frecuencia un factor que contribuye a las fallas en servicio. Los procedimientos de mantenimiento se deben reevaluar integralmente cuando vuelven a ocurrir fallas a pesar del mantenimiento programado con regularidad.

GRANJA 1 CUBA DEL CRITERIO GENERALMENTE ÚTIL PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES EN RELACION CON LOS DIFERENTES MECANISMOS DE FALLA, TIPO DE CARGA, TIPO DE ESFUERZO Y TEMPERATURA (C) DE OPERACION PREVISTAS.

MECANISMOS DE FALLA	TIPOS DE CARGA			TIPOS DE ESFUERZO			TEMPERATURA DE OPERACION			CRITERIOS GENERALMENTE ÚTILES PARA SELECCIONAR EL MATERIAL.
	IMPACTO	ESTATICO	REPETIDO	TENSION	COMPRESION	CIZALLAMIENTO	BAJA	AMBIENTE	ALTA	
FRACTURA FRAGIL	X	X	X	X	...	...	X	X	X	TEMPERATURA DE TRANSICION DE MUESCA V CHARPY. TENACIDAD DE MUESCA. MEDICIONES DE TENACIDAD ETC.
FRACTURA DUCTIL (b)	X	...	...	X	...	X	...	X	X	Resistencia a la tension. Resistencia de flexión de cizallamiento.
FATIGA DE CICLO ALTO (c) .....	...	X	...	X	...	X	X	X	X	Resistencia a la fatiga para la duración esperada con elevadores de esfuerzo típicos presentes.
FATIGA DE CICLO BAJO .....	...	X	...	X	...	X	X	X	X	Cíclica plástica máxima esperada en los elevadores de esfuerzo durante la duración prescrita.
FATIGA POR CORROSION .....	...	X	...	X	...	X	...	X	X	Resistencia a la fatiga por corrosión del metal y contaminante.
ALABRO	X	...	X	...	X	...	X	X	X	Módulo de elasticidad y resistencia a la flexión compresiva.
FLEXION MAYOR	X	...	...	X	X	X	X	X	X	Resistencia a punto cedente.
DESPLAZAMIENTO	X	...	...	X	X	X	...	...	X	Velocidad de deslizamiento o resistencia de ruptura por esfuerzo sufrida para la temperatura y duración esperada.
AGRIETAMIENTO CAUSTICO O POR HIDROGENO	X	...	...	X	...	...	...	X	X	Estabilidad bajo esfuerzo simultáneo y ambiente (s) químicos - de hidrógeno u otros.
AGRIETAMIENTO DE CORROSION POR ESFUERZO	X	...	...	X	...	X	...	X	X	Esfuerzo residual o impuesto o resistencia de corrosión al ambiente. Mediciones ISOC.

CAPITULO II

PRACTICA GENERAL EN EL ANALISIS DE FALLAS

PRACTICA GENERAL EN EL ANALISIS DE FALLAS

Se refiere primordialmente a procedimientos técnicos precauciones generalmente empleadas en la investigación y análisis de fallas metalúrgicas que ocurren en el servicio. Se tratan las etapas de investigación y se indican las diversas características de las causas más comunes de falla.

Objetivos de la Investigación de Fallas

La investigación de fallas y el análisis subsiguiente deben determinar la causa primaria de una falla y se debe iniciar la acción correctiva con base en tal determinación a efecto de evitar fallas similares. Frecuentemente se debe evaluar la importancia de las causas contribuyentes a la falla.

Etapas de un Análisis

Aunque el orden está sujeto a variación según la naturaleza de una falla específica, las etapas principales que comprende la investigación y el análisis de una falla, son las siguientes.

1. Recolección de antecedentes y selección de muestras.
2. Examen preliminar de la pieza fallida (examen visual y registro).
3. Prueba no destructiva.
4. Pruebas mecánicas (incluso prueba de dureza y tenacidad)
5. Selección, identificación, preservación y/o limpieza de todos los especímenes.
6. Examen macroscópico y análisis (superficie de fractura, grietas secundarias y otros fenómenos superficiales).
7. Examen y análisis microscópico.
8. Selección y preparación de secciones metalográficas.
9. Determinación del mecanismo de falla.
10. Examen y análisis de secciones metalográficas.
11. Análisis químico (general, local, productos de corro

sión superficial , depósitos o capas y análisis microexploratorio.)

12. Análisis de la mecánica de la fractura.
13. Prueba bajo condiciones simuladas de servicio (pruebas especiales).
14. Análisis de toda la evidencia, formulación de conclusiones y elaboración del informe, incluyendo recomendaciones

El tiempo empleado para averiguar todas las circunstancias de una falla, es tiempo bien invertido. Cuando se recibe un componente roto para un examen, algunas veces el investigador se inclina por preparar especímenes inmediatamente sin diseñar un procedimiento de investigación. Tal falta de previsión debe evitarse, puesto que al final se gastará mucho tiempo y esfuerzo innecesario, mientras que considerando antes detenidamente los antecedentes de la falla y estudiando las características generales, se podrá elaborar un procedimiento más informativo.

RECOLECCION DE ANTECEDENTES Y SELECCION DE MUESTRAS.

Inicialmente, la investigación de la falla se debe dirigir hacia una familiarización con los detalles participantes relativos a la falla, recogiendo la información disponible respecto a historia de manufactura, proceso y servicio de componente o estructura fallida y reconstruyendo en cuanto sea posible la secuencia de hechos que condujeron a la falla. La recolección de antecedentes de manufactura de un componente debe iniciarse obteniendo especificaciones y planos y debe abarcar todos los aspectos del diseño de los componentes. Los datos relativos a la manufactura y fabricación se pueden agrupar en (a) Proceso mecánico que debe incluir formación en frío, doblado, maquinado, pulido y esmerilado; (b) proceso térmico, que debe incluir detalles de formado en caliente, tratamiento térmico, soldadura de varios tipos, electroplastia y aplicación de recubrimientos mediante aleación química o difusión.

Antecedentes de Servicio. El obtener un historial completo de servicio depende en gran medida de cuán detallado y completo halla sido el registro antes de que ocurriera la falla. La disponibilidad de registros de servicio completos simplifica considerablemente la tarea del analista de fallas. Al recolectar historias de servicio, se debe presentar especial atención a los detalles ambientales, tales como cargas normales y anormales, sobrecargas accidentales, cargas cíclicas, variaciones de la temperatura, gradientes de temperatura y opera

ción en un ambiente corrosivo. Sin embargo, en muchos casos, no se dispone de registros de servicio completos, lo cual obliga al analista a trabajar a partir de información de servicio fragmentaria. Cuando los datos de servicio son escasos, el analista debe emplear lo mejor de su habilidad, deducir las condiciones de servicio. Mucho depende de su pericia y juicio, porque una deducción equivocada puede ser más dañina que la ausencia de información.

Registros fotográficos. El analista debe decidir si se requieren fotografías del componente fallido. Una falla que aparece casi intracendente en una investigación quizá después resulte tener consecuencias graves, por lo que puede ser importante un registro fotográfico completo de la investigación si las fotografías han de ser proporcionadas al analista de otra fuente, él debe estar seguro de que sean adecuadas para sus fines, que detallen adecuadamente las características de la falla.

Quando se requiere una reproducción exacta de color, el sujeto se debe fotografiar contra un fondo gris y se debe proporcionar al estudio fotográfico el fondo que debe usar como guía para el revelado y la impresión.

La selección de muestras se debe hacer antes de iniciar el examen propiamente dicho, especialmente si la investigación es prolongada o compleja. Al igual que con las fotografías, el analista es responsable de asegurarse de que las muestras sean adecuadas para el fin propuesto y que representen adecuadamente las características de la falla. Es recomendable buscar pruebas adicionales de daño. Además que es evidente de inmediato.

Frecuentemente es necesario comparar componentes fallidos con componentes similares que no fallaron, a fin de determinar si la falla fue originada por condiciones de servicio o fue resultado de un error de manufactura. Por ejemplo, si falla el tubo de una caldera y se sospecha que la causa sea sobrecalentamiento en el servicio, entonces la comparación con otro tubo remoto con respecto a la región expuesta a alta temperatura, determinará si los tubos fueron suministrados en condiciones de esferoidización.

Condiciones Anormales. Además de desarrollar una historia general del componente o la estructura fallida, es aconsejable determinar si prevalecieron cualesquier condiciones anormales u ocurrieron hechos en el servicio que pueden haber contribuido a la causa de la falla y también determinar si se

han efectuado cualesquier reparaciones o reconstrucciones recientes y porque se efectuaron, también es necesario averiguar si la falla que se investiga es un ejemplo aislado o si han ocurrido otras, ya sea en el componente bajo consideración o en otros de diseño similar. En el examen rutinario de una fractura frangible, es importante saber si al momento del accidente o falla la temperatura prevaleciente era baja o implicó alguna carga de impacto en algún grado. Cuando se trata de fallas de cigüeñales u otras flechas, por lo general es deseable determinar el estado de los cojinetes y si existía algún desalineamiento, ya sea dentro de la máquina de que se trate o entre los componentes impulsores y los impulsados.

Análisis de Restos. Posiblemente la precaución más importante que se debe tomar en el análisis de restos, es que la posición de todos y cada uno de ellos se debe registrar antes de que se toque o mueva cualquiera de ellos. Tal registro usualmente requiere extenso trabajo de fotografía, elaborar bosquejos adecuados y tomar y tabular mediciones pertinentes de las piezas.

A continuación, es esencial que se tome un inventario para asegurarse de que todas las piezas o fragmentos están presentes en el sitio del accidente. Por ejemplo, la investigación de un accidente de aviación involucra el desarrollo de un inventario considerable, que incluye la lista de número de motores "flaps", tren de aterrizaje, y las diversas partes del fuselaje y las alas. Obviamente, es esencial establecer si todas las piezas necesarias de la aeronave se encontraban a bordo en el momento que se estrelló.

Siempre que no se permita que los fragmentos entren en contacto entre sí, es también útil armar cuidadosamente los fragmentos o componentes rotos, que una vez armados quizá la secuencia en la cual ocurrieron las fracturas. La figura 1. muestra una oreja que era parte de un ensamble de junta de pasador; la falla ocurrió cuando el pasador se rompió de la oreja. Al armar la pieza de la oreja como se muestra en la figura 1, es evidente, por la deformación, que la fractura A debe haber precedido a las fracturas B y C.

Examen Preliminar de la Pieza Fallida

La pieza fallida, incluyendo todos sus fragmentos, se debe sujetar a un examen visual completo antes de efectuar cualquier limpieza. Frecuentemente, los suelos y los escombros encontrados sobre la pieza proporcionan evidencia útil para establecer la causa de la falla o para determinar una secuencia

de eventos que condujerón a la falla. Por ejemplo, huellas de pintura encontradas en cierta parte de una superficie fracturada pueden proporcionar evidencia de que una grieta, en la cual se filtro algo de pintura, existía en la superficie algún tiempo antes de que ocurriera la fractura. Tal evidencia debe observarse y registrarse.

Inspección Visual. El examen preliminar se debe de iniciar con una inspección a simple vista. El ojo sin ayuda tiene una profundidad de foco excepcional y la facultad de examinar grandes áreas rápidamente y detectar cambios sutiles de color y de textura. Algunas de estas ventajas se pierden cuando se utilizan dispositivos ópticos y optoelectrónicos. Se debe prestar especial atención a las superficies de fractura y a la trayectoria de las grietas. Se debe observar y evaluar la significación de cualquier indicación de condiciones anormales o mal trato en servicio y se debe hacer una determinación general del diseño básico y mano de obra de la pieza. Se debe registrar todas las características importantes incluso las dimensiones, ya sea por escrito o mediante bosquejos o fotografías.

Fotografía de Fracturas. Cuando se trata de fracturas, el siguiente paso en el examen preliminar debe ser la fotografía de la pieza fracturada en su totalidad, incluyendo pedazos rotos, para registrar su tamaño y condición y para mostrar cómo se relaciona la fractura con los componentes de la pieza. A continuación debe seguir un examen cuidadoso de la fractura estudiando su imagen en el respaldo de vidrio despolido de la cámara o a través del visor.

El examen se debe iniciar con el uso de iluminación directa y proseguir usando varios ángulos de iluminación oblicua e iluminación de campo oscuro, para evaluar como se pueden delinear y resaltar las características de la fractura de la mejor manera. Esto debe auxiliar también a determinar cuales áreas de la fractura son de interes primordial y que ampliaciones serán posibles, para un tamaño de imagen dado, para percibir detalles finos. Cuando se halla concluido esta evaluación, es pertinente proseguir con la fotografía de la fractura, registrando lo que muestra cada fotografía, su amplificación y cómo se relaciona con las demás fotografías.

Pruebas no Destructivas

Existen varias pruebas no destructivas extremadamente útiles en la investigación y análisis de fallas, especialmente la inspección por partícula magnética de metales ferrosos, la

inspección por líquido penetrante, inspección ultrasónica y la inspección electromagnética (corriente de remolino) de materiales que conducen electricidad. Todas estas pruebas se usan para detectar grietas superficiales y discontinuidades. Otras pruebas no destructivas utilizadas, son la radiografía especialmente para examen interno y análisis de esfuerzo experimental para determinar carga de máquinas y esfuerzos de componentes que causan falla.

La inspección por partículas magnéticas utiliza campos magnéticos para localizar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Cuando se magnetiza el material o pieza que se va a probar, las discontinuidades que yacen transversales a la dirección del campo magnético ocasionan que se forme un campo de fuga en ese punto y arriba de la superficie de la pieza. Este campo de fuga y por consiguiente la presencia de la discontinuidad, se detecta por medio de partículas ferromagnéticas finas aplicadas sobre la superficie, siendo recogidas y retenidas algunas de estas partículas por el campo de fuga. El conjunto de partículas retenidas magnéticamente forma un perfil de la discontinuidad e indica su tamaño, forma y extensión. Frecuentemente, se combina un material fluorescente con las partículas de manera que se puedan detectar rápidamente las discontinuidades visualmente bajo luz ultravioleta. Las líneas magnéticas de fuerza se pueden establecer (a) pasando una gran corriente eléctrica por el componente que se va a inspeccionar, (b) usando un yugo magnetizador y (c) usando una bobina magnetizadora. Después de la inspección con partículas magnéticas, se desmagnetiza el componente.

Entre las ventajas de la inspección por partículas magnéticas, se cuentan las siguientes:

1. El método mejor y más seguro disponible para detectar grietas superficiales, especialmente grietas muy finas y poco profundas o grietas rellenas con materias extrañas.
2. Las técnicas son muy fáciles de aprender y el proceso es rápido, sencillo y económico de ejecución.
3. Las indicaciones se producen directamente sobre la superficie de la parte y son una imagen magnética de la discontinuidad misma. No exige circuitos eléctricos ni lectura electrónica que calibrar o mantener en condiciones de funcionamiento..

4. Hay poca o ninguna limitación al tamaño o forma de la pieza que se va a probar.
 5. Originalmente no es necesaria una limpieza elaborada y el proceso funciona bien a través de una capa delgada de pintura u otros revestimientos no metálicos.
- Las limitaciones de la inspección por partículas magnéticas, son las siguientes:

1. No es completamente segura para localizar discontinuidades que se encuentran muy por abajo de la superficie.
2. El campo magnético debe ser de tal dirección que intercepte el plano principal de la discontinuidad.
3. Se requiere cuidado con el objeto de evitar el calentamiento y quemadura de las superficies en los puntos de contacto eléctrico.

Inspección por Líquido Penetrante. Este se usa para detectar defectos superficiales de los materiales. Se usa principalmente, pero no exclusivamente con materiales no magnéticos, en los cuales no se puede emplear la inspección de partícula magnética. La técnica de inspección por líquido penetrante involucra cubrir la muestra con líquido penetrante. Este líquido tiene características humectantes, por lo que se filtrará en grietas y fallas pequeñas en la superficie de la muestra. El exceso de líquido se limpia de la superficie y se aplica un revelador que causa que el líquido salga de las grietas o fallas que estén abiertas a la superficie. El líquido en sí es de un color muy brillante o contiene partículas fluorescentes que, bajo luz ultravioleta, hace que se destaquen las discontinuidades del material.

Las ventajas principales del método de líquido penetrante son sus posibilidades de usar en materiales no magnéticos, su bajo costo, su portabilidad y la facilidad con la que se puede interpretar el resultado.

Las limitaciones principales del método de líquido penetrante son:

1. Las discontinuidades deben de estar abiertas a la superficie.
2. Las piezas se deben limpiar antes y después de la prueba, porque el líquido penetrante puede corroer el metal.
3. Los revestimientos superficiales pueden evitar la detección.

ción de las discontinuidades.

Inspección Electromagnética. Algunas veces llamada inspección por corriente de remolino, se puede usar en todos los materiales que conduzcan la electricidad. Si una bobina que conduzca corriente alterna se coloca alrededor o cerca de la superficie de la muestra, establecerá corriente de remolino dentro del material, por medio de inducción electromagnética. Esta corriente afecta la impedancia de la bobina excitadora o cualquier otra bobina de captación cercana. Las grietas o fallas de la muestra ocasionarán distorsiones en la corriente de remolino, que a su vez causará distorsiones en la impedancia de la bobina. El cambio de impedancia resultante se puede detectar mediante los circuitos eléctricos apropiados y un medidor. Las fallas o grietas se manifestarán como cierta de flexión o fluctuación del medidor.

Las ventajas de la inspección electromagnética son:

1. Son detectables defectos superficiales como subsuperficiales.
2. No requiere operarios capacitados especialmente.
3. El proceso es adaptable a monitoreo continuo.
4. El proceso se puede automatizar sustancialmente y es capaz de alcanzar altas velocidades.
5. No se requiere contacto de sonda.

Las limitaciones de la inspección electromagnética incluyen.

1. La penetración es poco profunda.
2. Los materiales que se van a inspeccionar deben ser conductores eléctricos.
3. Las indicaciones se ven influidas por más de una variable.
4. Se requieren normas de referencia.

Los métodos de inspección ultrasónica se fundan en ondas sonoras de muy alta frecuencia que se transmiten por el metal y se reflejan en cualquier lindero, como por ejemplo el de

metal-aire en las superficies del metal o el lindero del metal-grieta en un defecto. Las ondas sonoras de alta frecuencia pueden detectar irregularidades pequeñas, pero son absorbidas con facilidad, especialmente por materiales de grano grueso.

Las ventajas de las pruebas ultrasónicas, son las siguientes:

1. Alta sensibilidad, que permite detectar grietas diminutas.
2. Gran poder de penetración, lo cual permite examinar secciones extremadamente gruesas.
3. Precisión de la medición de la posición de la falla y el cálculo del tamaño de la falla.

Las pruebas ultrasónicas tienen las siguientes limitaciones:

1. Complejidad del contorno, el tamaño y la orientación -- desfavorable de la discontinuidad pueden plantear problemas en la interpretación de los patrones de eco.
2. La estructura interna indeseable (por ejemplo tamaño de grano, estructura, porosidad, contenido de inclusiones, o precipitados finos dispersos) pueden dificultar la interpretación.
3. Se requieren normas de referencia.

La radiografía implica el uso de rayos X o rayos gamma, -- que se dirigen a través de la muestra hacia una placa fotográfica. Después de que se revela la placa, se puede examinar colocándola frente a una fuente luminosa. La intensidad de la luz que atraviesa la película sera proporcional a la densidad de la muestra y la longitud de la trayectoria de la radiación. De esta manera, las áreas más claras de la placa correspondrían a las áreas más densas de la muestra, en tanto que las áreas más oscuras indicarían una área donde hay una grieta o defecto que ocurre en la dirección del rayo incidente.

Las ventajas principales de la radiografía son su propiedad de detectar variaciones y defectos internos y que proporciona registros permanentes en forma de películas fotográficas.

El análisis de esfuerzo experimental se puede hacer por varios métodos, todos los cuales pueden ser valiosos para determinar los esfuerzos por carga de máquina y de componente que pueden causar fallas.

El recubrimiento se puede usar frecuentemente para (a) localizar áreas pequeñas de alta deformación, (b) determinar la magnitud aproximada de la deformación por tensión y compresión. Se pueden colocar entonces calibradores en las áreas de alta deformación y en las direcciones de deformación principales, para medir dichas deformaciones en longitudes de 0.02 a 6 pulgadas con exactitud. Aunque hay muchos dispositivos mecánicos, ópticos y eléctricos capaces de proporcionar mediciones exactas de deformación, el calibrador de deformación de resistencia eléctrica ha llegado a ser la herramienta de norma para uso general de laboratorio y de campo.

Los recubrimientos fotoelásticos también se han usado para mediciones de esfuerzo en laboratorio. Para esta técnica, se pega una capa birrefringente de espesor controlado a la pieza bajo prueba con un cemento reflejante. El análisis óptico es similar al análisis común, pero requiere equipo especial. El análisis se puede registrar en películas de color con cámara fija o cinematográfica.

La difracción de rayos X es el único método disponible para medición directa no destructiva de esfuerzos residuales superficiales en materiales cristalinos. Los esfuerzos se determinan midiendo el ángulo por el cual el cristal del material esforzado difracta un haz de rayos X.

Pruebas Mecánicas

La prueba de dureza es la más simple de las pruebas mecánicas y con frecuencia es la herramienta más versátil de que dispone el analista de fallas. Entre sus muchas aplicaciones la prueba de dureza se puede usar para (a) Auxiliar en la evaluación del tratamiento térmico (comparación de la dureza del componente fallido con la prescrita por la especificación); (b) Para proporcionar una aproximación de la resistencia a la tensión del acero; y (c) para detectar endurecimiento de trabajo o para detectar ablandamiento o endurecimiento causado por sobrecalentamiento, por descarburización o por carbono o captación de nitrógeno. La prueba de dureza es también esencialmente no destructiva, excepto cuando se requiere preparar un espécimen especial de prueba de dureza, como en la prueba de microdureza.

Pruebas de Tensión

Limitaciones de la prueba de tensión. En la mayoría de las investigaciones de falla de servicio, la prueba de tensión no proporciona mucha información útil debido a que relativamente pocas fallas resultan del uso de un material que sea deficiente en resistencia a la tensión o de una carga de tensión que se aplique hasta que ocurra la ruptura.

Además las muestras cortadas de componentes que han fallado por agrietamiento generalmente muestran ductilidad adecuada bajo las condiciones impuestas durante una prueba de tensión.

Las pruebas de tensión son esenciales durante la producción para determinar si el material cumple los requisitos especificados. También hay cierta justificación para probar la tensión de componentes que han fallado en el servicio, para eliminar material de mala calidad como causa posible de falla. Frecuentemente, estas pruebas de tensión para determinar la calidad del material las ejecutan fabricantes y proveedores al examinar componentes defectuosos que les han sido devueltos para análisis.

Durante la etapa inicial de una investigación basta determinar si el material es esencialmente dúctil o quebradizo, usualmente y ello se puede determinar por medio de una simple prueba de flexión. La reducción del área, que algunos consideran esta relacionada con la propiedad del material de deformarse plásticamente en una muesca y así aliviar la intensificación del esfuerzo da una medida mucho más realista de la ductilidad. El probar hierros colados y la mayoría de las aleaciones no ferrosas en cuanto a resistencia a la tensión es casi esencial, aunque se puede obtener alguna indicación, de la resistencia a la tensión a partir de las pruebas de dureza.

Se debe considerar el papel de la direccionalidad en las pruebas de de tensión. Es de esperarse que los especímenes, tales como flechas cortadas transversalmente al eje longitudinal rinden valores de resistencia a punto cedente y de alargamiento más bajo que aquellos cortados a lo largo del eje longitudinal, debido a la marca direccional y a la anisotropía resultante durante el estirado.

Selección, Preservación y Limpieza de Superficies Fracturadas

La selección, preservación y limpieza apropiadas de las

superficies fracturadas, son vitales para evitar que se destruyan u oscurezcan evidencias importantes. Las superficies de las fracturas pueden sufrir daño mecánico o químico. El daño mecánico puede originarse por varias causas, inclusive por golpearse con otros objetos, lo cual puede ocurrir durante la fractura en el servicio o al desmontar o transportar la pieza fracturada para analizarla.

El daño químico (corrosión) de un espécimen fracturado, se puede evitar de varias maneras. Por ejemplo baños preventivos de corrosión.

Limpieza. Las superficies de la fractura se deben limpiar solamente cuando sea absolutamente necesario. La limpieza puede ser necesaria para retirar restos y polvos que obstruyen el examen o para preparar la superficie para examen al microscopio electrónico. Los procedimientos de limpieza incluyen (a) el uso de chorro de aire seco o el uso de pincel de pelo suave; (b) tratando con solvente inorgánico, ya sea por inmersión o chorro; (c) tratando con soluciones ácidas o alcalinas suaves (según el metal) que atacan depósitos, pero a las cuales el metal base es esencialmente inerte; (d) limpieza ultrasónica; (e) aplicación y remoción de réplica plástica.

Examen Macroscópico de las Superficies de la Fractura

El examen detallado de las superficies de la fractura a amplificaciones que va desde 1 a 100 diámetros, se pueden hacer a simple vista, con una lupa o con un microscopio estereoscópico de baja amplificación, ocasionalmente, también puede ser ventajoso emplear un microscopio de exploración electrónica a baja amplificación. La fotografía de especímenes requiere una cámara de alta calidad para amplificaciones hasta de 20 diámetros y un metalógrafo con macroobjetivos y sistema de iluminación para amplificaciones de 20 a 50 diámetros. El sistema de luz incandescente (vertical y oblicuo) ordinario y los objetivos utilizados en metalografía común, generalmente son mejores para amplificaciones de 50 a 100 diámetros. Con frecuencia, un espécimen puede resultar demasiado grande o demasiado pesado para la platina del metalógrafo y puede ser difícil o no deseable cortar o seccionar el espécimen. En tales casos se pueden obtener resultados excelentes examinando y cuando sea pertinente, fotografiando réplicas obtenidas con el método para limpiar fracturas. Estas réplicas se pueden recubrir con una capa de aproximadamente 200 angstroms de espesor de oro o aluminio evaporado al vacío para mejorar su reflexividad o se pueden alumbrar de modo que el ángulo de la sombra aumente el contraste del detalle fino. Las réplicas

se pueden examinar con microscopía de luz incandescente o transmitida. Debido a que son conductoras eléctricas las réplicas se pueden examinar también con microscopía de exploración electrónica.

La cantidad de información que se puede obtener del examen de una superficie de fractura con amplificación de baja potencia, es sorprendentemente extensa. La consideración de la configuración de la superficie de fractura puede dar una indicación del sistema de esfuerzo que produjo la falla. La falla en la tensión monótonica produce una fractura "plana" (cuadrada) normal hasta el esfuerzo de tensión máximo bajo condiciones de deformación de plano y una fractura "oblicua" (corte) a 45° aproximadamente, si prevalecen las condiciones de esfuerzo de plano. Debido a que la deformación de plano pura y el esfuerzo de plano puro son situaciones ideales que raramente ocurren en el servicio. Muchas fracturas son planas en el centro, pero rodeadas por una fractura de "marco de fotografía" y "oblicua". La fractura oblicua ocurre porque las condiciones que se aproximan a la deformación del plano operan en el centro del espécimen pero se relajan hacia el esfuerzo del plano cerca de las superficies libres. Un ejemplo de este comportamiento se encuentra en la conocida fractura por tensión de "tasa y cono"

En hojas delgadas o varillas de diámetro pequeño, puede ocurrir fractura totalmente oblicua porque los esfuerzos a través del espesor son relajados por deformación plástica y no se puede desarrollar un estado de esfuerzo que se aproxima a la deformación del plano. El término "labio de corte" -- frecuentemente, se usa para describir una área de fractura oblicua entre una área plana y una superficie libre.

Generalmente el examen macroscópico puede determinar la dirección del crecimiento de la grieta y por consiguiente, el origen de la falla. Con fracturas planas por quebradura, la determinación depende principalmente de que la superficie de la fractura muestre "marca de galón", del tipo que se indica en la figura 2. La dirección del crecimiento de la grieta es casi siempre lejos de las puntas de los galones.

Las marcas de galón ocurren porque casi todas las grietas se escalonan en una etapa temprana de su desarrollo y conforme se expande el frente de la grieta, la huellas de los escalones forman las marcas de galón. En placas y hojas, las marcas de galón pueden resultar de la nucleación de nuevas grietas adelante de un frente de grieta principal.

Cuando las superficies de la fractura muestran tanto fractura plana como oblicua, generalmente se puede concluir que la fractura plana ocurrió primero. La extensión de la grieta, frecuentemente con horadación del frente relaja el estado de esfuerzo de demoración de plano de manera que la fractura final ocurre por fractura oblicua bajo condiciones de esfuerzo de plano. Contrariamente, si una fractura se ha iniciado en una superficie libre, el área de origen de la fractura usualmente se caracteriza por una ausencia total de fractura oblicua o "labio de corte".

El examen de baja amplificación de superficies de fractura frecuentemente revela regiones que tienen una textura diferente de la región de la fractura final; las fracturas por fatiga, corrosión por esfuerzo y agrietamiento por hidrógeno, pueden mostrar todas estas diferencias.

Examen Microscópico de las Superficies de Fractura

El examen microscópico de superficies de fractura, algunas veces es llamado microfractografía.

Se puede usar un microscopio de luz para fractografía, aunque su límite de resolución (aproximadamente 0.5 micras) y de profundidad de campo imponen ciertas restricciones.

El uso de réplicas de plástico, con recubrimiento metálico con reflejantes evaporados o sin ellos, es recomendable para microscopía de luz. Las réplicas permiten examinar detalladamente las regiones seleccionadas, sin necesidad de cortar el espécimen. También son cómodas de manejar y evitan el riesgo de dañar el frontal del objetivo del microscopio.

Con microscopio electrónico de transmisión, no se puede -- examinar directamente las superficies de fractura. Se requiere hacer réplicas adecuadas para mejorar el contraste. El límite de resolución es aproximadamente 50 angstroms para réplicas directas o de una sola etapa y de aproximadamente 100 a 150 angstroms para réplicas de dos etapas.

Los microscopios de exploración electrónica también están siendo más usados en fractografía, porque permiten el examen directo de la superficie de fractura en sí, sin necesidad de una réplica. La gran ventaja del microscopio de exploración electrónica es su capacidad de examinar especímenes de bajas amplificaciones.

También es extraordinariamente útil para examinar fracturas - en alambre fino u hoja delgada que son difíciles de replicar. El examen de especímenes eléctricamente no conductores, tales como materiales no metálicos o réplicas de fracturas metálicas, requiere que se recubran las muestras con un material -- conductor y para este fin son satisfactorios unos 50 angstrom de oro evaporado.

Aunque la interpretación de la microfractografía requiere práctica y comprensión de los mecanismos de fractura, hay solo un pequeño número de características básicas que son claramente reconocibles e indicativas de una modalidad específica de falla. Son las siguientes:

1. Fractura deprimida, típica de falla por sobreesfuerzo de metales y aleaciones dúctiles. (figura 3)
2. Facetas de resquebrajadura, típicas de fractura de ---- agrietamiento transgranular de metales y aleaciones exagonales cúbicas de cuerpo centrado y compacto. (figura 4).
3. Fractura intergranular de agrietamiento, típica de acero de temple quebradizo, donde la fractura se debe a la segregación de una especie de agrietamiento hacia los límites del grano (como oxígeno en hierro o níquel), ---- agrietamiento por corrosión de esfuerzo intergranular - (figura 5). O agrietamiento por hidrógeno.
4. Estrías de platina II, típicas de falla por fatiga. Véase la figura 6.

El examen metalográfico de secciones pulidas y tratadas mediante microscopía óptica y técnicas optoelectrónicas, es una parte vital de la investigación de fallas y se debe realizar como procedimiento rutinario. El examen metalográfico proporciona al investigador una buena indicación de la clase de material de que se trata y si tiene o no la estructura deseada. Si están presentes anomalías, éstas pueden no estar relacionadas con características indeseables que predisponen a falla temprana. Algunas veces es probable relacionarlas con una composición inadecuada o los efectos del servicio, tales como envejecimiento en acero al bajo carbono que haya causado precipitación de nitruro de hierro o gaseado en cobre. El microscopio puede proporcionar también información en cuan

to al método de manufactura de la pieza bajo investigación y al tratamiento térmico al cual ha sido sujeta, ya sea intencionalmente durante la fabricación o accidentalmente durante el servicio. Otros efectos del servicio, tales como corrosión, oxidación y endurecimiento severo de superficies de trabajo, también se revelan y se pueden investigar su grado. Igualmente, las características de cualquier grietas que puedan estar presentes, especialmente su modalidad de propagación, proporciona información respecto a los factores responsables de su iniciación y desarrollo.

Solamente se pueden dar algunas indicaciones generales en cuanto al mejor lugar del cual tomar especímenes para examen microscópico, porque casi cada falla tiene características individuales que se deben tomar en cuenta. En la mayoría de los exámenes se debe determinar, no obstante, si en la estructura de un espécimen tomado adyacente a una superficie de fractura o una región en la cual se ha desarrollado un defecto de servicio es representativa del componente como un todo. Esto se puede hacer solamente mediante el examen de especímenes tomados de otros lugares y en general es recomendable que el número seleccionado para examen sea más bien demasiado amplio - que demasiado limitado.

Cuando se examinan grietas microscópicamente, algunas veces se puede obtener la información más valiosa estudiando - los especímenes que incluyen los extremos de las grietas.

La investigación de grietas por fatiga, es recomendable tomar un espécimen de la región en la que se originó la fractura para determinar si el desarrollo inicial estuvo asociado con una anomalía, tal como un defecto de soldadura, una superficie descarburizada, una zona rica en inclusiones o, en fundiciones, una zona que contenga severa porosidad. Sin embargo cuando se trata de grietas de origen múltiple, tal procedimiento no es práctico; en estos casos, es más improbable que las grietas fueran debidas a falta de homogeneidad local. La iniciación de grietas por fatiga múltiple es muy típica tanto en la fatiga por rozamiento como por corrosión. Similarmente, con marcas de superficie, donde su origen es imposible de identificar por apariencias externas, el examen microscópico mostrará si ocurrieron en el estirado o surgieron por defectos del lingote, tales como escamas, astillas o costuras. En las fracturas por agrietamiento, es útil examinar un espécimen cortando donde se originó la falla, si se puede localizar con certeza porque estas fallas frecuentemente están asociadas con superficies endurecidas localmente por el trabajo

y especialmente, si el acero es del tipo de envejecimiento por deformación.

Usualmente es mejor revestir la superficie de la fractura del espécimen con un metal, tal como el níquel, antes de montar y seccionar, de manera que el borde de la fractura se apoye y se pueda incluir en el examen.

Examen y Análisis de las Secciones Metalográficas

Al igual que la prueba de dureza, y el examen macroscópico, el examen de secciones metalográficas con un microscopio es práctica normal en la mayoría de los análisis de fallas, debido a la cualidad sobresaliente del microscopio de revelar imperfecciones del material causadas por el proceso y detectar los resultados de una variedad de condiciones de operación en el servicio y de ambientes que pueden haber contribuido a la falla. Las inclusiones, segregación microestructural, descarburización, captación de carbón, tratamiento térmico inadecuado, martensita blanca no templada y corrosión intergranular, se encuentran entre muchas imperfecciones metalúrgicas y condiciones indeseables que se pueden detectar y analizar mediante el examen microscópico de secciones metalográficas.

La figura 7. muestra una sección a través de un engrane de acero nitrurado en el cual el esmerilado excesivo removió suficiente de la caja en las raíces de los dientes para disminuir la resistencia a la fatiga y causar la falla.

Aun en ausencia de una imperfección metalúrgica específica, el examen de secciones metalográficas es inapreciable para el investigador en la medición de parámetros, tales como profundidad de caja, espesor de los baños, tamaño del grano y zona afectada por el calor, todo lo cual puede tener relación con la causa de la falla.

Las secciones metalográficas también son útiles cuando se emplean técnicas metalográficas cuantitativas, tales como cuentas de puntos, análisis lineal o microanálisis de sonda electrónica, en el análisis de fallas.

Determinación del Tipo de Fractura

Para usar la información obtenida del examen de la región de la falla, las superficies de la fractura y secciones metalográficas para determinar las causas de la fractura, usual

mente es necesario determinar el tipo de fractura. Sin embargo, no existe una clasificación lógica satisfactoria de falla que implique fractura. Por ejemplo el alargamiento extenso de un espécimen de acero de bajo carbono, seguido de hendidura, podría clasificarse como fractura quebradiza o dúctil. La fractura catastrófica de baja energía de una aleación de aluminio de alta resistencia por coalescencia microhueca, también es difícil de clasificar porque aunque la energía de la fractura es baja y la fractura se habrá iniciado por fractura o descohesión de partícula quebradiza, el crecimiento o coalescencia de los microhuecos habrá ocurrido por deformación plástica. Otra dificultad es que la fractura de hendidura se puede iniciar por interacciones por dislocación, las cuales por definición implican plasticidad.

Clasificación de las Fracturas en Términos de su Mecanismo de Crecimiento

Las fracturas por sobrecarga de muchos metales y aleaciones ocurren por fractura dúctil. La sobrecarga en tensión es quizá la menos compleja de las fracturas por sobrecarga -- aunque esencialmente los mismos procesos operan en la flexión y tensión, así como bajo los estados complejos de esfuerzo -- que pueden haber producido una falla de servicio dada. Clásicamente, la fractura dúctil por tensión de un espécimen cilíndrico implica extensión plástica, inicialmente sin estrechamiento. Durante esta extensión, ocurre el agrietamiento de las partículas incluidas que están presentes aún en los metales más puros o bien descohesión de entrecaras de partícula matriz, creando microhuecos. Cuando se agota la propiedad del material para endurecerse en el trabajo, se inicia el estrechamiento y se establecen esfuerzos triaxiales que ocasionan la extensión lateral de los microhuecos que se coalescen para formar una grieta central. La fractura de la sección restante que produce una corona circular de fractura "oblicua" es menos entendida, pero probablemente ocurra por una grieta que crece circunferencialmente alrededor del espécimen bajo condiciones de esfuerzo plano. La ausencia total de partículas de segunda fase daría por resultado una fractura por reducción del 100% del área, pero esto ocurre raramente en fallas de servicio.

Los especímenes de hoja se fracturan por mecanismos similares y si son suficientemente gruesos para que operen condiciones de deformación de plano, se produce una fractura "plana" con labios de corte. La fractura oblicua total puede ocurrir en secciones delgadas, es decir bajo condiciones de esfuerzo de plano. Ocurren excepciones en materiales que muestran maleabilidad discontinua notable acompañada de la generación de

bandas de Lüders a través de toda la sección transversal del espécimen. Es posible que la fractura ocurra por coalescencia de microhuecos dentro de una banda de Lüders, produciendo una fractura totalmente oblicua en secciones gruesas, es decir bajo condiciones de deformación plana, nominalmente.

Fractografía de Fracturas Dúctiles

El examen fractográfico de superficies de fractura dúctil plana usualmente revela hoyuelos aproximadamente equiaxiales con evidencia de las partículas que originaron la fractura (véase la figura 8). La fractura oblicua o fractura dúctil que involucra componentes de esfuerzo de corte (tal como torsión), generalmente hoyuelos alargados (figura 9). Cuando los hoyuelos alargados son producidos por un componente de corte, los hoyuelos en la superficie de fractura que queda, apuntan en la dirección opuesta. En las superficies de fractura dúctil producida por desgarramiento, la grieta produce hoyuelos alargados en superficies coincidentes que son imágenes especulares.

Fractura por Fatiga

La fractura por fatiga resulta de la aplicación de esfuerzos repetidos o cíclicos, cada uno de los cuales puede ser sustancialmente inferior a la resistencia al punto cedente nominal del material. Debido a que el comportamiento de fatiga de laboratorio de muchos materiales y aleaciones está bien establecido, quizá sorprenda que todavía ocurran tales fallas de servicio a causa de este mecanismo. La dificultad estriba en que hay tantas variables que influyen en el comportamiento de fatiga, las cuales incluyen la magnitud y frecuencia de aplicación del esfuerzo fluctuante, la presencia de un esfuerzo medio, temperatura, ambiente, tamaño y forma del espécimen, estado de esfuerzo, la presencia de esfuerzos residuales, acabado de la superficie, microestructura y presencia de daño por rozamiento.

Características Generales de las Fracturas por Fatiga

Debido a que la mayor parte del área superficial de una grieta por fatiga se genera por un proceso que depende del esfuerzo de tensión, el sistema de esfuerzo responsable se puede deducir con frecuencia de la configuración de la fractura.

Las características macroscópicas más notables de las superficies de fractura por fatiga clásica, son las marcas de

progresión, marcas de concha o marcas de marea, que indican posiciones sucesivas del frente de avance de la grieta. véase la figura 10.

Las superficies de fractura por fatiga son de textura lisa cerca de sus orígenes y generalmente muestran ligera aspereza conforme crece la grieta. Hay poca ductilidad macroscópica asociada con la fractura por fatiga y puede haber alguna evidencia de que la grieta ha seguido planos cristalinos específicos durante el crecimiento temprano, dando así una apariencia facetada.

Microscópicamente, las superficies de la fractura por fatiga se caracterizan por la presencia de estrías, cada una de las cuales es producida por un ciclo de esfuerzo.

Grieta de Corrosión por Esfuerzo

Este es un proceso de falla mecánico-ambiental en el cual el esfuerzo mecánico y el ataque químico se combinan en la iniciación y propagación de la fractura en una pieza metálica. Es producida por la acción cinérgica de un esfuerzo de tensión sostenido y un ambiente corrosivo específico, que causa falla en menos tiempo que el que causaría la suma de los efectos separados del esfuerzo y el ambiente corrosivo.

La falla por agrietamiento de corrosión por esfuerzo frecuentemente es causada por exposición a un ambiente químico al parecer suave mientras está sujeto el metal a un esfuerzo de tensión que se encuentra por abajo de la resistencia a punto cedente. En estas condiciones grietas finas pueden penetrar profundamente en la pieza, aunque la superficie tal vez muestre cantidades al parecer insignificantes de corrosión, de ahí que puede no haber indicaciones macroscópicas de falla inminente. Los casos más comunes de falla por agrietamiento por corrosión de esfuerzo en servicio probablemente estén relacionados con los siguientes metales y aleaciones:

1. Aleaciones de aluminio de alta resistencia, especialmente del tipo de aluminio-cinc-magnesio bajo condiciones de corrosión atmosférica. Frecuentemente son importantes los esfuerzos internos y de montaje.
2. Los aceros inoxidables austeníticos y las aleaciones de níquel del tipo inonel en presencia de muy bajas concentraciones de iones de cloruro. El ion hidroxilo también causa falla.

3. Aceros estructurales de bajo carbono, usualmente en presencia de soluciones concentradas de nitrato o cáusticas-alcalinas.
4. Aceros de alta resistencia (resistencia a la tensión de 180 000 Psi y más) en una variedad de ambiente, probablemente jugando el agrietamiento por hidrógeno un papel determinante.
5. Aleaciones de cobre, notablemente latón de cartucho - 70Cu-30Zn, en ambientes amoniacales, usualmente en presencia de esfuerzos internos.

Características generales del agrietamiento de corrosión por esfuerzo. Estas grietas pueden ser intergranulares, transgranulares o una combinación de ambas. En las aleaciones de aluminio y aceros al bajo carbono, es usual la fractura intergranular, aunque la trayectoria de la fractura puede estar inmediatamente adyacente al lindero del grano más bien que precisamente a lo largo de él. Los aceros de alta resistencia y latones alfa también muestran fractura de lindero de grano - con algún agrietamiento a lo largo de entrecaras, a lo largo de matriz gemela. Las fracturas transgranulares que muestran ramificaciones extensas son típicas de agrietamiento de corrosión por esfuerzo en aceros inoxidable austeníticos del tipo 18Cr-8Ni y se han observado grietas transgranulares similares con ramificaciones que siguen planos cristalográficos. (Véase figura 11).

Otras características observadas en el agrietamiento por corrosión de esfuerzo incluye estriaciones, facetas de hendidura y lenguas, que se pueden confundir muy fácilmente con características similares en fracturas de hendidura y fatiga.

Agrietamiento por Metales Líquidos

La falla metalúrgica por penetración de metal líquido, -- usualmente alrededor de linderos de grano, tal vez se puede considerar como un tipo especial de agrietamiento por corrosión o de corrosión por esfuerzo, porque el esfuerzo aplicado o residual acelera la fractura. La penetración de aleaciones de cobre por mercurio y la penetración de aceros por estaño y cadmio fundido son ejemplos típicos. Usualmente tal penetración se puede detectar por examen microscópico de secciones pulidas o pulidas y tratadas. La identificación positiva del penetrante puede ser más difícil, pero el análisis de microsonda electrónica puede resolver este problema.

Agrietamiento por Hidrógeno

El hidrógeno agrieta varios metales y aleaciones, pero su efecto deletéreo en aceros, especialmente cuando la resistencia del acero es superior a unos 180 000 Psi, es de mayor importancia. Unas cuantas partes por millón de hidrógeno disueltas en acero puede causar agrietamiento del grueso de un cable y pérdida de ductilidad por tensión. Aun cuando la cantidad de gas en solución sea demasiado pequeña para reducir la ductilidad, puede ocurrir la fractura retardada inducida por hidrógeno (algunas veces llamada fatiga estática). Los ambientes gaseosos que contienen hidrógeno también son dañinos. El agrietamiento del grueso de un cable usualmente sigue a los linderos de grano preausteníticos y parece ocurrir cuando el efecto dañino del hidrógeno disuelto es superpuesto a los esfuerzos que acompañan la transformación austenítica a martensítica. Las áreas afectadas se reconocen en la superficie de fractura por su apariencia agrietada y alta reflexibilidad, que usualmente contrasta con la apariencia mate de las regiones circundantes de fractura dúctil. Esto ha llevado a que tales áreas se describan como "hojuelas" u "ojos de pescado".

El agrietamiento del grueso de un cable se reconoce rápidamente por procedimientos metalográficos y es más común cerca del centro de componentes más o menos voluminosos donde el apremio de deformación plástica es grande, pero su incidencia se puede reducir al mínimo modificando las prácticas de fabricación del acero y de tratamiento térmico. Este agrietamiento es importante con respecto a fallas de servicio, porque tal grieta se puede extender por fatiga y de esa manera iniciar la fractura catastrófica.

Fallas por Deslizamiento y Ruptura por Esfuerzo

El deslizamiento es el cambio de dimensión de un metal o aleación bajo un esfuerzo aplicado a temperatura que excede de $0.5 T_M$, siendo T_M el punto de fusión medido en la escala absoluta. Así pues, el plomo, estaño y aluminio superpuros pueden deformarse por deslizamiento a temperatura ambiente o un poco más alta, en tanto que pueden ser necesarias temperaturas cercanas a los $1\ 000^\circ\text{C}$ para permitir el deslizamiento en metales refractarios cúbicos de cuerpo centrado, tales como el tungsteno y molibdeno y en superaleaciones a base de níquel usadas en turbinas de gas. Es claro que la deformación por deslizamiento puede producir cambios suficientemente grandes en las dimensiones de un componente para inutilizarlo para el servicio antes de que ocurra la fractura. En otras situaciones, la deformación por deslizamiento puede conducir a la fractura; este tipo de falla se denomina ruptura por esfuerzo.

Generalmente son fáciles de identificar las fallas por deslizamiento y ruptura por esfuerzo: frecuentemente se pueden reconocer por la ductilidad y la multiplicidad de grietas intergranulares que por lo general están presentes (véase figura 12). La falla de ruptura por esfuerzo frecuentemente se puede identificar mediante el examen óptico de microsecciones porque por lo general hay una multiplicidad de huecos por deslizamiento adyacentes a la fractura principal (figura 13).

Las fallas por deslizamiento y ruptura por esfuerzo se comprenden mejor considerando los dos tipos generales de proceso de deslizamiento que ocurren. En el primer tipo, el deslizamiento de límite de grano se considera genera una concentración de esfuerzo en un punto triple, que no se puede aliviar por deformación plástica en un grano adyacente. Esto produce una grieta de límite de grano en forma de cuña. El segundo tipo involucra la iniciación de huecos en los límites del grano especialmente en aquellos límites orientados transversalmente a un esfuerzo de tensión y el crecimiento de huecos en la migración y precipitación de los vacíos. Este proceso se denomina deslizamiento por cavitación. La fractura de ruptura por esfuerzo debida a deslizamiento por cavitación, produce huecos que son detectables por fractografía, pero raramente se usa ésta para identificar falla de ruptura por esfuerzo. Sin embargo, la fractografía muestra que las cavidades producidas por los huecos usualmente no son esféricas, sino tienen formas cristalográficas complejas (figura 14) y que las estrías y patrones trazados también son observables (figura 15).

Aplicación de la Mecánica de Fractura

La mecánica de fracturas en las piezas y especímenes metálicos bajo carga y aplicación de los conceptos de la mecánica de fractura al diseño y predicción de la duración de servicio de piezas y componentes, son ambas pertinentes a la investigación de fallas debidas a fracturas y a la formación de medidas correctivas que eviten fallas similares. Los conceptos de mecánica de fractura son útiles para medir la tenacidad de fractura y otros parámetros y para proporcionar un marco de trabajo cuantitativo para evaluar la seguridad estructural.

Efectos de Muestras y de la Prueba y Evaluación de la Tenacidad. Entre los temas tratados en relación con los efectos de muesca, está la concentración de esfuerzo triaxial, confinamiento plástico y velocidad de deformación local. Los mé

todos de prueba que se consideran en relación con la prueba y evaluación de la tenacidad, son la prueba de tenacidad, de deformación de plano, la prueba de desgarre dinámico, la -- prueba de impacto.

Pruebas de Simulación de Servicio

Durante las etapas concluyentes de una investigación, puede ser necesario efectuar pruebas que traten de simular las condiciones en las cuales se cree que ocurrió la falla. Frecuentemente no es práctico probar en condiciones simuladas de servicio porque se requiere equipo elaborado y aun cuando sea práctico, es posible que no se conozcan o se comprendan completamente todas las condiciones de servicio. Por ejemplo, las fallas por corrosión, son difíciles de reproducir en el laboratorio y muchos intentos por reproducirlas han resultado engañosos. Pueden surgir errores graves cuando se trata de reducir el tiempo que requiere una prueba aumentando artificialmente la severidad de uno de los factores, tales como el medio corrosivo o la temperatura de operación.

Por otro lado, cuando sus limitaciones se comprenden claramente, la prueba simulada de los efectos de ciertas variables que se encuentran en el servicio puede ser útil para proyectar la acción correctiva que evitará falla similar o, por lo menos, prolongar la duración de servicio. La evaluación de la eficacia de aditivos especiales o lubricantes para contrarrestar el desgaste es un ejemplo de la aplicación exitosa de una prueba de servicio simulado empleando un número seleccionado de variables de servicio. La industria de la aviación ha usado con éxito dispositivos tales como el túnel de viento para simular algunas de las condiciones que se encuentran en vuelo y los arquitectos navales han empleado pruebas de tanque para evaluar modificaciones a los cascos, requisitos de potencia, gobierno y otras variables que pudieron prevenir fallas de componentes o promover la seguridad en el mar.

Individualmente, la mayoría de los fenómenos metalúrgicos involucrados en fallas se pueden reproducir satisfactoriamente a escala de laboratorio y la información obtenida de tales experimentos puede ser útil para el investigador, siempre y cuando se reconozca debidamente las limitaciones de las pruebas.

Análisis de la Evidencia, Formulación de Conclusiones y Elaboración del Reporte

Parte del trabajo realizado durante el curso de una inves---

tigación puede parecer innecesaria. Sin embargo, es importante distinguir entre trabajo que es necesario y el que no aporta resultados fructíferos. Durante un examen es de esperarse que algún trabajo realizado no ayudará directamente a determinar las causas de la falla; sin embargo, cierta evidencia negativa puede ser útil para descartar algunas causas de falla.

Por otro lado, se debe evitar cualquier tendencia por limitar el trabajo esencial para una investigación. En algunos casos es posible formarse una opinión respecto a la causa de falla a partir de un solo aspecto de la investigación, como por ejemplo un examen visual de la superficie de la fractura o del examen de un solo espécimen metalográfico. Sin embargo, antes de llegar a conclusiones finales, se debe buscar información complementaria que confirme la opinión original, si se dispone de tal información. La dependencia total en las que se puede sacar de un solo espécimen, tal como una sección metalográfica, se puede cuestionar rápidamente a menos que se pueda recurrir a un historial de fallas similares.

La siguiente lista de verificaciones, que aparece en forma de una serie de preguntas, se propone como una ayuda para analizar las evidencias derivadas de los exámenes y pruebas y para formular conclusiones. Las preguntas también son útiles para llamar la atención sobre detalles de la investigación general que pudieran haber sido omitidos:

¿ Se ha establecido la secuencia de la falla?

Si la falla involucró agrietamiento o fractura ¿Se han determinado los sitios de iniciación?

¿ Se iniciaron las grietas en la superficie o debajo de la superficie?

¿ Estaba el agrietamiento asociado con un concentrador de esfuerzo?

¿ Por cuánto tiempo estuvo presente la grieta?

¿Cuál era la intensidad de la carga?

¿Cuál era el tipo de carga: Estática, cíclica o intermitente?

¿ Como estaban orientados los esfuerzos?

- ¿ Cuál era el mecanismo de la falla?
- ¿ Cuál era la temperatura de servicio aproximada en el momento de la falla?
- ¿ Contribuyó la temperatura a la falla?
- ¿ Contribuyó el desgaste a la falla?
- ¿ Contribuyó la corrosión a la falla?
- ¿ Que tipo de corrosión?
- ¿ Era apropiado el material usado?
- ¿ Se requiere un material mejor?
- ¿ Era la sección transversal adecuada para la clase de servicio?
- ¿ Era la calidad del material aceptable de acuerdo con la especificación?
- ¿ Bran las propiedades mecánicas del material aceptables de acuerdo con la especificación?
- ¿ Estaba el componente que falló debidamente tratado térmicamente?
- ¿ Había sido fabricado apropiadamente el componente fallido?
- ¿ Estaba el componente fallido debidamente armado o instalado?
- ¿ Fue reparado el componente durante el servicio y si es así, se efectuo la reparación correctamente?
- ¿ Se hizo funcionar el componente debidamente para que se asentara?
- ¿ Se le dio mantenimiento apropiado al componente?
- ¿ Se lubricó apropiadamente?
- ¿ Tiene relación la falla con mal trato en servicio?
- ¿ Se puede mejorar el diseño del componente para evitar fallas similares?

¿ Es probable que ocurran fallas similares en componentes similares que se encuentran ahora en servicio y qué se puede hacer para evitar que fallen?

En general, las respuestas a estas preguntas se derivarán de una combinación de registros y de los exámenes y pruebas descritos. Sin embargo, la causa o causas de falla no siempre se pueden determinar con certeza. En tal caso, la investigación debe determinar la causa o causas más probables de la falla, distinguiendo los descubrimientos basados en hechos de mostrados, de conclusiones basadas en conjetura.

Elaboración del Informe. El reporte del analista de fallas debe ser escrito con claridad, concisión y lógica. El informe se divide en las secciones principales siguientes:

1. Descripción del componente fallido.
2. Condiciones de servicio al tiempo de la falla.
3. Antecedentes de servicio.
4. Antecedentes de manufactura y proceso del componente.
5. Estudio mecánico y metalúrgico de la falla.
6. Evaluación metalúrgica de calidad.
7. Resumen de mecanismos que causaron la falla.
8. Recomendaciones para evitar fallas similares o para corregir componentes similares en servicio.

Obviamente, no todo informe tendrá que cubrir cada uno de estos puntos. Los reportes extensos deben iniciarse con un extracto. Debido a que los lectores de informes de análisis de fallas con frecuencia son personal de compras, operación y contabilidad, debe evitarse el uso de jerga técnica siempre que sea posible. También puede ser útil un glosario de términos. El uso de apéndices que contengan cálculos detallados, ecuaciones y tablas de datos químicos y metalúrgicos, puede servir para mantener claro y despejado el cuerpo del informe.

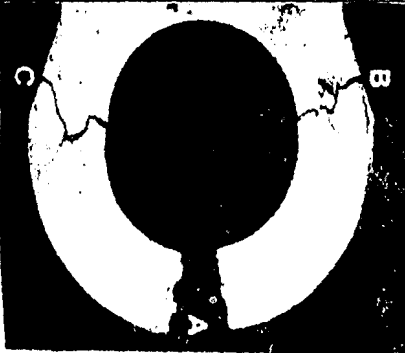


Figura 3. Fractografía TEM a 40,000x, de una replica de carbón de la superficie de una fractura por tensión dúctil que muestra el patrón de hoyuelos típicos de las fracturas por sobreesfuerzo de metales y aleaciones dúctiles.

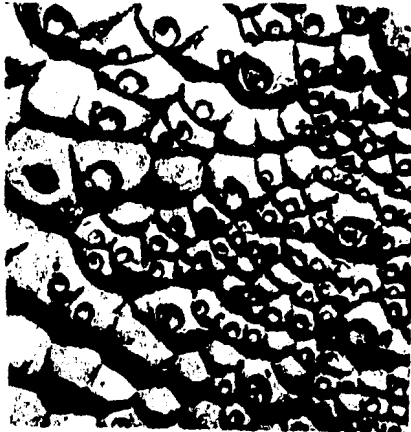


Figura 2. Marcas de galón en la superficie de fractura de un tubo de acero.

Figura 4. Fractografía a 16,000 x, de una superficie de fractura en un espécimen de cinc, que muestra una faceta de hendidura que contiene .. marcas fluviales generadas por un límite de subgrano.





Figura 5. Fractografía TEM a 6000x, de una réplica de carbón plástico de la superficie de una fractura frágil en acero que resulto del agrietamiento de corrosión por esfuerzo intergranular, mostrando un patrón de clives de poco ángulo u ausencia de deformación.

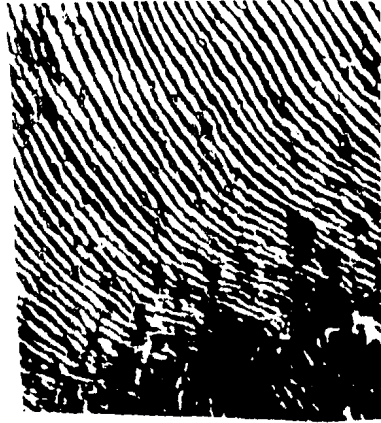


Figura 6. Fractografía a 3500x, de una superficie de fractura, que muestra estriaciones de etapa II típicas de la falla por fatiga.



Figura 7. Macrografía a 10x, de una sección a través de un engrane recto de acero nitrurado que falló por fatiga. El esmerilado incorrecto produjo por resultado adelgazamiento de la cementación nitrurada, con una reducción consecuente en resistencia a la fatiga.



Figura 8. Fractografía SEM, a 5000x, que muestra un patrón de hoyuelos ... equidimensionales producidos en una fractura por tensión dúctil.



Figura 9. Fractografía TEM, de una réplica de carbón a 6000x, que muestra - hoyuelos alargados resultantes de una fractura dúctil que involucra un componente de esfuerzo de cizallamiento.



Figura 10. Superficie de fractura por fatiga clásica, que muestra marcas de avance (marcas de playa) las cuales indican el frente progresivo de la grieta.



Figura 11. Micrografía a 20x, de una sección longitudinal de un espécimen de acero inoxidable austenítico, que muestra una corrosión por esfuerzo ramificada.

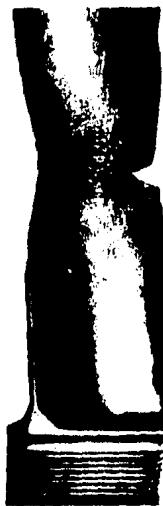


Figura 12. Deformación por deslizamiento típica y agrietamiento intergranular en el asa de una turbina de un motor de reacción.

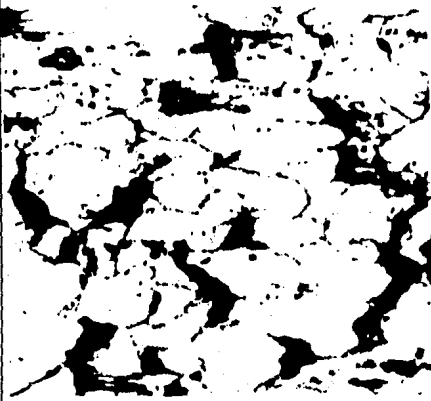


Figura 13. Micrografía a 300x de la superficie de ruptura por esfuerzo en deslizamiento de un acero inoxidable probado a 618 C. El eje del esfuerzo se encuentra en un plano horizontal.



Figura 14. Cavidades de deslizamiento en una superficie de fractura de un espécimen de hierro de alta pureza fracturado por impacto a baja temperatura después de la prueba de deslizamiento. Fractografía TEM, a 5000x.



Figura 15. Estriaciones y terraplen producidos anteriormente por deslizamiento.

CAPITULO III

TENACIDAD Y MECANICA DE LA FRACTURA

TENACIDAD Y MECANICA DE LA FRACTURA

La tenacidad es la capacidad de un material de absorber energía al deformarse plásticamente antes de la fractura. La tenacidad está determinada por la resistencia y ductilidad de un material y usualmente se mide por la cantidad de trabajo absorbido durante la propagación de una grieta a través de un miembro estructural o un espécimen estándar. La consideración de la tenacidad durante el diseño de una pieza permitirá la selección de materiales con poca probabilidad de falla por fractura y está considerada durante el análisis de fallas frecuentemente es necesaria para establecer las condiciones que condujeron a la fractura.

Una medida de la tenacidad es el área bajo una curva de deformación por esfuerzo de tensión estándar necesaria para la fractura, pero la dureza se mide más comunmente bajo condiciones de carga de velocidad alta de deformación, tales como en una prueba de impacto. Aunque puede usar especímenes uniformes para medir la tenacidad, ordinariamente se usan especímenes con muescas o preagrietados porque el significado más comunmente aceptado de tenacidad es la resistencia a la rápida propagación de la grieta o la ausencia de fragilidad.

Tenacidad de Muesca

La tenacidad de muesca usualmente se evalúa probando los especímenes de barra de muesca prescritos a temperaturas conocidas en una máquina de impacto del tipo de péndulo de golpe único. Los resultados se reportan en pies-libras de energía de impacto absorbida por el espécimen de prueba. Tanto el método Charpy como el Izod de prueba de impacto de barra de muesca hacen uso de un péndulo oscilante.

La prueba de impacto Charpy e Izod son métodos de prueba refinados y desarrollados a principio del siglo XX. Estos eran suficientes hasta la segunda guerra mundial cuando la atención se enfocaba en el problema de la tenacidad de muesca debido a la falla por fragilidad de planchas de unos 250 barcos de transporte soldados, 19 de los cuales se partieron en dos. Como estas fallas pusieron en peligro grave el esfuerzo de guerra de los aliados, se iniciaron varias investigaciones extensas y costosas bajo la dirección de la oficina nacional de normas y el laboratorio naval de investigación, en Washington D. C.

En el curso de estas y otras investigaciones paralelas, se desarrollaron varios métodos de prueba para la evaluación de

tenacidad de muesca. Lo más destacado de estas pruebas fueron la prueba de paso de caída, la prueba de combadura de explosión, la prueba de rotura Navy (Kahn) y varias pruebas de flección lenta, incluso la prueba de flexión Lehigh.

Aunque se usaron pruebas muy diferentes para los diversos laboratorios que investigaron el problema de la falla de los barcos, una revisión general de los datos de prueba indicaron claramente que la temperatura de transición de la prueba de impacto de muesca en V, de Charpy, se correlacionaba bien con la temperatura a la cual ocurrieron las fallas, todas las chapas en las cuales la fractura se originó tenían un valor de energía de muesca en V de Charpy, bajo (menos de 11 pies-libra) a la temperatura a la cual ocurrieron las fallas de los barcos. Debido a esta correlación y a algunas correlaciones subsecuentes, generalmente se considera la prueba Charpy de impacto de muesca V, el método preferido para medir la tenacidad de muesca del acero. Como resultado la industria a ido hacia la estandarización de esta prueba como indicador de la tenacidad de muesca en las especificaciones de materiales. Los requisitos pueden exigir una resistencia mínima al impacto a una temperatura dada o a una temperatura máxima a la cual los especímenes fracturados exhiban fractura de corte al 50%. Este último es el requisito más conservador.

Factores que Afectan la Tenacidad de Muesca. La tenacidad de muesca es influida por la composición química y las propiedades del material. Los elementos de aleación, contenidos de gas e impurezas, son los factores químicos que afectan esta propiedad. Los factores físicos incluyen dureza, microestructura, homogeneidad, tamaño de grano, tamaño de sección, dirección del estirado, temperatura de trabajo calientes y frías y métodos de fabricación. Las condiciones superficiales, tales como carburización o descarburización, también son importantes.

Uso de la Tenacidad de Muesca. Pocas piezas de servicio están sujetas a las condiciones de choque drástico inherentes a la prueba de impacto de barra con muesca. Además, el tamaño de la sección afecta también los valores de tenacidad de muesca. Por estas razones los resultados de la prueba de tenacidad de muesca, no pueden correlacionar siempre con la experiencia de servicio y no se pueden usar directamente en cálculos de diseño de ingeniería. Los valores llegan a ser significativos para el diseño solo cuando se correlacionan con un tipo determinado de estructura en una clase determinada de servicio. Por ejemplo, muchos componentes de maquinaria hechos de acero operan con éxito en frío extremo, sin consideración especial de los valores de tenacidad de muesca o las temperaturas a las cuales ocurra la transición de fractura dúctil a

frágil. Los aceros con temperaturas de transición más altas se pueden tolerar cuando el esfuerzo máximo de corte se aproxima al esfuerzo de tensión principal máximo, como en la prueba de torsión o de tensión simple bajo condiciones de deformación y temperaturas moderadas. Cuando la concentración del esfuerzo y la velocidad de deformación son altas y las temperaturas de servicio son bajas, se deben seleccionar aceros que tengan bajas temperaturas de transición.

Tenacidad de Fractura

La investigación de fractura frágil de las planchas de barcos de la segunda guerra mundial condujeron a nuevos métodos para evaluar la tenacidad de muesca. Los parámetros de tenacidad medidos por estas pruebas tienen, no obstante, las mismas limitaciones, que las pruebas de impacto de barra con muesca antiguas en cuanto a que los parámetros no son constantes de material. En su lugar, son afectados por el tamaño y forma del espécimen y su muesca. Así pues, se necesitaba un nuevo parámetro que fuera una constante de material. Se desarrolló un parámetro llamado tenacidad de fractura, mediante la aplicación de conceptos de la mecánica de la fractura.

Los conceptos de la mecánica de la fractura proporcionan un marco cuantitativo para evaluar la seguridad estructural en términos de esfuerzo aplicado, longitud de grieta e intensidad del esfuerzo en las puntas de la grieta. El método de mecánica de fractura elástica lineal para el análisis de fractura, incluye tres suposiciones principales:

1. Las grietas y fallas similares están inherentemente en piezas o especímenes.
2. Una grieta es una superficie plana interna libre en un campo lineal de esfuerzo elástico o un campo de esfuerzo puramente elástico en un continuo isotrópico (sólido sin características).
3. La cantidad de energía almacenada liberada a partir de un espécimen que se agrieta durante propagación rápida de la grieta es una propiedad básica del material, independientemente del tamaño del espécimen o pieza.

Muchos análisis de fallas han comprobado la validez de la primera suposición. Frecuentemente están presentes las grietas en tamaños inferiores a límite de sensibilidad de pruebas de inspección no destructivas. Por ejemplo, una caja de 250

pulg. de diámetro de combustible sólido del motor de un cohete se fracturó prematuramente durante la prueba hidrostática debido a una falla en forma de grieta de aproximadamente 1.6 pulgadas de largo, que fue localizada dentro de una soldadura de práctica y no fue detectada por la inspección de rayos X debido a que la falla era demasiado poco profunda. (véase figura 1). La tenacidad de fractura del metal de soldadura era inadecuada para tolerar una falla de este tamaño.

La segunda suposición se introduce para permitir la descripción matemática a los esfuerzos en la vecindad de la punta de la grieta. La suposición de un campo de esfuerzo elástico lineal parece contradictoria a lo que se conoce acerca de la fractura de metales. Sin embargo, cuando la región del campo de esfuerzo elástico lineal es grande en comparación con el tamaño de la zona plástica en la punta de la grieta, lo cual es con frecuencia la situación en estructuras grandes y con materiales de alta resistencia, ésta suposición es buena. Usando la teoría elástica lineal, los esfuerzos en un punto p, cerca de la punta de la grieta (figura 2) se pueden expresar con la siguiente fórmula:

$$\sigma_y = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\cos \theta}{2} \left(1 + \frac{\sin \theta}{2} \frac{\sin 3\theta}{2} \right) \dots \dots \dots (\text{eq. 1})$$

$$\sigma_x = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\cos \theta}{2} \left(1 - \frac{\sin \theta}{2} \frac{\sin 3\theta}{2} \right) \dots \dots \dots (\text{eq. 2})$$

donde σ_y es el esfuerzo perpendicular al plano de la grieta, σ_x es el esfuerzo perpendicular a la punta de la grieta y en el plano de la grieta, r es la distancia de la punta de la grieta al punto p, θ es el ángulo entre el plano de la grieta y una línea a partir del punto p a la punta de la grieta y k es una constante. Los puntos importantes son aquí: (a) una grieta en una pieza o espécimen cargado genera su propio campo de esfuerzo, un campo de esfuerzo que difiere de otro campo de esfuerzo de punta de grieta sólo por un factor de escala representado por K, y (b) el factor K expresa cómo mucho del esfuerzo se intensifica en la punta de la grieta y por lo tanto permite los factores de carga y geométricos que influyen para que la fractura en un espécimen o pieza se describa sobre una base uniforme.

Factores de Intensidad de Esfuerzo. La tercera suposición establece que la propagación rápida de la grieta se controla únicamente por una constante del material. Esta constante, que se denomina el factor de intensidad de esfuerzo crítico K_c , es el valor del factor de intensidad de esfuerzo, K, al cual la propagación de la grieta se vuelve rápida. Cuanto mayor sea el valor de K_c , tanto mayor será el esfuerzo necesario para producir la propagación rápida y mayor la resis-

cia del material a la fractura frágil. El factor de intensidad de esfuerzo crítico se determina con especímenes de laboratorio relativamente simples.

La relación entre el esfuerzo aplicado y tamaño de la grieta para los especímenes de laboratorio se conoce por un análisis de esfuerzo adecuado. La fractura del componente se puede reproducir en términos del esfuerzo aplicado y el tamaño de la falla probable, aplicando la ecuación 1 y 2 a las estructuras reales. El factor de intensidad de esfuerzo crítico que también se denomina tenacidad de fractura de esfuerzo de plano y se expresa en unidades de $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ o $\text{Psi}\cdot\text{in}^{1/2}$; está directamente relacionada con la energía requerida para la propagación de grieta rápida por la fórmula:

$$K_{Ic}^2 = EG_c \dots\dots\dots (\text{Eq. 3})$$

donde E es el módulo elástico (en MPa o en Psi) y G_c es la velocidad de liberación de energía de deformación crítica para la propagación de la grieta inestable (en $\text{Megajoules}/\text{m}^2$ o en $\text{in}\cdot\text{lb}/\text{in}^2$).

La fractura de secciones delgadas usualmente produce tanto tipos de superficies de fractura de cara de corte (o alta energía) como cara plana (baja energía). En general, según aumenta el espesor del espécimen, decrece el porcentaje de la superficie de fractura de cara de corte, la energía necesaria para propagar una grieta y K_{Ic} . Como se muestra en las figuras 3 y 4, a cierto espesor de sección específico (que es diferente para cada material y condición de tratamiento térmico) la propagación de la grieta está gobernada por las condiciones de deformación de plano y el factor de intensidad de esfuerzo crítico alcanza un valor mínimo designado como el factor de intensidad de esfuerzo de deformación de plano crítico (K_{Ic}). Este factor, también llamado tenacidad de fractura de deformación de plano, es particularmente pertinente en la evaluación de materiales porque, a diferencia de otros parámetros de tenacidad, es esencialmente independiente de las dimensiones del espécimen, siempre que se satisfagan las condiciones de deformación de plano. Además, la iniciación de crecimiento lento de grieta generalmente está gobernado por condiciones de deformación de plano, de manera que K_{Ic} no solamente caracteriza la fractura total en secciones gruesas, donde las condiciones de deformación de plano prevalecen, sino también indica el esfuerzo al cual las grietas se propagan en secciones más delgadas. Cuando K_{Ic} se considera en el diseño y la selección del material, se considera la probabilidad de escoger el material correcto, de evaluar adecuadamente el peligro poten

cial de una falla y evitar fractura catastrófica.

Para determinar los valores de K_{Ic} en el laboratorio, es necesario usar especímenes que estén diseñados para producir deformación de grieta de modalidad I o modalidad de apertura (véase figura 5). Hay dos tipos válidos de especímenes que se pueden usar: Especímenes de flexión y especímenes de tensión compacta (CT).

Efectos de la Resistencia del Material. Por supuesto la resistencia del material puede tener un efecto pronunciado sobre la tenacidad de la fractura de un material dado; en general, según se incrementa la resistencia decrece la tenacidad de fractura. Esto se ilustra por la resistencia a la tensión en la figura 6. Aunque la figura 6 presenta datos para sólo tres tipos de acero, es suficiente mostrar que para un requisito de resistencia dado, el ingeniero de materiales y el diseñador pueden seleccionar materiales diferentes para lograr niveles diferentes de tolerancia de grieta o falla para una estructura de ingeniería dada.

Además del efecto del nivel de resistencia sobre valores de K_{Ic} , operaciones de procesamiento de materiales, tales como fusión, forja, estirado y soldadura, pueden influir de manera significativa la influencia de la magnitud y grado de anisotropía de los valores de K_{Ic} para cualquier material dado.

Efecto de la velocidad de Carga. En ASTM E399 - 72, para prueba de tenacidad de fractura por deformación de plano, se recomienda que se controle, la velocidad de carga para mantener la velocidad de incremento del factor de intensidad de esfuerzo (dk/dt o k) dentro de la gama de .55 a 2.75 MPa.m^{1/2}/seg. Las velocidades de intensidad de esfuerzo arriba de esta gama influirán el valor de K_{Ic} , dependiendo de la sensibilidad de la velocidad de deformación del material. Para aceros de baja resistencia tales como ASTM A533, grado B, la tenacidad de fractura dinámica (K_{Ic}) es considerablemente inferior que los valores de K_{Ic} estáticos (velocidad normal de carga) como se muestra en la figura 7. La relación entre la tenacidad de fractura por deformación de plano K_{Ic} y la velocidad de intensidad de esfuerzo (K) puede diferir considerablemente para calores diferentes y tratamientos térmicos de un material, como se ilustra en la figura 8 para un acero fundido Cr-Ni-Mo de alta resistencia. La velocidad de carga (y velocidad de deformación resultante) afecta también la tenacidad de fractura y el comportamiento de fractura de piezas en servicio.

Efectos de la Temperatura. Los efectos de la temperatura de prueba en los valores de tenacidad de fractura por deforma

ción de plano para dos aceros de alta resistencia diferentes y para una aleación de aluminio de alta resistencia se muestran en la figura 9 y 10. En contraste con la caída significativa de K_{Ic} con temperatura decreciente que ocurre para los dos aceros, la figura 10 ilustra una falta de dependencia de K_{Ic} en la temperatura, hasta -196°C para la aleación de aluminio. La caída de K_{Ic} con temperatura decreciente que se muestra en la figura 9 y 10 para los dos aceros es típica de la mayoría de las aleaciones a base de hierro que tienen una estructura cristalina cúbica de cuerpo central y refleja una transición en su comportamiento de fractura, de dúctil a frágil. Este efecto de temperatura sobre K_{Ic} y el comportamiento de fractura se observa también con el titanio y algunos otros metales que tienen una estructura exagonal aglomerada de cristal. El aluminio y la mayoría de otros metales y aleaciones que tienen una estructura de cristal cúbica de cara centrada no muestran una caída de K_{Ic} o una transición clara en el comportamiento de fractura.

El efecto de la temperatura sobre otras propiedades de tenacidad para un material dado, es similar a estos efectos en K_{Ic} .

Aplicación de la Mecánica de la Fractura

La mecánica de la fractura se puede utilizar para diseñar y predecir la duración de servicio de recipientes de presión y otras estructuras de ingeniería en las cuales el crecimiento de la falla o las fracturas dependientes del tiempo tales como las que se derivan del agrietamiento por corrosión con esfuerzo, o fatiga, son importantes.

Los datos de fatiga convencionales generalmente se obtienen con especímenes pequeños de laboratorio y se grafican como curvas S-N, pero el valor absoluto del esfuerzo requerido para producir fractura a un número dado de ciclos depende de la configuración del espécimen. Sin embargo, si se expresan los datos de fatiga en términos del factor de intensidad de esfuerzo (K) como una función ya sea de ciclos a fractura o velocidad de crecimiento de grieta, la curva básica obtenida depende de la configuración del espécimen.

Duración de Recipientes a Presión. Generalmente se conoce que las estructuras fabricadas contienen fallas de varias clases, incluyendo grietas por soldadura, grietas por enfriamiento, sopladuras y costuras, que no pueden ser detectadas antes de que la estructura se ponga en servicio. La duración de servicio de cualquiera de tales estructuras depende de (a) el tamaño de la falla necesaria para causar fractura rápida (es decir, tamaño crítico de falla) a niveles de esfuerzo de opera

ción, (b) el tamaño inicial de las fallas y (c) las características de crecimiento subcrítico de la falla del material.

Los tipos de fallas encontradas en las estructuras fabricadas se pueden categorizar como fallas de superficies, fallas incrustadas y fallas a través del espesor. Para las fallas superficiales e incrustadas, el grado de constreñimiento en la punta de la falla (grieta) es alto y generalmente prevalecen condiciones de deformación de plano. El que las fallas iniciales alcancen tamaños críticos antes de la propagación por todo el espesor de una pieza depende de la tenacidad de fractura por deformación de plano (K_{Ic}), niveles de esfuerzo aplicados y espesor del material. Si el tamaño crítico de la falla es menor que el espesor de la pared no es probable la formación de una falla a través del espesor hasta la fractura. Si ocurre la fractura rápida antes de que una falla se propague completamente a través del espesor, la falla tiene, al momento de la fractura rápida, muy frecuentemente una forma elíptica o semielíptica.

Velocidades de Crecimiento de la Grieta. La vida de fatiga de una estructura se puede considerar que comprende tres etapas distintas, o sean, (a) iniciación de la grieta, (b) propagación de la grieta y (c) fractura rápida final. La presencia de una falla pre-existente (grieta) reducirá o eliminará la etapa de iniciación. Para muchas consideraciones de diseño, la segunda etapa, o sea crecimiento de la grieta por fatiga, es la de mayor importancia, porque es realista suponer que alguna forma de falla está presente inicialmente en cualquier estructura. Conforme una grieta por fatiga crece bajo una carga cíclica de amplitud constante y valor medio, la intensidad del esfuerzo en la punta de la grieta incrementa como resultado de incremento en el tamaño de la grieta. Finalmente, la grieta puede crecer hasta una longitud suficiente para que el factor de intensidad de esfuerzo alcance el valor crítico (K_{Ic}) en el cual ocurre la fractura rápida final. (en aleaciones tenaces de baja resistencia para las cuales no se puede obtener K_{Ic} en el tamaño de la estructura de que se trata, la fractura rápida final ocurre en la modalidad de esfuerzo de plano y es dúctil).

La dependencia de la velocidad de crecimiento de la grieta por fatiga, sobre el factor de intensidad de esfuerzo (K) ha sido verificada por muchas investigaciones y ha resultado una ley de potencia exponencial de velocidad de crecimiento de grieta por fatiga, como sigue:

$$da/dn = C_0 (\Delta K)^n \dots\dots\dots (Eq. 4)$$

donde da/dn es la velocidad de crecimiento de la grieta por fatiga, C_0 y n son constantes que dependen del material, carga media relativa y frecuencia de la carga; y ΔK (algunas veces expresada como ΔK_I) es el factor de intensidad de esfuerzo durante un ciclo de carga. Los datos de velocidades de crecimiento de grieta por fatiga de este tipo para placa de acero ASTM A533, grado B, clase 1, de recipientes para presión, se muestran en la fig. 11. Extensa información para varios aceros martensíticos de alta resistencia, muestran que el parámetro principal que afecta el crecimiento de la grieta por fatiga, es la gama del factor de intensidad de esfuerzo y que otras propiedades mecánicas y metalúrgicas de estos aceros tienen efectos insignificantes en las velocidades de crecimiento de grieta por fatiga en el aire a temperatura ambiente. Los datos de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga de estos aceros caen dentro de una banda angosta -- única, como se muestra en la figura 12.

Las constantes de la ecuación 4 se pueden determinar para un material construyendo líneas rectas de los límites de dispersión de la banda en una gráfica de da/dn . Ver los valores de ΔK para el material, como los da la figura 11 y 12.

La ventaja del método de mecánica de fractura a los estudios de crecimiento de grieta, es que las variables carga aplicada y longitud de grieta se pueden incorporar al parámetro, ΔK , que describe las condiciones de intensidad de esfuerzo correspondientes a una velocidad de crecimiento de grieta bajo carga cíclica. Por tanto, mediante este método es posible aplicar datos de velocidades de crecimiento de grieta a una amplia variedad de longitudes de grieta iniciales, cargas -- aplicadas, formas de espécimen y patrones de esfuerzo.

El crecimiento de grieta puede ser causado por esfuerzos cíclicos en un ambiente benigno (fatiga), carga sostenida en un ambiente agresivo (corrosión por esfuerzo) o los efectos combinados de esfuerzos cíclicos y un ambiente agresivo. En la figura 13 se compara el comportamiento de crecimiento de grieta por fatiga de corrosión en una solución de cloruro de sodio al 3% y el comportamiento de crecimiento de grieta por fatiga en aire, de un acero 4340 templado a una resistencia a la flexión de 180 Ksi. y cargado senoidalmente a 6 ciclos por minuto. En estos experimentos, la velocidad de crecimiento de la grieta de fatiga por corrosión en la solución de cloruro de sodio fue de cinco a seis veces tan alta como la velocidad de crecimiento de la grieta por fatiga en el aire. La aceleración del crecimiento de la grieta por fatiga inducida ambientalmente, aumenta al aumentar la resistencia a punto

cedente y está relacionada con el umbral del agrietamiento por corrosión de esfuerzo, $K_{I_{SCC}}$, del sistema de ambiente-material bajo consideración. Esto destaca la necesidad de realizar pruebas de tenacidad, fractura y velocidad de crecimiento de grietas por fatiga bajo ambientes similares al servicio.

Velocidad de Crecimiento de Grieta por Corrosión de Esfuerzo. La susceptibilidad al agrietamiento se determina frecuentemente, midiendo el tiempo hasta la fractura en un ambiente corrosivo del espécimen esforzado. En estas pruebas el tiempo hasta la fractura, incluye el tiempo requerido para iniciar una grieta por corrosión con esfuerzo, que puede representar una gran parte de la duración de la prueba. La mecánica de fractura, por otra parte, trata solo con crecimiento de fractura y de esta manera no considera la fase de iniciación del agrietamiento por corrosión con esfuerzo en materiales que contienen fallas pre-existentes o para investigación acerca de la cinética del crecimiento de grietas.

Los especímenes adecuados para el estudio de agrietamiento por corrosión con esfuerzo que usan mecánica de fractura, son similares a los usados en la prueba de tenacidad de fractura convencional.

Los resultados de una serie típica de pruebas de corrosión con esfuerzo de mecánica de fractura en un acero martensítico Ni-Cr-Mo-V experimental de ultra alta resistencia, se muestran en la figura 14. Se puede ver que a una intensidad de esfuerzo inicial correspondiente al valor de K_{Ic} del material, el espécimen se fractura casi inmediatamente. Al disminuir los valores de K_{Ic} el tiempo de fractura aumenta hasta que, debajo de un nivel de intensidad de esfuerzo de $18 \text{ Ksi.in}^{1/2}$ no ocurre el agrietamiento por corrosión con esfuerzo, en 10 000 minutos y se determina el umbral de agrietamiento por corrosión con esfuerzo, $K_{I_{SCC}}$. Es importante seleccionar, para cada clase de material un tiempo suficientemente largo de corte o agotamiento para determinar un valor de $K_{I_{SCC}}$ exacto para aceros de resistencia más baja, que tienen niveles altos de tenacidad de fractura, el tiempo de agotamiento requerido para mediciones de $K_{I_{SCC}}$ exactas puede ser de varios miles de horas. Además de especímenes de carga constante, K_I en aumento, y viga voladiza para determinar $K_{I_{SCC}}$, hay especímenes de desplazamiento constante, K_I en disminución (especímenes de carga de perno, carga de abertura de cuña o Wol) o especímenes de K constante de doble viga voladiza cónica (DCB).

Como se muestra previamente para el parámetro K_{Ic} de tenacidad de fractura de deformación de plano, el parámetro $K_{I_{SCC}}$ de agrietamiento por corrosión con esfuerzo, frecuentemente varía notablemente según la composición de la aleación, resistencia

y orientación del esfuerzo con respecto de la textura forjada. Los valores de K_{Isc} determinados para especímenes de varias configuraciones se implican fácilmente al diseño de miembros estructurales que tengan una grieta superficial mediante el uso de ecuaciones apropiadas.

La figura 15 muestra valores de K_{Isc} para aceros comerciales probados en agua de sal, graficados como una función de resistencia a punto cedente. En la gráfica se muestran curvas calculadas para dos valores supuestos de profundidad de grieta de superficie, b. El uso de tales curvas es como sigue:

1. Se supone algún valor de profundidad de la grieta que se considere detectable (y por consiguiente eliminable) en un diseño dado.
2. Para la profundidad de la grieta supuesta, calcúlese los valores de K que correspondan a varios valores su puestas de esfuerzo igual a la resistencia a punto cedente.
3. Trácese una línea por los puntos calculados en el paso dos en una gráfica de valores medidos de K_{Isc} contra resistencia a punto cedente para las aleaciones que se están considerando para el uso en el diseño (véase figura 15).
4. Seleccione de estas aleaciones las que tengan valores -- arriba de la línea trazada en el paso tres.

De esta manera se pueden utilizar cuantitativamente el parámetro de agrietamiento de corrosión con esfuerzo de mecánica de fractura, en el diseño y selección del material.

Pruebas De Tenacidad De Muesca

En este artículo se describe detalladamente y hace referencia a una variedad de pruebas para determinar la tenacidad de muesca, con carga de impacto y carga lenta.

Pruebas Charpy e Izod. La máquina Charpy tiene una energía disponible total de golpe de 220 pies-libra. El espécimen de prueba, sostenido en ambos extremos, se rompe con un solo golpe del péndulo aplicado a la mitad del espécimen sobre su lado sin muesca. El espécimen se rompe en la muesca, las dos mitades vuelan y el péndulo pasa entre las dos partes del yunque.

La altura de la caída menos la altura de elevación de la cantidad de energía absorbida para deformar y romper el espécimen, a esto se agregan pérdidas por fricción y otras que su

man de 1 a 2 libras-pie. El instrumento se calibra para registrar directamente energía absorbida por el espécimen de prueba.

La máquina Izod es similar en principio, pero el espécimen de la prueba se sostiene rígidamente en un tornillo de banco como viga voladiza, con el centro de la muesca coincidente con la cara superior de las quijadas. La capacidad de la máquina es usualmente de 220 pies-libra. La mitad del espécimen de prueba se rompe y el valor del impacto se determina como en la prueba Charpy.

En la figura 16 se dan detalles dimensionales para cuatro especímenes estándar Izod y Charpy. El espécimen Charpy-de muesca en V se usa ampliamente para aceros estructurales, como es el espécimen de ojo de cerradura. La prueba Izod puede registrar valores más altos que la Charpy pero es difícil de usar para pruebas a temperatura reducida. Para probar aceros tratados térmicamente, se usan tanto el espécimen con muesca en V como el espécimen de ojo de cerradura, mostrando la mayoría de usuarios preferencia por la muesca en V. Las comparaciones de los resultados con muesca Charpy en V y de ojo de cerradura para los mismos aceros probados dentro de una gama de temperaturas, se muestran en la figura 17.

Prueba De Flexión Lenta Con Muesca. La opiniones varían en cuanto a si el comportamiento de las estructuras se puede producir a partir de pruebas de impacto que involucran velocidades de deformación muy altas que raramente corresponden a condiciones reales de servicio. Consecuentemente, se han propuesto pruebas de flexión lenta para investigar la fractura frágil de estructuras de acero. En tales pruebas, los especímenes son geoméricamente similares al espécimen Charpy de muesca V estándar y muchos varían de tamaño desde $3/8$ de pulgada en cuadro por dos pulgadas de largo a 9 pulgadas en cuadro por seis pies de largo. El radio de la muesca se mantiene constante para cada espécimen. Los especímenes se doblan en una máquina de prueba de tensión a velocidades muy bajas de deformación con la muesca en tensión. La capacidad de carga (resistencia) del material se puede calcular a partir de la carga de ruptura. La deflexión sirve como una medida de ductilidad relativa.

Esta prueba se ha usado principalmente para probar a temperatura ambiente. El comportamiento frágil o dúctil depende del tamaño del espécimen; las piezas pequeñas se doblan, las barras más largas del mismo material se rompen.

Prueba Lenign de Flexión. Es otra prueba que se usa más ampliamente. Puede aplicarse a especímenes que contienen un cordón de soldadura longitudinal con depositos de soldadura o sin él. El espécimen de prueba lenign (Figura 18) es de 3 pulgadas de ancho por 12 pulgadas de largo, por 1/2 a 3/4 de pulgada de espesor y tiene una muesca a toda su anchura. La muesca puede ser una muesca estandar en V o una muesca menos severa (1 mm de radio y 0.000 in de profundidad) el espécimen se dobla lentamente hasta que ocurre la falla, en cuyo momento se miden las contracciones de la anchura justamente debajo de la muesca, el porcentaje de fractura fibrosa y el ángulo de dobléz a carga máxima. La temperatura de transición de ductilidad usualmente se define como el punto en el cual se obtiene una contracción lateral del 1% gratificando contracción lateral contra la temperatura. .. Como en el espécimen Charpy, la transición de la apariencia de la fractura se define como una temperatura correspondiente a temperatura de cizallamiento del 50%.

Prueba De Rotura De La Armada (Kahn). El espécimen se corta a flama de una placa entera y se máquina de la manera que se ilustra en la figura 19. En realidad solamente el borde opuesto a la muesca es una superficie maquinada. El espécimen se apoya sobre los agujeros para pasadores que están montados sobre grilletes. En esta prueba, se sujeta una serie de especímenes a carga de tensión lenta a varias temperaturas. La medición se hace a carga máxima de energía necesaria para iniciar la fractura y la entrada necesaria para terminar la fractura. La temperatura de transición es la temperatura correspondiente a la fractura de cizallamiento del 50% o el punto de cambio abrupto de energía en el que se inicia la .. ruptura después de la fractura inicial.

Correlación. Aunque se usan especímenes de prueba de flexión lenta para medir la tenacidad de muesca a temperatura de transición, difieren notablemente en cuanto a la severidad de la muesca, velocidad de deformación y tamaño. La correlación de los resultados de la prueba obtenidos con varios especímenes es diferente, puesto que la misma propiedad del acero no se puede medir en cada prueba. Las mediciones de energía derivadas de un tipo de espécimen no se deben comparar con mediciones derivadas con un segundo espécimen o con la aparición de fractura de un tercer espécimen. Cuando se busca una relación entre diferentes métodos de prueba, la aparición de la fractura ha resultado ser el mejor criterio. Sin embargo, la tenacidad de muesca de dos aceros se debe comparar solamente si se usa el mismo tipo de espécimen y de criterio. Los resultados de la prueba son relativos más bien que absolutos.

Prueba y Evaluación de Tenacidad de Fractura

Aquí se describen los detalles y se dan referencias respecto a una variedad de pruebas para determinar la tenacidad de fractura, tanto en situaciones de deformación de plano y en situaciones a las cuales no es aplicable la tenacidad de fractura por deformación de plano.

Prueba de Tenacidad de Fractura por Deformación de Plano. Actualmente se están llevando varios métodos para desarrollar procedimientos para evaluar la tenacidad en metales más dúctiles. Para materiales que tengan una alta resistencia y baja tenacidad en general, el parámetro de tenacidad por deformación de plano, K_{Ic} , es el más comúnmente determinado. ASTM E399-72 define K_{Ic} como la propiedad de tenacidad de materiales medida en términos del factor de intensidad de esfuerzo K_I , por un procedimiento especificado. El procedimiento se diseña para determinar la intensidad del esfuerzo al cual se inicia la propagación de la grieta inestable. De acuerdo con esta norma de ASTM, K_I es una medida de la intensidad del campo de esfuerzo cerca de la punta de una grieta ideal en un medio lineal-elástico cuando se deforma, de tal manera que las caras de la grieta se desplazan separándose normalmente al plano de la grieta (modalidad de abertura o de deformación de modalidad I) Como se ilustra en la figura 5. Actualmente no hay procedimientos estándar para medir la tenacidad de fractura con modalidad II de deformación (corte perpendicular a la punta de la grieta con deformación de plano o esfuerzo de plano) o III (corte paralelo a la punta de la grieta con condiciones de deformación antiplano). Para mediciones K_{Ic} , ASTM E399-72 describe procedimientos para usar especímenes como los mostrados en la figura 20. La región plástica de la punta de la grieta, es pequeña comparada con la longitud de la grieta en la dirección de estrechamiento. A partir de un registro de carga contra abertura de la grieta y a partir de relaciones previamente determinadas de configuración de grietas a intensidad de esfuerzo, la tenacidad de fractura por deformación de plano se puede medir con precisión siempre que se satisfagan todos los criterios para una prueba válida.

Usando el mismo tipo de relación que permite el cálculo de un valor K_{Ic} a partir de la carga requerida para iniciar la extensión de una grieta dada, es posible calcular la carga que iniciará la extensión de una grieta de una configuración diferente o para calcular el tamaño máximo de la grieta que podría estar presente sin introducir fractura en una parte bajo cierta carga. A partir de tales cálculos, es posible determinar cuán rigurosa debe ser la inspección, si se han de detectar todas las grietas que pudieran conducir a fractura.

Prueba de Rotura Dinámica. Muchos metales y aleaciones, especialmente a niveles de resistencia baja son demasiado tenaces y demasiado dúctiles para fracturarse. Bajo condiciones de deformación de plano en los tamaños usados normalmente en estructuras. Esta prueba se destina a evaluar metales y aleaciones dentro de un rango más amplio de tenacidad de fractura que permiten otras pruebas.

El espécimen estándar de la prueba de rotura dinámica (DT), dos cuyos tamaños se ilustran en la figura 21, es similar al espécimen Charpy, pero tienen mayor profundidad y tienen una muesca proporcionalmente más profunda, que se agudiza con un filo de cuchillo oprimido. El espécimen de prueba DT se rompe por impacto opuesto a la muesca de una manera similar al espécimen Charpy y la energía no absorbida se mide por la oscilación del péndulo, si se usa este tipo de máquina o por la deformación de placas de plomo o aluminio si se usa una máquina de peso descendente.

Prueba Instrumental de Impacto. Una modificación reciente de la prueba Charpy (y otras pruebas de impacto), o sea la prueba instrumentada de impacto utiliza un mazo con calibrador de deformación que golpea al espécimen de manera que se obtenga un registro de carga y energía contra tiempo, que correlaciona con flexión. A partir del registro de carga contra la deflexión, es posible determinar la porción elástica de la curva de deformación por esfuerzo, al principio de la extensión de la grieta, la energía para la iniciación de la grieta y la energía para la propagación de la grieta. Con el uso de la prueba instrumentada de impacto en los especímenes preagrietados, se pueden obtener los valores de K_{I_d} (donde d significa "dinámico") bajo las mismas restricciones y de una manera similar según se informa, a mucho menos costo de preparación de especímenes.



Figura 1. Superficie de fractura a aproximadamente $1\ 1/4\ X$ de la caja de un motor cohete de propulsor sólido de 260 pulgadas de diámetro, que se fracturó prematuramente durante la prueba hidrostática. - La fractura se originó en una falla semejante a la grieta (entre las flechas) que se produjo por la práctica de soldadura de reparación usando el proceso de arco sumergido. Los extremos de la falla brillante a la grieta (entre las flechas) que se produjo por la práctica de soldadura de reparación usando el proceso de arco sumergido. Los extremos de la falla brillante son oscuros debido a su ángulo desfavorable a la luz. Nótese el patrón de galón que apunta hacia el origen de la fractura desde ambos lados.

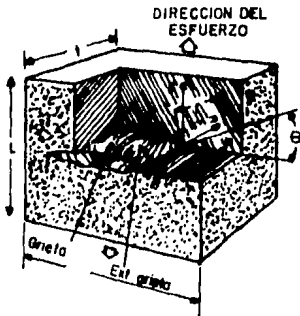


Figura 2. Ilustración esquemática de una grieta a todo el espesor.

x= Dirección perpendicular a la punta de la grieta y en el plano de la grieta.

y= Dirección perpendicular al plano de la grieta. La punta cerca de la punta de la grieta.

z= Dirección paralela a la punta de la grieta.

r= Distancia de la punta de la grieta del punto P.

θ = Ángulo entre el plano de la grieta y una línea del punto P a la punta de la grieta.

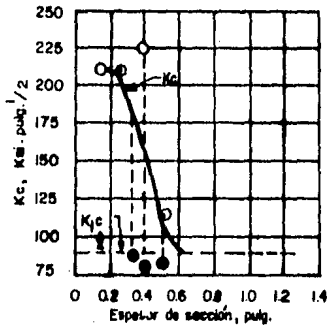


Figura 3. Efecto del espesor de sección de especímenes de tenacidad de fractura de acero al 18% Ni fundido en vacío (300 Ksi de resistencia mínima a punto cedente) sobre valores medidos de factor de intensidad de esfuerzo crítico K_{Ic} .

○ Concentración de esfuerzo, K_c

● Concentración de esfuerzo, K_{1c}

△ Agrietamiento superficial, K_{2c}

▲ Muesca circunferencial, K_{3c}

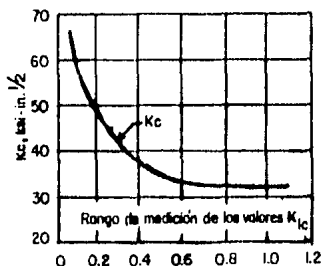


Figura 4. Efecto del espesor de sección de especímenes con muesca central - preagrietado por fatiga, la aleación de aluminio 7075 - T6 en hoja y 7075 - T651 en placa sobre valores medidos de factor de intensidad de esfuerzo crítico - K_{Ic} . A espesores superiores a 0.6 pulgadas aproximadamente, el valor cae al factor de intensidad de esfuerzo por deformación de plano crítico, K_{Ic} .

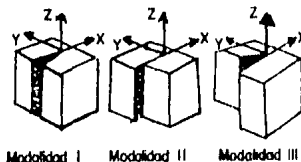


Figura 5. Modalidades de deformación de grieta. Modalidad I (modalidad de apertura). Esfuerzo de tensión en dirección y (perpendicular a las superficies de la grieta). Modalidad II (modalidad de deslizamiento de borde). Esfuerzo de cizallamiento en dirección X (paralelo a la punta de la grieta).

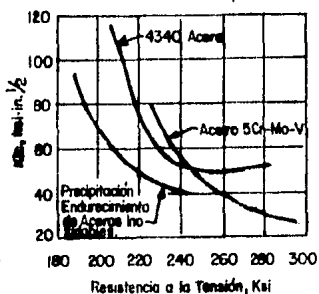


Figura 6. Variación de tenacidad de fractura por deformación de plano, K_{Ic} , con resistencia a la tensión de tres aceros.

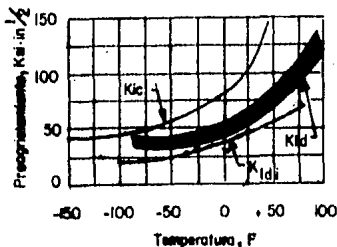


Figura 7. Comparación de tenacidad de fractura de impacto estático (K_{Ic}), dinámico (K_{Id}) e instrumento dinámico (K_{Id}) de especímenes preagrietados de acero ASTM A533 grado B, como función de temperatura de prueba. La velocidad de la intensidad de esfuerzo, K , era de 10^3 ksi. in /seg para las pruebas instrumentadas dinámicas.

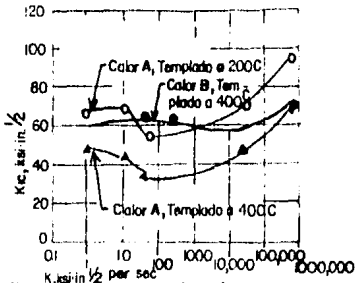


Figura 8. Efecto de la velocidad de intensidad de esfuerzo K , en la tenacidad de fractura por deformación de plano, K_{Ic} , de dos calores de acero de alta resistencia aleado 1Cr-0.2Ni-0.2Mo austenizado a 830°C, enfriado en aceite y templado como se indica.

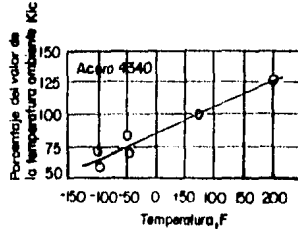


Figura 9. Efecto de la temperatura de prueba sobre la tenacidad de fractura por deformación de plano, K_{Ic} , de acero 4340 con resistencia a la tensión de 260 ksi a temperatura ambiente,

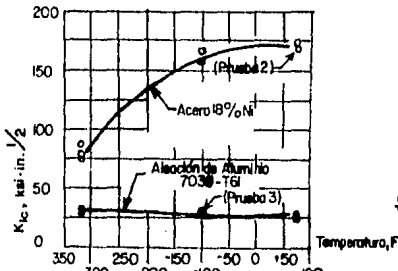


Figura 10. Efecto de la temperatura de prueba sobre la tenacidad de fractura por deformación de plano, K_{Ic} , de acero al 18%Ni (200 ksi.min resistencia a punto caliente) y aleación de aluminio 7039-T61.

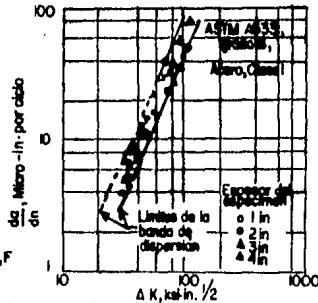


Figura 11. Velocidad de crecimiento de grieta por fatiga, da/dN como función de límite de factor de intensidad de esfuerzo, ΔK para una placa de acero de recipiente a presión ASTM A533, grado B, clase 1. Los datos se obtuvieron en aire a temperatura ambiente usando carga de apertura de cuña tipo T.

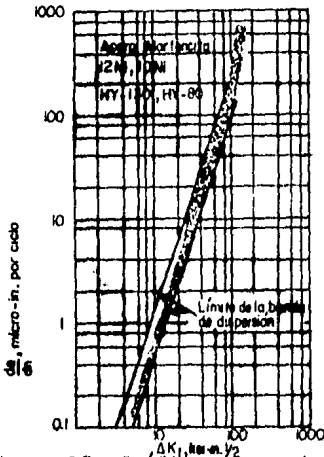


Figura 12. Gráfica compuesta de velocidad de crecimiento de grieta por fatiga, da/dN , contra gamma de factor de intensidad de esfuerzo K , para cuatro aceros martensíticos de alta resistencia (12Ni, 10Ni, HY-130, HY-80) los datos (banda sombreada) se obtuvieron en 280 pruebas en aire a temperatura ambiente usando carga de apertura de cuña tipo T de una pulgada de ancho.

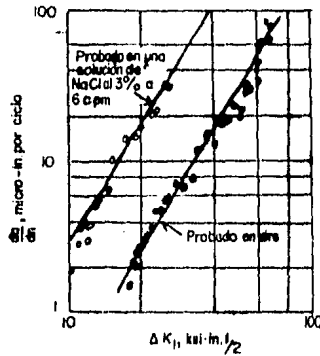


Figura 13. Comparación de datos de velocidad de crecimiento de grieta por fatiga de corrosión en una solución de cloruro de sodio del 3% con velocidad de crecimiento de grieta por fatiga obtenida en aire para aceros 4340 tratado térmicamente a una resistencia a punto cedente de 180 Ksi. El umbral de agrietamiento de corrosión por esfuerzo, K de este acero en cloruro de sodio al 3% es 26.0 Ksi.in.

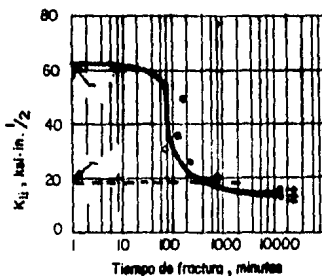


Figura 14. Curva de tiempo hasta la fractura por agrietamiento de corrosión de esfuerzo contra factor de intensidad de esfuerzo inicial, K .

Los datos son para un acero Ni-Cr-Mo-V experimental con una resistencia a la tensión de 298,000 Psi probado en una solución NaCl -

al 3.5%. Las flechas indican que tres de las pruebas fueron detenidas antes de la fractura. La tenacidad de fractura de deformación de plano, K_{Ic} , del acero es 61.3 Ksi. in^{3/2}; el umbral de agrietamiento de corrosión por esfuerzo, K_{Isc} , es 18.0 Ksi. in^{3/2}.

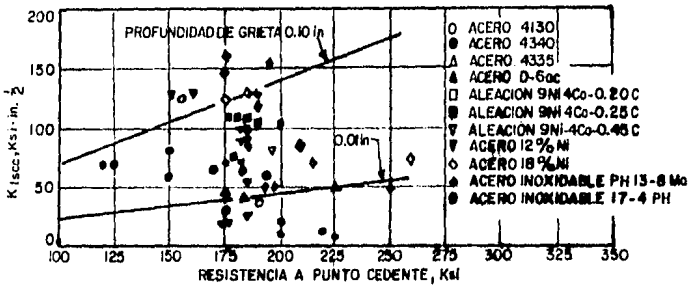


Figura 15. Umbral de agrietamiento de corrosión por esfuerzo, K_{Isc} , como función de la resistencia de punto cedente, para los aceros comerciales probados en agua salada. También se grafican líneas calculadas para especímenes bajo tensión que contienen grietas de superficie de dos valores supuestos de profundidad.

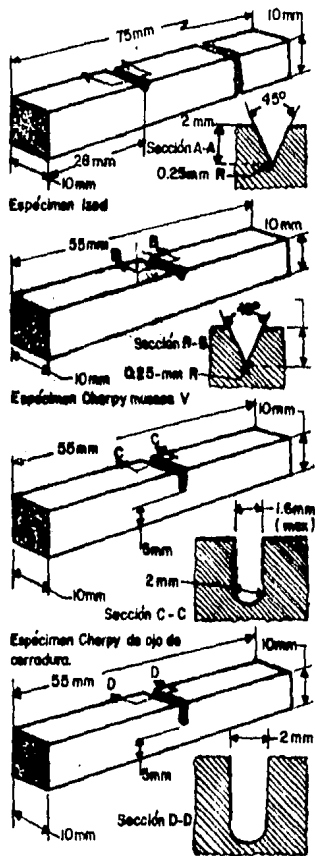


Figura 16. Detalles dimensionales de especímenes de prueba Izod y Charpy más comúnmente usados para la evaluación de tenacidad de muesca.

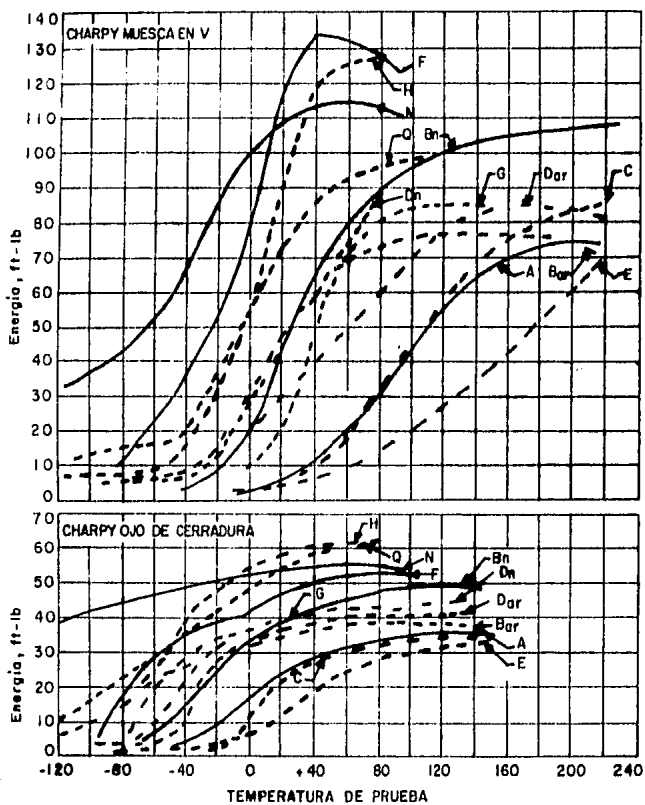


Figura 17. Comparación de curvas de temperatura de energía obtenidas mediante pruebas de muesca V Charpy y de ojo de llave de los mismos doce aceros. (véase tabla - página siguiente).

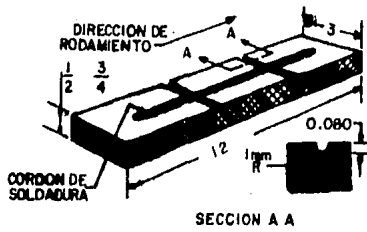


Figura 18. Especimen de prueba de flexión lenta, con muesca con cordón de soldadura longitudinal (especimen de prueba Lehigh).

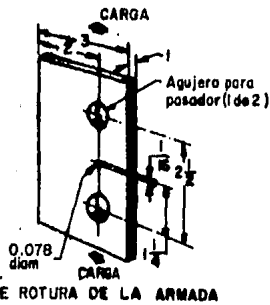


Figura 19. Especimen de prueba de rotura de la armadura o Khan utilizado al espesor total de la placa, t.

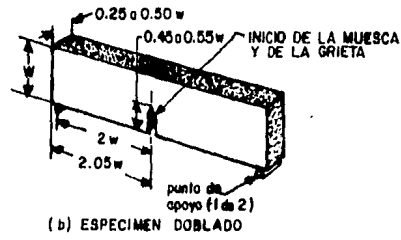
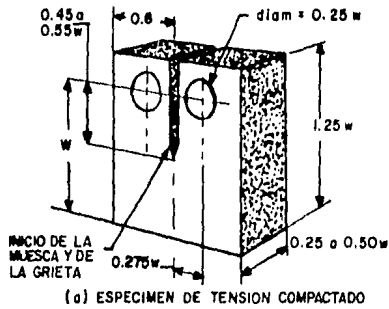


Figura 20. Dos espécimenes estandar para determinar la tenacidad de fractura por deformación de plano.

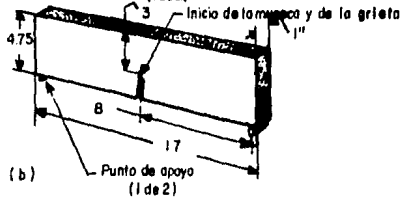
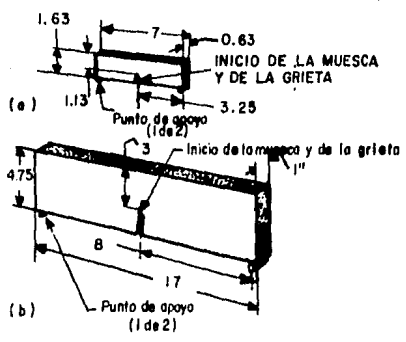


Figura 21. Dos tamaños de espécimen estandar para la prueba de rotura dinámica - NRL estandarizada.

CAPITULO IV

FALLAS POR FATIGA

FALLAS POR FATIGA.

La fatiga es el cambio estructural permanente localizada progresivo que ocurre en un material sujeto a deformaciones repetidas ó fluctuantes a esfuerzos que tienen un valor máximo interior que la resistencia a la tensión del material. La fatiga puede culminar en grietas ó fracturas después de un número suficiente de fluctuaciones.

Las fracturas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzo cíclico, esfuerzo de tensión y deformación plástica. Si no está presente cualquiera de éstos, no se iniciará y propagará el agrietamiento por fatiga. El esfuerzo cíclico produce crecimiento de la grieta (propagación) Aunque el esfuerzo compresivo no causa fatiga las cargas compresivas sí pueden causarla.

El proceso de fatiga se puede considerar que consiste de tres etapas:

1. Daño inicial por fatiga que conduce a la iniciación de la grieta.
2. Propagación de la grieta hasta la sección transversal no agrietada restante de una pieza se vuelve demasiado débil para soportar las cargas impuestas.
3. Fractura final repentina de la sección transversal restante.

PREDICION DE LA FATIGA

En la práctica es complicada la predicción de la fatiga de un material porque, salvo en algunos materiales relativamente frágiles, la fatiga es muy sensible a cambios pequeños de las condiciones de la carga, esfuerzos locales y características locales del material. Debido a que es difícil considerar estos cambios menores en las técnicas de predicción de esfuerzo dinámico ó en criterios de falla por fatiga hay mucha incertidumbre inherente en predicciones analíticas de la fatiga. Aunque las pruebas de fatiga de laboratorio realizadas en muchos especímenes no son suficientes para establecer con precisión la fatiga de una pieza, es útil examinar estos datos porque las pruebas de laboratorio (a) son la mayor fuente de criterio de falla por fatiga, (b) aislan las variables de carga involucradas en la fatiga, (c) son útiles para clasificar los materiales en términos de su resistencia relativa a la fatiga y (d) se pueden usar para establecer la importancia relativa de tales aspectos como método de fabricación, acabado de superficie, tratamiento térmico, técnica de ensamble y ambiente para la fatiga.

En general la fatiga se puede esperar que dependa de lo siguiente:

1. Tipo de carga (uniaxial, flexión, torsional).
2. Forma de la curva de carga.
3. Frecuencia del ciclo de carga.
4. Patrón de carga (Carga periódica a amplitud constante ó variable, carga programada ó carga aleatoria).
5. Magnitud de esfuerzos.
6. Tamaño de la pieza.
7. Métodos de fabricación y aspereza de la pieza.
8. Temperatura de funcionamiento.
9. Atmósfera de funcionamiento.

Tradicionalmente, la duración de fatiga se ha expresado como el número total de ciclos de esfuerzo para que se inicie una grieta y luego crezca suficientemente para producir falla catastrófica (separación de espécimen en dos pedazos).

Los datos de fatiga también se pueden expresar en términos de velocidad de crecimiento de fatiga. Las grietas se desarrollan temporalmente en el término de la fatiga del material y crece continuamente hasta que ocurre la falla catastrófica.

CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA FATIGA

La mayor parte de las pruebas de fatiga de laboratorio se hacen ya sea con carga axial uniforme, produciendo así solamente esfuerzos de tensión y compresión. Usualmente el esfuerzo se aplica en ciclos, ya sea entre un esfuerzo de tensión máximo y mínimo ó entre un esfuerzo de tensión máximo y un esfuerzo compresivo máximo. El último se considera un esfuerzo de tensión negativo, se le da un signo algebraico menos y por lo tanto se denomina esfuerzo mínimo.

Relación de Esfuerzo. La relación algebraica de dos valores de esfuerzo especificado en un ciclo de esfuerzo se denomina relación de esfuerzo. Dos relaciones de esfuerzo usadas comúnmente son; la relación A de la amplitud de esfuerzo alternante al esfuerzo medio ($A = S_a/S_m$); y la relación R, del esfuerzo mínimo al máximo esfuerzo ($R = S_{min}/S_{max}$). Si los esfuerzos se invierten totalmente, la relación de esfuerzo R, se vuelve -1; si los esfuerzos se invierten parcialmente, R se vuelve un número negativo menor que 1. Si el ciclo del esfuerzo es entre un esfuerzo máximo y cero carga, la relación de esfuerzo R, se vuelve cero. Si el ciclo del esfuer

Para los esfuerzos de tensión, la relación de esfuerzo R se vuelve un número positivo inferior a 1. Una relación de esfuerzo R de 1 significaría cero variación en esfuerzo y la prueba sería una prueba de deslizamiento de carga sostenida en lugar de una prueba de fatiga.

Esfuerzos Aplicados. Algunas veces se usan tres descripciones de los esfuerzos aplicados. El esfuerzo medio, S_m , es el promedio algebraico de los esfuerzos máximo y mínimo en un ciclo, $S_m = (S_{max} + S_{min})/2$. En la prueba invertida completamente, el esfuerzo medio es cero. La gama del esfuerzo S_r , es la diferencia algebraica entre los esfuerzos máximo y mínimo en un ciclo, $S_r = S_{max} - S_{min}$. La amplitud de esfuerzo, S_a , es la mitad de la gama de esfuerzo, $S_a = S_r/2 = (S_{max} - S_{min})/2$.

Durante una prueba de fatiga, el ciclo de esfuerzo usualmente se mantiene constante, de manera que las condiciones del esfuerzo aplicado se pueden escribir $S_m \pm S_a$, donde S_m es el esfuerzo estático ó medio y S_a es el esfuerzo alternante, igual a la mitad de la gama del esfuerzo. El signo positivo se usa para denotar un esfuerzo de tensión; y el signo negativo, un esfuerzo compresivo. Algunas de las combinaciones posibles de S_m y S_a se ilustran en la figura 1. Cuando $S_m = 0$ (figura 1 a) el esfuerzo de tensión máximo es igual al esfuerzo compresivo máximo: este se llama un esfuerzo alternante ó un esfuerzo completamente invertido. Cuando $S_m = S_a$ (figura 1 b), el esfuerzo mínimo del ciclo es cero; este se denomina un esfuerzo de tensión pulsante ó repetitivo (ó compresivo). Cualquiera otra combinación se conoce como esfuerzo fluctuante el cual puede ser un esfuerzo de tensión fluctuante (figura 1 c) ó un esfuerzo compresivo fluctuante, ó puede fluctuar entre un valor de tensión y un valor compresivo (figura 1 d).

Curvas S-N. Los resultados de las pruebas de fatiga usualmente se grafican como esfuerzo máximo ó amplitud de esfuerzo con respecto al número de ciclos, N , para la fractura usando una escala logarítmica para el número de ciclos. El esfuerzo se grafica ya sea sobre una escala lineal ó logarítmica, la curva resultante de puntos de datos se denomina curva S-N. En la figura 2 se muestran tres curvas típicas S-N. Las dos curvas para acero 3340 son típicas para aceros. Usualmente, una curva S-N representa la duración media para un esfuerzo dado, la duración que alcanza la mitad de los especímenes o la sobrepasa y la mitad dejan de alcanzar. Las duraciones de dispersión o fatiga pueden cubrir una gama muy amplia.

Límite de Fatiga y Resistencia a la Fatiga. La porción horizontal de una curva S-N representa el máximo esfuerzo

que el metal puede soportar por un número infinitamente grande de ciclos con probabilidad de falla del 50% y se denomina límite de fatiga (aguante), Sf.

La mayoría de los metales no ferrosos no exhiben un límite de fatiga. En cambio, sus curvas S-N continúan cayendo a velocidad lenta a altos números de ciclos, tal como se muestra en la curva para aleación de aluminio 7075-T6, en la fig. 2. Para estos metales, en lugar de reportar el límite de fatiga, es necesario reportar la resistencia a la fatiga, que es el esfuerzo al cual el metal se puede sujetar para un número especificado de ciclos. No hay número de ciclos estándar, por lo cual es necesario que cada tabla de resistencias a la fatiga especifique el número de ciclos para los cuales se reporten las resistencias.

Factor de Concentración de Esfuerzo. El esfuerzo se concentra en un metal por discontinuidades estructurales, tales como muescas, agujeros ó rasguños, que actúan como elevadores de esfuerzos. El factor de concentración de esfuerzo, K_t es respecto al esfuerzo nominal correspondiente. Para la determinación de K_t , el mayor esfuerzo en la región de la muestra se calcula según la teoría de elasticidad, ó se derivan valores equivalentes experimentalmente. Un factor de concentración de esfuerzo experimental es una relación de esfuerzo en un espécimen con muesca, con respecto a un espécimen sin muesca.

Factor de Muesca de Fatiga. El factor de muesca de fatiga, K_f , es la relación de la resistencia a la fatiga de un espécimen sin muesca, con respecto a la resistencia a la fatiga de un espécimen con muesca al mismo número de ciclos. El factor de muesca de fatiga varía según la posición sobre la curva S-N y según el esfuerzo de cizallamiento medio. A altos niveles de esfuerzo y ciclos breves, el factor es generalmente menor que a niveles de esfuerzos bajos y ciclos largos.

Sensibilidad de Muesca de Fatiga, q. Esta se determina comparando el factor de muesca de fatiga, K_f , y el factor de concentración de esfuerzo, K_t para un espécimen de un tamaño dado que contiene una concentración de esfuerzo de una forma y tamaño dados.

Una definición común de sensibilidad de muesca a la fatiga es $q = (K_f - 1) / (K_t - 1)$ en la cual q puede variar entre cero (donde $K_f = 1$) y 1 (donde $K_f = K_t$). Este valor puede expresarse como un porcentaje. Al variar el factor de muesca a la fatiga según la posición de la curva S-N, así variará la sensibilidad de la muesca.

ETAPAS DE FRACTURA A PARTIR DE LA FATIGA

La superficie de fractura que resulta de la falla por fractura tiene una apariencia característica que se puede dividir en tres zonas o etapas progresivas de fractura.

La etapa I, es la iniciación de grietas y su propagación por fractura de plano de deslizamiento, que se extiende hacia el interior a partir de la superficie a aproximadamente 45° con respecto al eje de esfuerzo. Una fractura de etapa I nunca se extiende más allá de dos a cinco granos alrededor del origen. En cada grano la superficie de fractura está a lo largo de un plano cristalográfico bien definido, el cual no se debe confundir con un plano de hendidura aunque tenga la misma apariencia frágil. Usualmente no hay estrías por fatiga asociadas con una superficie de fractura de etapa I. En algunos casos (dependiendo del material, ambiente y nivel de esfuerzo), puede no ser discernible una fractura de etapa I.

Etapa II. La transición de la etapa I a la etapa II es el cambio de orientación del plano de fractura principal en cada grano de uno a dos planos de cizallamiento a muchas mesetas paralelas separadas por riscos longitudinales. Las mesetas usualmente son normales con respecto a la dirección del esfuerzo de tensión máximo.

La etapa III, ocurre durante el último ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal no es capaz de soportar la carga aplicada. La fractura final que es el resultado de una sola sobrecarga, puede ser frágil o dúctil o una combinación de las dos.

CARACTERISTICAS DE LA FRACTURA REVELADAS POR MACROSCOPIA

Marcas de Playa. Lo más característico que se encuentra en la superficie de la fractura por fatiga, son las marcas de playa, que se encuentran alrededor de un punto común que corresponde al origen de la grieta por fatiga. Llamadas también marcas de almeja y de concha, las marcas de playa son quizá la característica más importante para identificar las fallas por fatiga. Las marcas de playa pueden ocurrir como resultados de cambios de carga o frecuencia o por oxidación de la superficie de fractura durante períodos de detención de la grieta por servicio intermitente de la pieza o componente.

Zona de Fractura Final. La zona de fractura final de una superficie de fractura por fatiga frecuentemente es fi-

brosa, asemejando las superficies de fractura de especímenes de prueba de tenacidad de impacto o fractura del mismo material. El tamaño de la zona de fractura final depende de las cargas y su forma depende de la forma, tamaño y dirección de la carga de la pieza calculada. En materiales tenaces con secciones gruesas o redondas, la zona de fractura final consistirá de una fractura por dos modos distintos: (a) fractura por tensión (modalidad de deformación de plano) extendiéndose desde la zona de fatiga y en el mismo plano, y (b) fractura de cizallamiento (modalidad de esfuerzo de plano) a 45° con respecto a la superficie de la pieza que bordea la fractura por tensión. Estas dos modalidades se ilustran en la superficie de fractura por fatiga a través de una sección gruesa mostrada en la fig. 3. Dos características en la zona de fractura final que ayudan a determinar el origen de la fractura son: (a) la fatiga usualmente se origina en la superficie y por lo tanto el origen de la fatiga no está incluida en la fractura del labio de cizallamiento; y (b) la presencia de marcas de galón características en la fractura por tensión que señalen al origen de la fractura.

En piezas de lámina metálica delgada que tiene suficiente tenacidad, la fractura final ocurre de manera un tanto diferente. Conforme la grieta se propaga desde la zona de fatiga, el plano de fractura gira alrededor de su eje en la dirección de la propagación de la grieta hasta que forma un ángulo y la superficie de la hoja.

El plano de fractura, inclinado 45° hacia la dirección de carga, puede ocurrir ya sea en un plano de cizallamiento único ó doble, como se ilustra en la figura 4.

CARACTERISTICAS DE LA FRACTURA REVELADAS POR LA MICROSCOPIA

Estrías. En el examen con microscopio electrónico de superficie de fractura por fatiga, las características más prominentes que se encuentran son retazos de marcas paralelas espaciadas finamente, llamadas estriaciones por fatiga. Estas están orientadas perpendicularmente hacia la dirección microscópica de la propagación de la grieta y, con carga uniforme, generalmente aumentan en espaciado conforme progresan a partir del origen de la fatiga. Cada estría es el resultado de un solo ciclo de esfuerzo (pero cada ciclo de esfuerzo no necesariamente produce una estría), y el espaciado de estría depende grandemente de el nivel de la carga aplicada. La claridad de las estrías depende de la ductilidad del material. Las estrías son más visibles a niveles de esfuerzos más altos que el límite de fatiga. Igualmente, son más visibles en materiales dúctiles. Así pues, los retazos de estrías

as por fatiga en aceros de alta resistencia son menos visibles que en una aleación de aluminio. Igualmente las estrías son más visibles a niveles altos de esfuerzos del límite de fatiga.

A altas velocidades de crecimiento de grieta (10-4 pulgadas por ciclo o más), las estrías se vuelven onduladas y crean un frente áspero. Existe una gran zona plástica frente a la grieta que puede causar extenso agrietamiento secundario. Cada grieta secundaria se propaga como grieta por fatiga, creando un sistema de estrías secundarias. La dirección de la grieta local puede diferir notablemente de la dirección general de propagación debido a los muchos cambios de dirección de la trayectoria de la fractura local.

AGRIETAMIENTO POR FATIGA

El agrietamiento por fatiga normalmente resulta de esfuerzos cíclicos que están bien por debajo de la resistencia elástica estática del material. En general, una grieta por fatiga se inicia en una región altamente esforzada de un componente sujeto a esfuerzos cíclicos de magnitud suficiente. La grieta se propaga bajo esfuerzo aplicado a través del material hasta que resulta la fractura total.

En la escala microscópica, la característica más importante del proceso de fatiga es la nucleación de una o más grietas bajo la influencia de esfuerzos invertidos que exceden el esfuerzo del flujo, seguido por el desarrollo de grietas a bandas de deslizamiento persistente o a límite de grano. Subsiguientemente, las grietas por fatiga se propagan mediante una serie de movimientos de apertura y cierre en la punta de la grieta que producen, dentro de los granos, estrías que son paralelas al frente de la grieta.

INICIACION DE LA GRIETA

Las grietas por fatiga se forman en el punto o puntos de máximo esfuerzo local y mínima resistencia local.

El patrón de esfuerzo local se determina por la forma de la pieza (incluyendo características locales tales como imperfecciones superficiales y metalúrgicas que concentran esfuerzos maceroscópicos) y por el tipo y magnitud de la carga. La resistencia se determina por el material mismo, incluso todas las discontinuidades, anisotropías y falta de homogeneidad presentes.

Las imperfecciones superficiales locales, tales como ras

guños, rebanadas y otros defectos de fabricación, son las fallas más obvias a las cuales se inician las grietas por fatiga.

Nucleación de Grieta. El agrietamiento se inicia también a límites de grano en materiales policristalinos, aún en ausencia de debilidad de límite de grano inherente: a altas velocidades de deformación, esto parece ser el sitio preferente para nucleación de la grieta. La nucleación en un límite de grano parece ser puramente un efecto geométrico, en tanto que la nucleación en un límite gemelo está asociada con deslizamiento activo en planos cristalográficos inmediatamente adyacentes y paralelos al límite de gemelos.

Relación con el Ambiente. Al observar ubicaciones de nucleación de grieta, se debe considerar la posibilidad de mecanismos relacionados con el ambiente, inclusive corrosión por picadura, agrietamiento de corrosión por esfuerzo y otros efectos de un ambiente hostil. En cualquier estructura que tenga uniones con algún movimiento relativo, el razonamiento proporciona un lugar para iniciar la fractura.

EFEECTO DEL TIPO DE CARGA Y FORMA DE LA PIEZA

La nucleación y crecimiento de una grieta por fatiga y las características de la superficie de la fractura se ven afectadas grandemente por la forma de la pieza y el tipo y magnitud de la carga ejercida sobre la pieza en servicio, así como por factores metalúrgicos y del ambiente.

Flexión Unidireccional. Una viga de sección transversal uniforme sujeta a flexión pura, fluctuante y unidireccional tiene un momento de flexión que es uniforme y a lo largo de la magnitud de la viga y el esfuerzo de fibra de tensión es igualmente uniforme a lo largo de la magnitud de la viga. Por lo tanto, una grieta por fatiga puede iniciarse en cualquier punto a lo largo de la viga: de hecho varias grietas por fatiga pueden haber estado activas antes de que una de ellas se hiciera suficientemente grande para causar la fractura final.

Flexión Alternante. Si la carga de una viga es alternante en lugar de fluctuante, las grietas por fatiga se pueden iniciar en ambos lados de la viga. En la flexión pura, las grietas en los lados opuestos de la viga no están necesariamente en el mismo plano; por lo tanto, la fractura final puede ocurrir a algún otro ángulo que no sea de 90° con respecto al eje de la viga. Si se aplica la misma carga a la viga en ambas direcciones las dos grietas por fatiga deben ser simetri

métricas. El tamaño de la zona de fractura final es indicativa tanto entre la aparición de la grieta por fatiga formada bajo carga fluctuante y las formadas bajo carga alternante. Con una carga alternante, cada grieta se abre en un medio ciclo, lo cual frota y pule los puntos altos de los lados opuestos de la grieta por fatiga. El frotamiento es menos pronunciado bajo carga fluctuante. En consecuencia las marcas de playa son más observables, después de la carga alternante que después de la carga fluctuante.

Flexión Rotacional. Un componente de máquina que comúnmente está sujeto a carga de flexión, es una flecha redonda giratoria. Una característica única de la carga de flexión rotacional es el que durante una revolución de la flecha se ejerce carga tanto máxima como mínima alrededor de toda la circunferencia de la flecha en la región del momento de flexión máximo.

Debido a que la carga es axialmente simétrica, se puede iniciar una grieta por fatiga en cualquier punto o en varios puntos alrededor de la periferia de la flecha, las grietas, múltiples no ocurren necesariamente en el mismo plano y están separados una de otra por bordes llamados marcas de marca. La presencia de grietas múltiples normalmente indica una carga aplicada relativamente alta y flexión rotacional. Bajo sobrecargas bajas o moderadas una flecha giratoria puede fallar como resultado de una sola grieta por fatiga. Cuando la flecha se gira siempre en la misma dirección, usualmente la grieta avanza asimétricamente es decir, el centro aparente del área de marcas de playa se desplaza en dirección opuesta a la rotación de la flecha. El crecimiento de la grieta por fatiga asimétrico, es indicativo de flexión rotacional y de la dirección de rotación.

Carga Torsional. Bajo carga torsional de una flecha los esfuerzos de tensión locales máximos está a 45° de eje de la flecha, bajo una carga torsional fluctuante, las grietas por fatiga pueden desarrollarse normalmente a los esfuerzos de tensión. Bajo carga torsional alternante (invertida) ($S_m=0$, $R=-1$), se puede generar dos juegos de grietas por fatiga, perpendiculares entre sí. Las grietas por fatiga torsional puede iniciar un cizallamiento transversal (fig. 4b); la longitud relativamente igual de las grietas indica que han ocurrido esfuerzos iguales y opuestos durante la carga. En etapas posteriores del crecimiento de la grieta por fatiga, una grieta de un par usualmente crece mucho más rápido que la otra y finalmente causa ruptura de la flecha.

Carga Axial. En la carga axial pura de una viga simple-uniforme, el esfuerzo es constante a través de la sección.

transversal de la viga y se puede iniciar una grieta por fatiga en una discontinuidad dentro del miembro mas bien que en la superficie. La apariencia de grietas por fatiga causadas por cargas de tensión fluctuantes frecuentemente es similar a la descrita para cargas de flexión. Los estados de esfuerzo dentro de vigas sujetas a los dos tipos de carga son similares, aunque raramente se encuentra en servicio carga puramente axial.

EFFECTO DE SOBRESFUERZO Y CONCENTRACION DE ESFUERZO

La magnitud del esfuerzo nominal sobre un componente cargado cíclicamente frecuentemente se mide por la cantidad de sobreesfuerzo, es decir, la cantidad por la cual el esfuerzo nominal excede el límite de fatiga o la resistencia de fatiga de larga duración del material usado en el componente. El número de ciclos de carga que puede soportar un componente bajo sobreesfuerzo bajo es alto; de ahí que frecuentemente se aplique el término fatiga de altos ciclos. El incremento de la magnitud del esfuerzo nominal tiene los siguientes efectos: - (a) la iniciación de grietas múltiples es más probable; (b) se incrementa el espacio de las estrías; y (c) la región de la fractura rápida final aumenta de tamaño.

Con sobreesfuerzos muy altos, se producen fracturas por fatiga de bajo ciclo.

Concentración de Esfuerzo. Las muescas, canales, agujeros, filetes, cuñeros y ranuras, son características de diseños comunes. Todas esas discontinuidades seccionales incrementan el nivel de esfuerzo local arriba del calculado sobre la base del área seccional transversal mínima. Además de la reducción de la resistencia a la fatiga o duración de la fatiga, el incrementar la severidad de la concentración del esfuerzo tiene los siguientes efectos sobre las características de grieta por fatiga: (a) la iniciación de grietas múltiples es muy probable; (b) las marcas de playa usualmente se vuelven convexas hacia el punto del origen de la grieta; (c) bajo carga rotacional, las marcas de playa pueden rodear por completo la zona de fractura final; y (d) se puede introducir estados de esfuerzo combinados; influyendo por consiguiente la dirección del crecimiento de la grieta.

La fig. 5 muestra esquemáticamente como la magnitud del esfuerzo nominal, la severidad de la concentración del esfuerzo y el tipo de carga afectan la apariencia de la superficie de la fractura por fatiga de componentes con secciones transversales redondas, cuadradas y rectangulares y de las placas gruesas.

Se encontrarán desviaciones con respecto a esta tabla para varios materiales, pruebas y condiciones de servicio. La fig. 5 se basa en los siguientes principios:

- 1.- Conforme incrementa el esfuerzo local en regiones de iniciación potencial de grieta, igualmente aumenta el número de núcleos de grietas activos ó sitios de iniciación; por consiguiente a sobreesfuerzos altos ó en presencia de una concentración de esfuerzo severo se verán orígenes múltiples de grietas. En la mayoría de los casos las grietas de estos orígenes se unirán finalmente para formar un solo frente de grieta. Antes de que se forme tal frente, las microgrietas individuales serán separadas por resaltos pequeños verticales, llamados marcas de matraca. Alternamente, justamente arriba del límite de fatiga ó mínimo esfuerzo para fractura, ocurrirá un origen único y toda fractura emanará de ese punto.
- 2.- En ausencia de concentraciones de esfuerzo en la superficie, las grietas se prolongan más rápidamente cerca del centro de una sección distinta a la superficie. Esto ocurre porque el constreñimiento de la deformación ocasiona que los esfuerzos sean triaxiales y más severos lejos de la superficie. Sin embargo -- cuando hay una muesca de concentración de esfuerzo en la superficie, (tal como una rosca de raíz aguda) el esfuerzo próximo a esta muesca puede ser más severo que si está más lejos debajo de la superficie. En condiciones de muesca severa, se observará algunas veces grietas en forma de W.
- 3.- Para un material dado, el tamaño de la región de fractura catastrófica (o fractura rápida final) relativo al tamaño de la región de propagación de grieta subcrítica aumentará como aumente el esfuerzo nominal. Bajo una sobrecarga que sea ligeramente más que suficiente para causar fractura, la región de fractura rápida final será relativamente pequeña. Bajo un esfuerzo aplicado mucho más alto, la región será relativamente grande.
- 4.- En una fractura causada por flexión, la región de la fractura final frecuentemente será girada ó desviada hacia el origen en una dirección opuesta a la de la dirección de rotación. Igualmente siendo todas las demás condiciones iguales la región de fractura final se moverá hacia el centro de la sección conforme aumenta el esfuerzo nominal.
- 5.- La iniciación de la fractura usualmente ocurre en la

superficie o cerca de ella, por que en la mayoría de las situaciones, de ingeniería tal como en flexión o cuando están presentes concentraciones de esfuerzo, la superficie está sujeta al mayor esfuerzo. Se han observado orígenes en la sub-superficie o en situaciones de esfuerzo hertziano, tal como fatiga por contacto de rodadura de baleros y dientes de engranes, si hay una gran inclusión o imperfección debajo de la superficie en el interior de espécimen o pieza pero esto no es usual. La iniciación de grietas en ángulos o extremos de barrenos perforados pueden resultar de la presencia de rebabas que quedan en estos puntos después del maquinado.

EFFECTOS DEL ESFUERZO SOBRE LA RESISTENCIA DE FATIGA

Las grietas por fatiga generalmente se forman preferentemente en la superficie porque el nivel del esfuerzo generalmente es más alto en la superficie. Los resultados experimentalmente indican que la fatiga no implica ataque corrosivo o activación térmica, aunque ambos pueden contribuir a la fractura final.

Esfuerzo Residual. Las Fracturas por fatiga generalmente se propagan a partir de la superficie. Las operaciones de procesamiento, tales como esmerilado, pulido y maquinado, que producen o aumentan al esfuerzo residual en la superficie pueden influir en la resistencia de fatiga, aunque no hay formulación generalizada que prediga el grado de resistencia de fatiga mejorada que pueda derivarse de endurecimiento de trabajo y esfuerzo residual. Los esfuerzos superficiales residuales compresivos generalmente incrementan la resistencia de fatiga, pero los esfuerzos superficiales residuales de tensión, no. Puede haber una disminución gradual en el esfuerzo residual si los esfuerzos cíclicos causan deformación plástica. El esfuerzo superficial residual compresivo proporciona mayor mejoramiento en la resistencia de fatiga de materiales más duros (como aceros de soportes de aleación) y en materiales más suaves (como el acero de bajo carbón), el endurecimiento en el trabajo mejora efectivamente la resistencia de la fatiga. Esto es porque el material más duro puede soportar un nivel alto de esfuerzo superficial elástico residual y la resistencia de tensión y por ello el límite de fatiga del material más suave se mejora por endurecimiento de trabajo.

En un acero de alta resistencia con muesca, el efecto benéfico de preestiramiento y el efecto atrimetal de precompresión son mucho mayores que en el acero al carbón simple debido al tipo de esfuerzo residual presente en la muesca.

Un esfuerzo residual compresivo introducido durante el enfriamiento por una temperatura de temple aumentará la resistencia a la fatiga, especialmente en especímenes con muesca.

En general los esfuerzos residuales son introducidos por (a) mal armado de piezas estructurales; (b) cambio en el volumen específico de un metal que acompaña cambios de fase; (c) un cambio en la forma seguido de deformación plástica; ó (d) esfuerzos térmicos resultantes de cambios rápidos de temperatura, como ocurre en el enfriamiento.

La influencia de esfuerzo residual sobre la resistencia de fatiga es, en principio, similar a la de un esfuerzo estático aplicado externamente. Un esfuerzo superficial compresivo estático aumenta la resistencia de fatiga y el esfuerzo superficial de tensión estático la reduce.

INFLUENCIA DEL DISEÑO EN LA RESISTENCIA DE FATIGA

El diseño mecánico y estructural comprende dos categorías: configuración y propiedades del material. La selección del material frecuentemente es incluida por requisitos distintos a las características de fatiga, tales como resistencia a la corrosión o a temperatura elevada. Independientemente de la propiedad que controle, el material usado es una pieza diseñada para resistencia a la fatiga debe poseer una combinación aceptable de muchas propiedades. No todos los diseños requieren necesariamente un valor para todas las propiedades posibles y los datos pueden no estar disponibles para todos los materiales, condiciones y formas específicas.

A continuación se desarrollan una serie de prácticas -- que al aplicarse con buen criterio de ingeniería se puede esperar que den por resultado una reducción importante en la probabilidad de falla por fatiga

Factores de Corrección para Datos de Prueba. Los datos de fatiga disponibles normalmente son para un tipo específico de carga, tamaño de espécimen y esperanza de superficie. Por ejemplo, la máquina Moore de viga rotatoria para prueba de fatiga usa un espécimen de 0.3 pulgadas de diámetro que está libre de cualquier concentración de esfuerzo debido a que está acabada a espejo y está sujeta a esfuerzos de flexión completamente revertidos. Los datos de duración de fatiga usados en cálculos de diseño son corregidos multiplicando el número de ciclos (duración), N_i' , determinado en una prueba de fatiga por tres factores que cuentan para la variación en el tipo de carga, diámetro de la pieza y aspereza de la pieza. Entonces la duración de diseño $N_i = K_1 K_d K_s N_i'$, donde K_1 es el factor de corrección para el tipo de carga, K_d para el diámetro de la pieza y K_s para la aspereza de la superficie.

Los valores de los tres factores para corregir los datos estándar de la prueba Moore sobre acero se dan en la fig. 6.

Interferencia en la Línea de Contacto. Dos guías de diseño pueden reducir al mínimo la interferencia en la línea de contacto entre las partes que embonan, son: (a) proporcionar filetes y radios generoso, y (b) diseñar partes para que su deformaciones residuales y de tensión de precarga sean más -- bajas. En algunos casos, radios y filetes generosos pueden -- causar interferencia si los radios del ángulo de las partes -- que embonan son demasiado pequeños. Por consiguiente, un radio de ángulo amplio daría por resultado una falta de coincidencia mínima en la instalación.

Diseño de Articulación. El método común para diseñar una estructura de miembros múltiples para resistencia a la fatiga es considerar los miembros como primeros en la importancia y las articulaciones como complicaciones inevitables.

De igual importancia es la forma de la pieza dentro de la articulación porque la forma puede transformar la carga externa en una modalidad diferente, causando posibles concentraciones de esfuerzos.

Uniones Soldadas. La resistencia a la fatiga de uniones bien soldadas, depende del estado de esfuerzo en la trayectoria de carga a través de la soldadura, el factor de concentración de esfuerzo al pie de la soldadura, la condición del material en la zona afectada por el calor y la presencia o ausencia de inclusiones y otros defectos de la soldadura. La resistencia a la fatiga, a duración razonables, de uniones -- soldadas en aceros de carbón y de baja aleación es independiente del acero usado.

La resistencia a la fatiga de uniones soldadas se pueden incrementar mediante trabajo en frío, porque esto inhibe el crecimiento de las grietas. El aligerar la carga después de la soldadura no tiene mucho efecto sobre la resistencia a la fatiga de tensión repetida, sino debilo al menor esfuerzo de tensión máxima en el ciclo de carga, puede aumentar los valores de cero de carga media.

Efecto de Condiciones del Material en la Resistencia a la Fatiga.

En la fractura por fatiga, la deformación plástica localizada es responsable de la propagación de grietas. La microestructura del material puede influir en el crecimiento de la grieta al inhibir, o modificar el proceso de deformación plástica. Algunas veces la naturaleza del proceso de agrietamiento

to de un proceso que implica la reformación plástica e otro- que implica hendiduras, es determinada en gran parte por la microestructura del material.

Tamaño del Grano. Bajo deformación cíclica alta (fatiga de bajos ciclos) la duración de fatiga de muchos metales es independiente del tamaño del grano. En contraste, bajo deformación cíclica baja (fatiga de altos ciclos) la duración de fatiga de muchos metales aumenta cuando se reduce el tamaño del grano. Sin embargo el efecto del tamaño del grano sobre las propiedades de fatiga de altos ciclos es difícil determinar porque estas propiedades pueden ser alteradas por los mismos tratamientos que alteran el tamaño del grano.

En algunas aleaciones, un mejoramiento de la resistencia a la fatiga de altos ciclos acarreada por una disminución en el tamaño del grano, puede ser anulada en parte por efecto deletéreo sobre otra propiedad. Por ejemplo, una disminución del tamaño del grano se considera que eleva el límite de fatiga de barra lisa en algunos aceros; sin embargo, el tamaño pequeño del grano aumenta la sensibilidad de muesca en estos aceros y entonces el resultado neto puede construir un mejoramiento en la resistencia a la fatiga de barra con muesca. Como otro ejemplo, el tamaño fino de grano en aleaciones de alta temperatura (que pueden estar sujetas tanto a fatiga como a deslizamiento) puede dar por resultado alta duración de fatiga pero baja duración de ruptura de esfuerzo a temperaturas normales de servicio y de este modo un grano de tamaño intermedio puede proporcionar la duración de servicio más larga.

Aleación. La influencia de la composición química sobre la resistencia a la fatiga es aproximadamente proporcional a la influencia sobre la resistencia a la tensión. El límite de fatiga del acero al carbón siempre aumenta según el contenido de carbón. El molibdeno, cromo, níquel, tiene un efecto similar.

El límite a la fatiga del acero de alta resistencia -- con resistencia a la tensión con una gama de 200,000 Psi, se puede aumentar mediante la adición de cobre, aunque el contenido de fósforo del acero generalmente se mantiene al mínimo para evitar aquebradización, los aceros con alto contenido de fósforo tiene mayor resistencia a la fatiga. Un contenido de azufre de 0.01% no tiene efectos sobre el límite de fatiga. Los aceros austeníticos que contienen níquel y cromo tienen un límite alto de fatiga, junto con baja sensibilidad de muesca y alta resistencia a la fatiga por corrosión.

La resistencia a la fatiga de aleaciones de titanio son más altas que las de acero. Algunas aleaciones de titanio -- mantienen considerable resistencia hasta 500 grados centígrados y tienen alta resistencia a la fatiga por corrosión. Aunque las aleaciones de titanio son especialmente susceptibles a la agrietación por hidrógeno, la presencia de hidrógeno no afecta las propiedades de fatiga.

Reforzamiento de Solución y Sólida. Las aleaciones, de aluminio que son reforzadas con solución y sólido, muestran un incremento a la resistencia a la fatiga aproximadamente al mismo grado que el incremento correspondiente de la resistencia a la tensión.

Si la resistencia de las aleaciones de magnesio se incrementa mediante la adición de solución la resistencia a la fatiga también se incrementa en proporción al incremento de la resistencia de la tensión.

Las segundas fases que frecuentemente están presentes -- en los sistemas metalúrgicos afectan la propagación de la grieta sobre la base de tres factores: (a) deformación de la losía causada por la presencia de la segunda fase. (b) la concentración de esfuerzo determinada por el tamaño, forma y distribución de la segunda fase; y (c) la naturaleza de la adhesión entre la segunda fase y la matriz.

Las segundas fases tienen una notable influencia sobre el mecanismo y la cinética de la nucleación de grietas y la propagación de las mismas porque pueden acelerar ó inhibir -- la velocidad de la propagación bajo varias circunstancias. Por ejemplo, las investigaciones sobre aleaciones de aluminio que contienen un gran número de partículas de segunda fase precipitada, intermetálica mostraron que las partículas -- obraban como elevadores de esfuerzo de lo cual se nuclearon las grietas por fatiga.

Los límites de grano de aleaciones endurecidas por envejecimiento están libres de partículas precipitadas y, como consecuencia, son relativamente suaves. De ahí que la relajación del esfuerzo ocurra a lo largo de los límites, resultando concentraciones de esfuerzo localizada y nucleación de -- grietas, en puntos triples del límite del grano.

La inestabilidad de partículas precipitadas coherentes -- se considera ser el factor más importante responsable de la duración baja de fatiga de las aleaciones de aluminio de alta resistencia. Los resultados experimentales indican que la reversión ocurre durante las etapas tempranas de la carga cíclica. La reversión bajo deformación cíclica involucra el --

paso de dislocaciones hacia atrás y hacia adelante a través de las partículas precipitadas, lo cual desintegra las partículas a tamaño subcrítico. El soluto vuelve entonces a solución o se distribuye a lo largo del sistema de dislocación, suavizando así las bandas de deslizamiento y provocando la nucleación de la grieta.

ENDURECIMIENTO DE TRABAJO

Las aleaciones Cu-Al (75 peso % Al) con endurecimiento de trabajo no se suavizan bajo esfuerzos cíclicos. Esto da por resultado velocidades más bajas de propagación de grieta en aleaciones con endurecimiento de trabajo, indicando por tanto una cantidad pequeña de deformación en la punta de la grieta durante la fatiga. Los resultados experimentales en latón alfa recocido y trabajado en frío, sugieren que una aleación con endurecimiento de trabajo es más dura en la punta de la grieta que una aleación recocida.

En las aleaciones que no son reforzadas por tratamiento térmico (algunas aleaciones de cobre, aleaciones de aluminio y aceros inoxidable), la resistencia a la fatiga se puede incrementar mediante trabajo en frío. Sin embargo no se tiene resistencia de fatiga mediante el trabajo en frío de aleaciones que son endurecidas por procesos de transformación (tales como aceros martensíticos) exhiben un menor grado de aleaciones no endurecibles.

TRATAMIENTO TERMICO

La resistencia a la fatiga generalmente se aumenta por cualquier tratamiento térmico que incrementa la resistencia a la tensión. En los aceros, una estructura martensita tiene las mejores propiedades de fatiga. La resistencia disminuida a la fatiga de las estructuras mixtas generalmente es el resultado de muescas metalúrgicas, tales como las formadas por perlita gruesa, ferrita libre, austenita retenida y segregación de carburo.

En aleaciones de cobre especialmente en aleaciones de cobre-zinc y cobre-estaño, la resistencia a la fatiga se puede mejorar con tratamiento térmico de solución. La resistencia a la fatiga de aleaciones de aluminio endurecibles por envejecimiento, también se pueden elevar mediante tratamiento térmico de solución; sin embargo, el envejecimiento subsecuente, que ocurre a temperatura ambiente en algunas aleaciones, no tiene más efecto benéfico y aún pueden disminuir la resistencia a la fatiga.

Efecto de las Discontinuidades en la Resistencia a la Fatiga.

Las discontinuidades dentro de un metal, ya sea en la superficie o subsuperficie, puede afectar la resistencia de la fatiga adversamente. Estas discontinuidades pueden originarse de prácticas de fusión ó trabajo primario o secundario del material ó pueden ser una característica de un sistema de aleación particular.

DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES

Todo metal forjado se sujeta a proceso termo-mecánico -- que da forma al metal mediante deformación plástica, generalmente laminado, martillado, compresión ó estirado.

El movimiento del metal durante estos procesos, ya sea que se realice a temperatura ambiente o temperaturas elevadas hace que dichos procesos sean fuentes comunes de discontinuidades superficiales, tales como solapaduras, costuras, o gotas frías. Pueden incrustarse óxidos, astillas u hojuelas del material de base o material extraño en la superficie al laminar o forjar.

Estas imperfecciones superficiales producen una muesca de severidad desconocida que obra como un elevador de esfuerzo bajo carga y afecta adversamente la resistencia a la fatiga y también puede servir como un sitio de iniciación de grietas durante la fabricación o en el servicio.

Las solapaduras y costuras son discontinuidades de la superficie que son causadas al doblarse el metal sin fusión. Usualmente están llenas de escamas y en componentes de acero, están encerradas por una capa de metal descarburizado.

La quemadura es el resultado de calentar un metal a una temperatura tan próxima a su punto de fusión como para causar un daño permanente al metal por oxidación intergranular ó fusión incipiente. El acero quemado usualmente contiene tanto películas de óxido como huecos y grietas los límites de grano que actúan como núcleos para el agrietamiento por fatiga. La quemadura ocurre con más frecuencia en la forja, ya sea durante el precalentamiento ó cuando la operación de la forja misma.

DISCONTINUIDAD DE LA SUBSUPERFICIE

Las discontinuidades de la subsuperficie y el núcleo se originan en el lingote fundido. Los huecos en los materiales fundidos originados por porosidad de gas, porosidad de contracción y relleno metálico inapropiado, son comunes. En lingotes que son calentados y luego reducidos en frío, la parte dominada por huecos se retira y desecha. Los huecos internos-

restantes normalmente se cierran con la soldadura por la temperatura y presión usada para reducir el lingote, lo cual da por resultado un producto continuo y homogéneo. Cuando la superficie de los huecos se oxidan o se contaminan en otra forma, las superficies opuestas no suelen entre sí y el defecto queda en el producto forjado.

Porosidad de Gas o Porosidad de Contracción. La porosidad de gas o agujeros de gas son cavidades redondas que son causadas por la generación o acumulación de burbujas de gas en el metal fundido al solidificarse éste. Las cavidades de concentración resultan de velocidades variables de contracción mientras el metal está cambiando del estado de fusión al sólido. La porosidad de contracción se caracteriza principalmente por agujeros dentados ó áreas esponjosas forradas con dentritas.

La resistencia a la fatiga de aleaciones fundidas se reduce sólo ligeramente por la presencia de porosidad de contracción o de gas, pero se reduce mucho más cuando la porosidad se extiende a la superficie independientemente de la severidad, debido al efecto de muesca.

Inclusiones. La presencia de inclusiones no metálicas en la superficie ó cerca de ella, es perjudicial porque actúan como elevadores de esfuerzo y forman puntos de iniciación de grietas por fatiga. Cuando mayor sea el número de discontinuidades mayor es la posibilidad de falla por fatiga. Sin embargo, parece haber un límite al número de inclusiones que podrán causar fatiga. Si las discontinuidades como escamas de grafito en el hierro colado o las inclusiones de sulfuro en acero de corte libre son muy numerosas, ocurre alivio de esfuerzo mutuo, sobre el principio de un surco único contra un cordón continuo, y el material tiende a volverse menos propenso a la fatiga.

Las inclusiones en las aleaciones ferrosas generalmente son óxidos, sulfuros y silicatos.

Las propiedades de fatiga de aleaciones de alta resistencia se degradan por inclusiones con un efecto más notable evidente en las propiedades de fatiga transversal de aleaciones forjadas que en las propiedades longitudinales. No obstante, en general el efecto de las inclusiones detiene de su tamaño y forma, su resistencia a la orientación con respecto al esfuerzo, así como a la resistencia a la tensión de la aleación. Los aceros suaves, por ejemplo, son mucho menos afectados por las inclusiones que los aceros duros.

SEGREGACION DE ALEACIONES

La distribución no homogénea de elementos de aleación en las aleaciones tratadas térmicamente es especialmente objeta ble, porque puede conducir a la formación de grietas térmicas causadas por contracción ó expansión no uniforme en el calen tamiento y enfriamiento.

Bandas. Cuando la segregación en una aleación ocurre en capas o bandas, la aleación se dice que tiene una estructura de bandas. Esto puede conducir a discontinuidades que a su vez pueden causar falla por fatiga prematura.

Las escamas son fisuras internas en metales ferrosos, atribuidas a esfuerzos producidos por transformación y solubi lidad decrecida y localizada de hidrógeno durante el enfria miento. después del trabajo en caliente.

En aleaciones de acero, las escamas frecuentemente están relacionadas con (a) contenido alto de hidrógeno.; (b) segre gación de elemento químico, que produce regiones de alto contenido de aleación y (c) enfriamiento rápido a partir de la temperatura de trabajo en caliente.

EFFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA.

La mayoría de los metales y aleaciones utilizados en com ponentes altamente esforzados, sufren alguna forma de trata miento para mejorar las propiedades.

El tratamiento térmico siempre involucra operaciones con troladas de calentamiento y enfriamiento. Pueden surgir imper fecciones durante el tratamiento térmico como resultados de temperatura o atmósferas de horno inadecuadas, velocidades inadecuadas o no uniformes de aplicación o retiro de calor y preparación incorrecta de superficies o formas antes del trata miento térmico. La resistencia a la fatiga de un componente se puede incrementar si la capa superficial se hace más resis tente a la fatiga. Esto se puede lograr mediante carburización, nitruración, o carbonitruración, siempre que el trata miento se ejecute adecuadamente para evitar discontinuidades es tructurales mayores, tales como estructuras reticulares de carburo (carburización), capa blanca excesiva (nitruración), gradiente insatisfactorio de carbón ó nitrógeno (carbonitruración) o grietas de enfriamiento.

Sobrecalentamiento. En el tratamiento térmico de meta les, las temperaturas altas generalmente causan que se desa rrollen granos grandes del metal y la aplicación, los granos

grandes pueden tener atributos no deseables. En la mayoría de los metales, los granos grandes reducen por lo general la resistencia a la fatiga. Las propiedades de los metales de grano grueso se deterioran por el tamaño de los granos y también por cambios que ocurren en los límites de grano, tales como la precipitación de impurezas sólidas, que pueden formar películas de límite de grano. El daño a partir del sobre calentamiento es particularmente evidente en el acero al alto carbón, en los cuales todos los efectos dañinos de los granos gruesos sobre las propiedades se combinan con una probabilidad incrementada de agrietamiento durante el enfriamiento de la temperatura de endurecimiento.

Fusión eutéctica. En las aleaciones de aluminio y otras endurecibles por envejecimiento, el tratamiento térmico de solución mejora las propiedades mecánicas al desarrollar la concentración máxima práctica de los componentes de endurecimiento en la solución sólida. Las solubilidades de estos componentes aumentan notablemente con la temperatura, especialmente justo abajo de la temperatura de fusión eutéctica. En consecuencia, la temperatura más favorable para aquélla a la cual ocurre la fusión. La fusión en aleaciones endurecibles por envejecimiento produce una redícula intergranular de producto eutéctico no dúctil y manchas circulares intergranulares ("rosetas") y ambas reducen la ductilidad y la resistencia a la fatiga. Se han observado efectos similares en aleaciones de alta temperatura, tales como las estelitas y en aceros de herramientas de alta velocidad.

Las grietas de enfriamiento son una causa frecuente de falla en piezas de acero endurecido. El origen de las grietas de enfriamiento en el acero se atribuye a cambios de volumen repentinos que ocurren en el endurecimiento. La transformación de austenita en martensita está acompañada siempre por expansión, lo cual en condiciones desfavorables, puede dar como resultado el agrietamiento. Las condiciones que fomentan la formación de grietas de enfriamiento de un medio de enfriamiento que sea demasiado severo, filos agudos y acabados ásperos y temperaturas de enfriamiento que sean demasiado altas. Algunas veces las grietas no aparecen inmediatamente, sino se retardan y pasa tiempo para que se hagan visibles. Las grietas de enfriamiento retardadas son el resultado de transformación adicional de austenita retenida en el acero. En aceros altamente aleados, se puede evitar el agrietamiento retardado templado inmediatamente después de enfriar.

Las grietas de enfriamiento son siempre intergranulares. Si una grieta de enfriamiento se abre a la superficie durante el temple, las paredes de la grieta pueden cubrirse con escamas y también pueden descarbonizarse.

La descarburización es una pérdida de carbón de la superficie de una aleación ferrosa, como resultado del calentamiento en un medio que reacciona con el en un medio que reacciona con el carbón. Salvo que se tomen precauciones especiales, el riesgo de perder carbón de la superficie del acero siempre está presente en todo calentamiento a altas temperaturas en una atmósfera oxidante. En acero con superficies de carburizadas se observa una notable reducción en la resistencia a la fatiga. El efecto de descarburización es mucho mayor en aceros de alta resistencia a la tensión que en aceros con baja resistencia a la tensión.

Influencia de las Prácticas de fabricación Sobre la Resistencia a la Fatiga

Las prácticas de fabricación influyen sobre la resistencia a la fatiga (a) afectando la resistencia de fatiga intrínseca del material próximo a la superficie, (b) introduciendo o removiendo esfuerzos residuos en las capas superficiales y (c) introduciendo o removiendo irregularidades en la superficie que actúan como elevadores de esfuerzo.

Maquinado. La mayoría de los componentes sujetos a condiciones de fatiga han sido maquinados. Los cortes extensos y marcas residuales de herramientas de maquinado basto pueden producir falla por fatiga en un componente.

Las irregularidades superficiales producidas por el maquinado rudo actúan como elevadores de esfuerzo. Sin embargo una serie de surcos paralelos, tales como los que resultan de operaciones de torneado, es menos severo en su efecto que un surco aislado, porque los surcos paralelos proporcionan alivio de esfuerzo mutuo. El maquinado rudo también daña el metal a una profundidad apreciable. Una herramienta de maquinao de cizalla el metal en lugar de cortarlo, con el resultado de que la superficie del metal se rompe y también endurece en el trabajo hasta un punto que depende en gran parte de la profundidad del corte, el tipo y forma de la herramienta y las características del metal. Los componentes destinados a soportar condiciones de fatiga deben ser acabados con un corte fino o preferiblemente amolados y la dirección del corte final o amolado debe ser paralela a la de la carga de tensión principal siempre que sea posible.

El efecto de la aspereza superficial sobre la resistencia a la fatiga se muestra en la fig. 7. Se comparan varios acabados de superficie, tales como superficie de amolado liso una superficie de maquinado áspero y superficies como vienen de la forja o laminado caliente resultante de trabajo caliente.

La mayoría de las piezas metálicas acabadas mecánicamente tiene una capa superficial poco profunda en compresión residual. Aparte del efecto que tiene sobre la aspereza superficial, el proceso de acabado final será benéfico para la duración de fatiga cuando aumenta la profundidad e intensidad de la capa esforzada compresivamente y será perjudicial cuando disminuye la capa. Procesos tales como pulido electrolítico y maquinado químico y electroquímico, que remueve metal sin deformación plástica puede reducir las propiedades de fatiga. Maquinado de descarga eléctrica puede ser perjudicial para las propiedades de fatiga, sin un control apropiado y subsecuente proceso debido a los cambios microestructurales superficiales y subsuperficiales. El amolado controlado incorrectamente puede tener efectos similares sobre las propiedades de fatiga.

Ocasionalmente, durante el maquinado de un componente, una herramienta puede rayar o estirar la superficie. Si la pieza se somete a alto esfuerzo en servicio, el resultado puede ser una fractura por fatiga prematura que forma núcleo en la marca de la herramienta.

Frecuentemente ocurren elevadores de esfuerzo en un cambio en la sección, como por ejemplo, en el resalto entre dos secciones de una flecha de diámetro diferente. Las marcas de maquinado rudo y la combinación inapropiada de filetes con las superficies de la flecha frecuentemente sirven como sitios de iniciación de las grietas por fatigas.

Perforación. La resistencia a la fatiga de los componentes se puede reducir tan solo por la presencia de un agujero perforado: se reduce más aún por no remover rebabas producidas durante la perforación, de los bordes del agujero. Las fracturas que se originan en agujeros perforados son comunes en piezas complejas que contienen conductos internos intersecantes maquinados, debido a la dificultad y gasto de proporcionar radios para matar filos en tales puntos.

Amolado. La práctica correcta de amolado produce una superficie lisa que está esencialmente libre de esfuerzos residuales inducidos o sitios para la deformación de grietas por fatiga. Sin embargo, el amolado indebido, especialmente en aceros tratados térmicamente a alta dureza, es una causa común de disminución de resistencia a la fatiga y falla resultante de esfuerzo de tensión o calentamiento localizado intenso o ambos. El calentamiento localizado intenso da por resultado templado, formación de martensita no templada, que madura o formación de grietas superficiales poco profundas y apretadas, conocidas generalmente como grietas de amolado.

enderezado. Los componentes pueden ser deformados plásticamente sin intención durante la fabricación, el embarque o en servicio, sin que se agrieten. Estas piezas se pueden enderezar manualmente, por calentamiento en prensas o en enderezadoras de rodillo. La deformación inicial y las operaciones de trabajo subsiguientes pueden introducir esfuerzos residuales o elevadores de esfuerzo. Las melladuras, rasguños o superficies endurecidas al trabajo son elevadores potenciales de esfuerzo.

Compresión de Superficie. Los efectos benéficos de los esfuerzos residuales compresivos se pueden obtener mediante acuñación (alrededor de agujeros), mediante laminado o martillado a granalla. Estos procesos frecuentemente producen marcas visibles en la superficie, tales como áreas bruñidas y hoyuelos de martillado. La presencia o ausencia de tales marcas no es una indicación concluyente de la magnitud de los esfuerzos producidos por estos procesos.

Los esfuerzos residuales se pueden evaluar usando técnicas de difracción de rayos X. Sin embargo, debido a que los esfuerzos serán disipados en la vecindad inmediata de la fractura, los esfuerzos serían detenidos en un punto un tanto alejados de la fractura. Pueden resultar fracturas si se trabaja inadecuadamente una área crítica.

Limpieza. Algunas veces es necesaria la limpieza para eliminar aceite, grasa u otros contaminantes de la superficie de una pieza de trabajo. Para trabajo de producción se puede emplear desengrasar a vapor o inmersión en un solvente o una solución limpiadora química simple. Muchas soluciones alcalinas que eliminan la grasa y el aceite del aluminio, no son satisfactorias para la mayoría de los fines de limpieza, porque atacan la superficie. Sin embargo, las soluciones alcalinas inhibidas adecuadamente para eliminar la acción corrosiva se pueden usar con éxito. El tratamiento de limpieza debe ser seguido de un enjuagado completo en agua limpia y luego secado.

Las prácticas de soldadura pueden tener un efecto sobre la resistencia o la fatiga de un metal en la superficie y debajo de ella. Los defectos superficiales resultantes de prácticas defectuosas de soldadura proporcionan elevadores de esfuerzo en los cuales se pueden originar grietas por fatiga de flexión y de torsión. Los cráteres, grietas bajo bordes y formación de arco, son defectos superficiales típicos. Los defectos superficiales, tales como inclusiones de fundante, fusión incompleta y penetración inadecuada de la junta, pueden originar agrietamiento en las piezas cargadas con tensión, flexión y torsión.

Marcas de Identificación. Las marcas de identificación (fecha de fabricación, número de lote, número de calentamiento del acero, tamaño o número de pieza), pueden introducir esfuerzos en componentes. La lubricación y método para hacer las marcas pueden ser importantes. No deben estar en áreas de esfuerzo de tensión, flexión o torsión altos.

Los números o letras realzados son preferibles a los grabados y se recomiendan los métodos de forjado en caliente más que los de forjado estampado o acuñado en frío. Para marcas que se hacen en superficies maquinadas, generalmente es preferible el uso de tinta marcadora al uso de lápiz grabador eléctrico o grabador mecánico vibratorio, aunque cualquiera de estos dos últimos son menos perjudiciales que usar estampados de acero en frío o sin embargo, el uso de éste para números en una área no esforzada, puede ser preferible a algún otro tipo de marca de identificación en una región más altamente esforzada. Los caracteres con contornos redondos también pueden causar agrietamiento. Si se deben usar estampadores de acero, los estampadores de bajo esfuerzo (con filos agudos removidos de los caracteres) o estampadores romos causarán menos dificultad, especialmente si se hacen impresiones ligeras. El estampado se debe situar en áreas que se conozcan sean de bajo esfuerzo.

Fallas por Fatiga a Temperaturas Elevadas

La falla por fatiga puede ocurrir usualmente a cualquier temperatura inferior al punto de fusión de un metal y mantener todavía las características de las fracturas por fatiga, usualmente con poca deformación a lo largo de toda la gama de temperatura. Sin embargo, a altas temperaturas tanto la resistencia a la fatiga y la resistencia estática de los metales decrece generalmente conforme aumenta la temperatura de funcionamiento. En la figura 8 se muestran curvas S-N típicas de pruebas a la fatiga por flexión invertida a varias temperaturas. El límite de fatiga es claramente más bajo a temperaturas más altas. Los datos de propiedad mecánica de la mayoría de las aleaciones a altas temperaturas muestran también que como a temperatura ambiente la resistencia a la fatiga se relaciona intímicamente con la resistencia a la tensión a menos que la temperatura sea suficientemente alta para que se afecte la resistencia a la fatiga por el fenómeno del deslizamiento. Los datos de pruebas en las cuales la carga se revierte totalmente duran cada ciclo, usualmente se puede interpretar como no estar complicada por deslizamiento sin embargo, en condiciones reales de servicio raramente es éste el caso.

A altas temperaturas, la aplicación de una carga constante a un componente metálico produce deformación continua

o desplazamiento, lo cual conduce finalmente a fractura si la carga se mantiene por un tiempo suficientemente prolongado. La resistencia a la ruptura por esfuerzo se define como el esfuerzo que puede soportar un metal durante un tiempo dado, a una temperatura dada, sin romperse. Con los aumentos en la temperatura, la resistencia a la ruptura por esfuerzo decrece rápidamente, a valores que se pueden considerar más bajos que la resistencia de fatiga. Por consiguiente, el requisito principal de un metal que se le sujeta a temperaturas altas, es que tenga resistencia a la ruptura por esfuerzo adecuada. Muchas aleaciones que poseen buena resistencia al deslizamiento, son también resistentes a la fatiga; sin embargo, la condición de una aleación que proporciona máxima resistencia a la ruptura por esfuerzo máximo, no es necesariamente la condición que proporciona máxima resistencia a la fatiga. En la práctica, es necesario diseñar contra falla por fatiga y contra distorsión o fractura por deslizamiento excesivo, tanto como es necesario tomar en cuenta las cargas combinadas por tensión y fatiga a temperatura ambiente.

A temperatura ambiente y excepto a muy altas frecuencias, la frecuencia a la cual se aplican cargas cíclicas, tiene poco efecto sobre la resistencia a la fatiga de la mayoría de los metales. Sin embargo, este efecto se acrecienta mucho más .. conforme aumenta la temperatura y el deslizamiento se vuelve un factor. A temperaturas altas, la resistencia a la fatiga parece depender del tiempo total que se aplicó el esfuerzo más que tan sólo del número de ciclos. Este comportamiento ocurre debido a deformación continua bajo carga a altas temperaturas. Bajo esfuerzo fluctuante, la frecuencia cíclica afecta tanto a la duración de fatiga como a la cantidad de deslizamiento. Esto se muestra en la figura 9, diagrama de vida constante que ilustra el comportamiento de temperatura de la aleación S-816, probada bajo una carga coaxial fluctuante. A temperatura ambiente, las curvas convergen en la resistencia a la tensión gráfica a lo largo del eje de esfuerzo medio. A alta temperatura, las curvas terminan en la resistencia a la ruptura por esfuerzo, lo cual siendo una propiedad que depende del tiempo, tiene como resultado la terminación en una serie de puntos finales a lo largo del eje del esfuerzo medio.

Las fracturas resultantes de esfuerzos fluctuantes a altas temperaturas pueden ser similares en apariencia a las fracturas por fatiga o fracturas de ruptura por esfuerzo o una mezcla de las dos, dependiendo de las magnitudes relativas de los medios y alternantes.

Un requisito importante de la resistencia a la fatiga a altas temperaturas es que el componente tiene resistencia a la oxidación y otras formas de corrosión por alta temperatura. La resistencia a la fatiga a altas temperaturas se puede reducir

gravemente por ataque superficial procedente de la ceniza del combustible que contiene pentóxido de vanadio, de combustibles tratados con plomo y de otros contaminantes. En general, no obstante, los materiales son menos sensibles a muelas o altas temperaturas que a temperaturas ambiente.

La operación prolongada a altas temperaturas puede dar por resultado cambios metalúrgicos en la estructura de la aleación, que también puede tener un papel en la reducción de la resistencia a la fatiga. Generalmente, la exposición de corta duración a altas temperaturas, que no tiene como resultado cambios metalúrgicos, tales como recristalización, templado, cambios de fase, precipitación, fusión y difusión, no tendrán un efecto grave sobre la duración de fatiga al volver a temperaturas normales de operación.

Fatiga Térmica

La falla por fatiga térmica es el resultado de ciclos de temperatura, en contraste a la fatiga por altas temperaturas causadas por ciclos de deformación. Dos condiciones necesarias para fatiga térmica son alguna forma de contricción mecánica y un cambio de temperatura que actúa contra una contricción, causa esfuerzo térmico. La contricción puede ser externa por ejemplo, la impureza por montajes rígidos de tuberías o puede ser interna, en cuyo caso se establece por un gradiente de temperatura dentro de la pieza. En secciones gruesas, los gradientes de temperatura probablemente ocurren tanto a lo largo y a través del material, dando origen a esfuerzos triaxiales altos y reduciendo la ductilidad del material, aunque la ductilidad uniaxial aumenta frecuentemente con el aumento de la temperatura. La reducción en la ductilidad del material da origen a fracturas que tienen apariencia frágil, frecuentemente con muchas facetas semejantes a hendiduras como evidencia.

Las características de identificación de la falla por fatiga térmica del ciclo bajo, son: (a) puntos múltiples de iniciación que se unen aleatoriamente por deslizamiento de borde para formar la grieta principal, (b) fracturas transversales, (c) una cuña de óxido que llena la grieta y (d) fractura transgranular. Las grietas que tienen características similares se distinguen por fractura intergranular, son causadas por fenómenos de ruptura por esfuerzo. El mecanismo de falla primario, involucrado en la ruptura por esfuerzo, es deslizamiento de límite de grano. En las grietas por fatiga térmica, ... los procesos de deslizamiento y hendidura operan de modo muy semejante al de la falla a temperatura normal, pero con frecuencia la evidencia se destruye por formación de óxido, pulido a flama y procesos de fusión.

La fatiga térmica verdadera ocurre en componentes tales como motores de combustión interna, en los que se usan materia

les fundidos de sección gruesa, y en artefactos o intercambiadores de calor, donde se usa material forjado delgado. En materiales fundidos, las secciones uniformes, gradientes suaves de deformación y grafito de escama corta, son características de diseño deseables. En intercambiadores de calor de hornos de gas o petróleo, el ciclo térmico es importante, porque controla los gradientes de temperatura y en secciones delgadas, las contricciones externas son de importancia menor.

Fatiga por Contacto

Los elementos que giran o que giran y se deslizan contra otro bajo alta presión de contacto, están sujetos a que se desarrollen picaduras o astilladuras superficiales después de muchas cargas repetidas. La picadura es una manifestación de fatiga del metal a partir de contactos cíclicos impuestos. Los factores que determinan la fatiga por picadura son el esfuerzo de contacto, las propiedades del material y la metalurgia y las características físicas y químicas de las superficies de contacto, incluso la película de aceite que lubrica las superficies.

FATIGA POR CORROSION

La fatiga por corrosión está asociada con los esfuerzos alternantes o fluctuantes que ocurren en un ambiente corrosivo y causan iniciación acelerada de grietas y propagación en un punto donde ni el ambiente ni el esfuerzo actuando solos serían suficientes para producir una grieta.

El agrietamiento por fatiga en un ambiente corrosivo se identifican por la presencia de numerosas grietas adyacentes a la fractura y de producto de corrosión compactado sobre la superficie de la fractura, que puede dañar y oscurecer el detalle superficial fino de la fractura.

Generalmente, el ambiente corrosivo introduce elevadores de esfuerzo sobre la superficie. La superficie irregular que resulta es perjudicial a las propiedades de fatiga de la pieza en un sentido mecánico o geométrico. En las piezas susceptibles a agrietamiento por hidrógeno, o piezas expuestas a un ambiente corrosivo continuo con aplicaciones intermitentes de cargas, el mecanismo de agrietamiento puede ser un tanto más complejo.

Una característica importante de la fatiga por corrosión es que la gama de esfuerzo necesario para causar fractura disminuye progresivamente conforme aumenta el tiempo y número de ciclos de esfuerzo. Por consiguiente, no es práctico y antieconómico tratar de diseñar únicamente contra la fatiga por corrosión. Aunque aleaciones diferentes muestran rendimien

to diferente bajo un ambiente por corrosión dado, se acostumbra proteger la superficie para lograr un rendimiento adecuado a bajo costo.

PROGRAMAS Y TECNICAS DE INSPECCION

La ocurrencia de fallas por fatiga se puede producir manteniendo programas rutinarios de mantenimiento que incluyan pruebas no destructivas.

Si se encuentra una grieta o discontinuidad en un componente vital que pudiera fallar y causar daño grave, el componente se debe reemplazar tan pronto como sea posible. Cuando la falla no es tan crítica, la pieza que contenga una discontinuidad se puede inspeccionar a intervalos regulares hasta que se considere que el componente está próximo a fallar antes de que se reemplace. Los componentes críticos que se intercambian en ensambles durante el mantenimiento de rutina se debe inspeccionar para asegurarse que la pieza desmontada es utilizable como repuesto.

Se debe mantener un registro de fractura de modo que se puedan anotar los casos repetidos de fallas en ciertos componentes. Los componentes que fallan repetidamente indican que quizá se debe utilizar un diseño y/o material diferente. Cuando no sea razonable cambiar el diseño o el material, el examen de los registros debe indicar una expectativa aproximada de duración. Sabiendo esto, la pieza se puede reemplazar antes de que resulte falla. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de mantenimiento preventivo suponen que todas las piezas son exactamente iguales, lo cual no es cierto necesariamente; por consiguiente, tales sistemas se deben usar solamente para tener alguna guía aproximada y se deben complementar con inspección no destructiva.

La inspección visual algunas veces puede revelar grietas por fatiga. Las grietas se localizan con frecuencia en puntos obvios de la concentración de esfuerzo tales como en cambios de sección, filetes agudos, última cuerda de componentes roscados y cuñeros. Estas concentraciones de esfuerzo pueden ser resultado de defectos de diseño o fabricación o muescas accidentales. Una vez que las grietas por fatiga se hacen visibles a simple vista, usualmente se propagan a tal velocidad que la duración restante será sólo un pequeño porcentaje de la duración total de la pieza.

Pruebas No Destructiva. La inspección por líquido penetrante, la inspección electromagnética y la inspección de partículas magnéticas (de metales ferrosos) son métodos dignos de confianza para detectar grietas superficiales y discontinuidades. Sin embargo, la resistencia a la fatiga o nú

mero de aplicaciones de carga necesarias para producir fallas por fatiga, usualmente no se puede predecir por las indicaciones de la prueba.

La inspección ultrasónica y la radiografía, se usan principalmente para el examen interno. Para la detección de grietas, la ultrasónica es mucho más segura que la radiografía. No es desusado monitorear grietas por fatiga por medio de la ultrasónica hasta que se considere que el crecimiento de la grieta ha alcanzado un tamaño crítico.

El baño de esfuerzo, medidores de deformación, baños rotoeléctricos y difracción de rayos X, no se usan por lo general para piezas fracturadas, si no más bien para piezas de ajuste no fallidas o similares para estudiar esfuerzos residuales en una pieza o los esfuerzos inducidos impartidos por cargas específicas. El resultado de estas pruebas se puede usar para analizar los esfuerzos en piezas que fallaron por fatiga.

DETERMINACION DEL DANO DE FATIGA Y DURACION

La fatiga causa más del 80% de las fallas de funcionamiento en los elementos de máquinas y muchos de estos los ciclos de esfuerzo pueden ser muy complejos con crestas altas ocasionales. Por ejemplo el impacto de la carga de las alas de aeronaves. Para obtener una correlación satisfactoria con el comportamiento de servicio, se deben probar especímenes a tamaño real o a gran escala bajo condiciones tan cercanas como sea posible a las existentes en el servicio. Este método frecuentemente es por completo antieconómico, pero proporciona datos valiosos. Un procedimiento menos costoso de prueba es el de pruebas simplificadas de laboratorio. Usando la información de fatiga obtenida partir de las pruebas de especímenes estandar, o modelos, y aplicando los factores de corrección adecuados de configuración, acabado superficial, ambiente y varios otros parámetros, se puede determinar la duración aproximada del componente. Sin embargo, se debe hacer hincapié en que eso es tan solo una aproximación y que sin pruebas a escala real, como las que se mencionaron, esta información podría ser inútil.

Para mejorar los diseños de producción, el método de carga objetivo/duración para evaluar el diseño, es de uso en compañías automovilísticas, de equipo agrícola, equipos de construcción y compañías de aviación. En este método se observan numerosas fallas a partir de máquinas en funcionamiento real. De estas observaciones se pueden derivar conclusiones en cuanto al tipo de carga que causa las fallas. Se monta entonces una prueba de fatiga para aplicar la carga apropiada. Después de obtener fallas durante la prueba, se pueden hacer cier

tos ajustes en la magnitud y método de aplicación de las cargas hasta que se crea el mismo tipo de falla en la prueba como las que experimentan las máquinas en el funcionamiento.

Se pueden establecer las duraciones objetivo de la pieza en la prueba de fatiga, con base en el tiempo hasta la falla en las pruebas de fatiga y la duración que se desea en servicio. Por ejemplo, si determinada pieza falla a la cuarta parte de la duración deseada de la máquina, y durante las pruebas de fatiga estas mismas piezas fallan en 25,000 ciclos no se consideraría satisfactorias piezas revisadas que no sobrepasan los 100,000 ciclos sin fallar. Una vez que se establece la carga y el número de ciclos apropiados para una pieza en una máquina de producción, la misma prueba se puede usar para asegurarse de que las piezas similares en máquinas nuevas serán satisfactorias.

Una aplicación en la cual se ha usado este método, es en los ejes traseros de automóviles, donde la torsión máxima tractiva se aplica 10,000 ciclos. Si los engranes del eje soportan esta carga, se consideran satisfactorios para el uso por el cliente. Las ventajas de este procedimiento son que hace uso de la experiencia adquirida en muchas máquinas ya en uso y que es bastante rápido. Sus desventajas es que se deben poner suficientes máquinas en manos de los clientes para desarrollar las piezas fallidas para estudio y evaluación de métodos de prueba.

Las diferencias en las condiciones de operación, ambiente, propiedades de fatiga de las piezas y métodos de proceso entre el diseño de producción y el nuevo diseño, deben ser pequeñas para producir resultados exactos. Por consiguiente esta técnica se usa mayormente cuando hay amplia experiencia como en el mejoramiento de piezas que tienen un historial de falla en servicio o en la evaluación de máquinas que son similares a modelos de producción existentes.

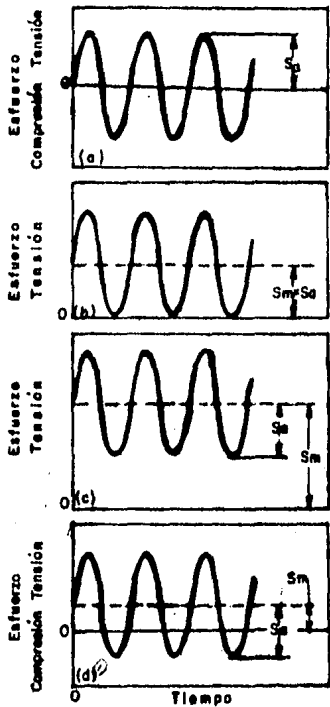


Figura 1. Tipos de esfuerzo de la prueba de fatiga.

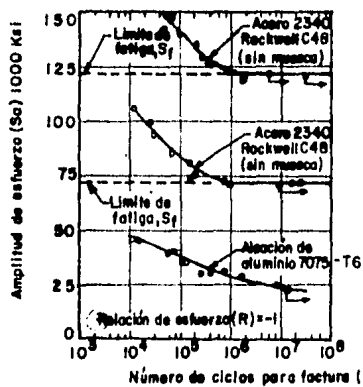


Figura 2. Curvas SN típicas para la amplitud constante y carga senoidal.



Figura 3. Superficie de una fractura por fatiga en una parte de acero --- 4330V. Las marcas de galón señalan hacia el origen de la fatiga en el ángulo inferior izquierdo. La ruptura de cizallamiento a lo largo de la periferia se indica con flechas.

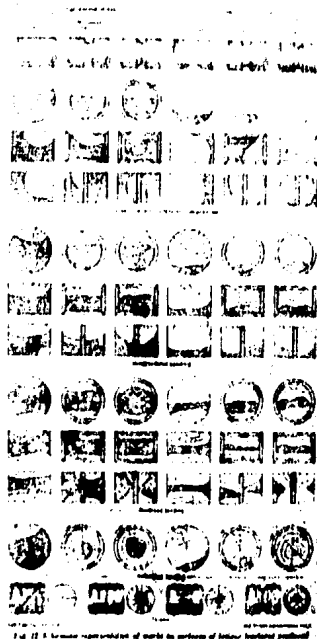


Figura 5. Representación esquemática de marcas en superficies de fractura por fatiga producidas en componentes lisos y con muesca con secciones transversales redondas, cuadradas y rectangulares y con placas gruesas, bajo varias condiciones de carga a esfuerzos nominales altos y bajos.

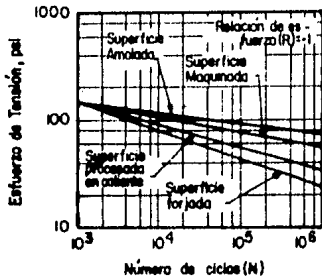


figura 7. Efecto de aspereza de superficie en la resistencia de fatiga de un espécimen de acero con una resistencia de tensión de 100,000 Psi.

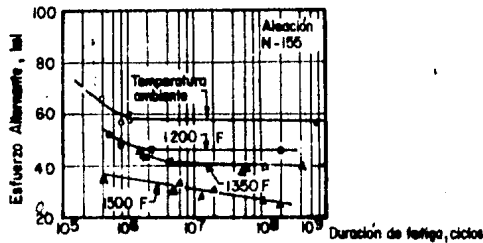


Figura 8. Duración de fatiga de un espécimen de aleación N-155 cuando se sujetó a varias temperaturas y esfuerzo de flexión inversa.

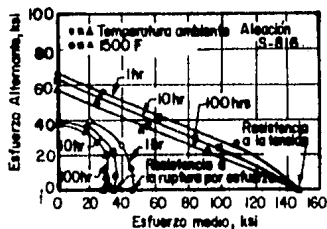


Figura 9. Efecto de la temperatura -- sobre la duración a la fatiga de una aleación S-816 probada bajo carga axial fluctuante a una frecuencia de 216,000 ciclos por hora.

CAPITULO V

FALLAS POR DISTORSION

FALLAS POR DISTORSION

La falla por distorsión ocurre cuando una estructura o componente se deforma en forma que (a) no pueda soportar más la carga que estaba destinada a llevar, (b) es incapaz de desempeñar su función, o (c) interfiere la operación de otro componente. Las fallas por distorsión pueden ser plásticas o elásticas y pueden o no estar acompañadas de fractura. Hay dos tipos principales de distorsión: Distorsión de tamaño, que se refiere a un cambio en el volumen (crecimiento o encogimiento) y distorsión de forma (flexión o alabeo), que se refiere a un cambio de la forma geométrica.

SOBRECARGA

Toda estructura tiene un límite de carga más allá del cual se le considera insegura o no digna de confianza. Las cargas aplicadas que exceden este límite se conocen como sobrecargas y algunas veces dan como resultado la distorsión o fractura de uno o más miembros estructurales. La estimación de los límites de carga es uno de los aspectos más importantes del diseño y se computa comúnmente según uno de los dos métodos: Diseño clásico o análisis de límite.

Diseño Clásico. El método conservador clásico de diseño presupone que la falla ocurre siempre que el esfuerzo en cualquier punto de la estructura excede la resistencia al punto cedente del material. Salvo los miembros que se cargan por pura tensión, el hecho de que el punto cedente ocurra en alguna parte de la estructura tiene poca influencia sobre la propiedad de la estructura de soportar la carga. Sin embargo, dicho punto cedente se ha considerado como un preludio al colapso o fractura estructural, y por consiguiente, una base razonable para limitar las cargas aplicadas.

El diseño clásico mantiene esfuerzos permisibles enteramente dentro de la región elástica y se usa rutinariamente en el diseño de piezas. En general los esfuerzos permisibles para el servicio estático se fijan a la mitad de la resistencia de punto cedente para materiales dúctiles y un sexto para materiales frágiles, aunque otras fracciones pueden ser más adecuadas para aplicaciones específicas. La razón de usar tales fracciones bajas de resistencia a punto cedente es considerar tales factores como errores posibles en presuposiciones de computación, sobrecarga accidental, introducción de esfuerzo residual durante el proceso, efectos de temperatura, variaciones en la calidad del material, incluso imperfecciones, degradaciones por corrosión y aumentos locales inadvertidos en el esfuerzo aplicado resultantes de efecto de muesca.

El diseño clásico se usa también para establecer esfuerzos permisibles en otras aplicaciones. Por ejemplo, cuando puede ocurrir fractura por fatiga o esfuerzo. En este caso la resistencia a la fatiga o la resistencia a la ruptura por esfuerzo se sustituye por resistencia a punto cedente, como punto de referencia.

Análisis de Límite. El límite superior del diseño se define como la carga a la cual se romperá una estructura bajo una sola aplicación de fuerza. Esta carga se puede calcular por el método conocido como análisis de límite. Con el análisis de límite, no es necesario estimar distribución de esfuerzos, lo cual hace el análisis de esfuerzo mucho más simple por este método que por el diseño clásico. Sin embargo, el análisis de límite se basa en el concepto de tolerancia al punto cedente en las regiones más altamente esforzadas de la estructura y por consiguiente no se puede usar en el diseño para resistencia por fatiga o pandeo, o para diseñar estructuras tolerantes a fallas.

El análisis de límite presupone un material idealizado, un material que se comporte elásticamente hasta cierta resistencia a punto cedente y luego no se endurece en el trabajo sino sufre un grado definido de deformación plástica, sin cambio en el esfuerzo. La seguridad inherente de una estructura se estima más realísticamente por el análisis de límite en aquellos casos en los que la estructura tolerará alguna de formación plástica antes de que se colapse. Debido a que el acero de bajo carbono, es uno de los materiales más comúnmente usados en miembros estructurales, se comporta un tanto como el material idealizado.

La figura 1 ilustra el comportamiento por deformación de esfuerzo relativo de un acero de bajo carbón, un material de endurecimiento por esfuerzo y un material idealizado, todos con la misma resistencia a punto cedente.

Los límites de carga para piezas hechas de un material que se endurece por deformación de manera significativa cuando se esfuerzan en la región plástica, se pueden estimar por análisis de límite, como se pueden estimar para piezas hechas de otros materiales cuyo comportamiento de deformación por esfuerzo difiere del comportamiento del material idealizado. En estas situaciones, basa su cálculo de diseño en una resistencia presupuesta que de hecho puede caer dentro de la región plástica del material.

Factores de Seguridad. Tanto el diseño clásico como el análisis de límite, supone que la fluencia es el criterio para calcular cargas seguras en estructuras cargadas estáticamente. Para una carga aplicada dada, los métodos difieren en que el factor de seguridad (la relación de la capacidad teó

rica de un miembro estructural a la carga máxima permisible) generalmente es más alta cuando se calcula por análisis de límite.

Los factores de seguridad son consideraciones importantes del diseño, porque toman en cuenta factores que no se pueden computar anticipadamente. La sobrecarga de fractura puede ocurrir ya sea cuando el esfuerzo aplicado se incrementa más allá del valor de diseño o cuando se degrada la resistencia del material. Si una u otra situación es una característica de la estructura fabricada, el diseño debe cambiarse para tomar en cuenta estos factores más realísticamente.

Grado de Distorsión. Al diseñar las estructuras usando análisis de límite, los diseñadores no siempre consideran la cantidad de distorsión que se encontrará. Una ilustración aproximada de la distorsión que resulta de sobrecargar una viga voladiza pequeña, aparece en la figura 2. Se aplicaron cargas conocidas a vigas de sección rectangular de acero al bajo carbono y de acero inoxidable y se midió la deflexión permanente en el punto de carga. Se calcularon los esfuerzos de fibra máxima y a partir de la carga aplicada y la dimensión del espécimen original.

Este tipo de prueba proporciona un concepto simplista, pero útil de distorsión al mostrar cuanta distorsión ocurre en deformaciones más allá del límite de elasticidad. Como se muestra en la figura 2, la viga hecha de acero al carbón que se endurece por deformación solo ligeramente, presentaba distorsión nula cuando el esfuerzo de fibra máximo calculado era igual a la resistencia a punto cedente (a una relación de esfuerzo de 1.00). Sin embargo, esta viga se colapsó a una carga equivalente a un esfuerzo de fibra justamente arriba de la resistencia de tensión que se muestra en la figura 2. Donde la curva inferior se volvió esencialmente horizontal. La carga de colapso concuerda con la carga de colapso del análisis de límite de 1.5 veces la carga a elasticidad. La viga hecha de acero inoxidable que se endurece por deformación a una velocidad bastante alta, no mostro distorsión a esfuerzo de fibra hasta 1.47 veces la resistencia a punto cedente. Cuando el esfuerzo calculado igualó la resistencia a la tensión (a una relación de esfuerzo de 1.59), la distorsión fue de 0.7 veces el espesor de la viga y ésta sostuvo un esfuerzo calculado de 1.5 veces la resistencia de tensión sin colapso.

El grado de distorsión que puede ocurrir a altas velocidades de carga, es difícil de analizar o predecir porque: (a) los procesos cristalográficos involucrados en la deformación y fractura son influidos por la velocidad y temperatura de deformación; (b) La carga de impulso crea una condición

adiabática que ocasiona un incremento local en la temperatura, y (c) la carga de impulso implica la propagación de ondas de esfuerzo de alta velocidad a través de la estructura.

Efecto de la Temperatura. Las fallas por distorsión causadas por sobrecarga pueden ocurrir a cualquier temperatura a la cual la resistencia de fluencia del material es menor que la resistencia de fractura. La resistencia a la fluencia se define como el esfuerzo real promedio necesario para producir deformación plástica detectable causada por una aplicación de carga relativamente lenta de incremento continuo; la resistencia a la fractura es el esfuerzo real promedio de fractura causado por una aplicación continuamente creciente de carga. La resistencia de fluencia y la resistencia a la fractura de un material depende de la temperatura, como es el módulo elástico (módulo de Young, módulo de masa o módulo de cizallamiento). La figura 3 ilustra esquemáticamente esta dependencia de temperatura para materiales policristalinos que no sufren una transformación de estado sólido. Se muestran dos resistencias de fluencia, una para un material que no tiene una transición dúctil a frágil en comportamiento de fractura, tal como un metal con una estructura cristalina cúbica de cara centrada (fcc) y una para un material cúbico de cuerpo centrado, que presenta una transición dúctil a frágil.

Como se muestra en la figura 3 la resistencia de fluencia, el módulo elástico y la resistencia a la fractura de un material generalmente decrece conforme incrementa la temperatura. Si una estructura puede soportar cierta carga a 20°C , puede soportar la misma carga sin deformación a temperaturas más bajas. Si la temperatura se incrementa de manera que la resistencia de fluencia sea menor que el esfuerzo aplicado, una estructura se puede deformar espontáneamente sin incremento en la carga. Un cambio de temperatura puede causar también una falla por distorsión elástica debido a un cambio en el módulo. Para la mayoría de los materiales estructurales, la curva que define la dependencia de la temperatura de las propiedades elásticas y plásticas es relativamente plana a temperaturas cercanas a los 20°C .

En materiales cúbicos de cara centrada y en materiales cúbicos de cuerpo centrado, a temperaturas arriba de la temperatura de transición, la distorsión siempre acompaña a la fractura por sobrecarga en una sección que contiene un elevador de esfuerzo severo.

A temperaturas más altas que aproximadamente $T/2$ (la mitad de la temperatura absoluta de fusión), fenómenos como deslizamiento pueden causar falla por distorsión. El desli-

zamiento es un fenómeno de tiempo relativamente largo y se puede distinguir de la distorsión por sobrecarga relacionando la longitud del tiempo a temperatura con la cantidad de distorsión.

ESPECIFICACIONES INCORRECTAS

Errores mayores en la especificación de un material o procesamiento de una pieza pueden originar fallas por distorsión. Estos errores son con frecuencia el resultado de información deficiente o incompleta.

Algunas veces las condiciones de servicio cambian, invalidando ciertas suposiciones que se habían hecho cuando se di señó la pieza originalmente. Tales cambios incluyen (a) un aumento en la temperatura de operación a la cual el material ya no tiene la resistencia requerida; (b) un aumento en la especificación de carga de un componente asociado, la cual el usuario puede interpretar como un incremento en la carga permisible sobre la estructura como un todo; o (c) un aumen te arbitrario en la carga aplicada, per el usu ario en la supe sición de que el componente tiene un factor de seguridad su ficientemente alto para admitir la carga adicional.

INCUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES

Las piezas algunas veces no funcionan según se espera debido a que el material o el proceso no cumple los requisitos, dejando la pieza con resistencia insuficiente. Otra deficiencia del material que puede llevar a falla por deformación es la variabilidad en la respuesta al tratamiento térmico entre piezas de un lote de producción dado. Ciertas aleaciones, especialmente los aceros de baja aleación endurecibles y algunas aleaciones de endurecimiento por precipitación, pueden variar en cuanto a su respuesta a un tratamiento térmico es pecificado debido a variaciones ligeras de composición de un lote a otro o dentro de un lote dado. Esto puede tener co mo resultado que algunas piezas tengan una resistencia dem asiado baja para la aplicación aunque hayan sido tratadas tér micamente de acuerdo a especificaciones.

Los remedios para la variabilidad de la respuesta al tra tamiento térmico usualmente involucra cambios en el proceso de tratamiento térmico que varían en complejidad desde (a) adaptar las condiciones del tratamiento térmico para cada lo te o sublote, hasta (b) ajustar las especificaciones del tra tamiento térmico. Los experimentos en cada lote o sublote casi siempre son necesarios para establecer parámetros cu ando se adaptan las condiciones de tratamiento térmico.

Tratamiento Térmico Defectuoso. Los errores cometidos en las aleaciones endurecibles por tratamiento térmico se encuentran entre las causas más comunes de falla prematura. Las temperaturas que sean demasiado altas o demasiado bajas pueden dar por resultado el desarrollo de propiedades mecánicas indeseables o inadecuadas. El enfriamiento de una pieza de acero efectuado demasiado rápidamente, puede agrietarlo; el enfriamiento demasiado lento puede no producir la resistencia o tenacidad requerida. Si las partes están protegidas de un medio de calefacción o de enfriamiento, pueden responder mal al tratamiento térmico.

El control apropiado de la temperatura y el tiempo en un horno de tratamiento térmico es esencial en el procesamiento de muchas aleaciones endurecibles.

El alabeo durante el tratamiento térmico o durante el recocimiento de alivio de tensión, también es un tipo común de falla por distorsión. El alabeo es el resultado de esfuerzos residuales no uniformes o esfuerzos de transformación o térmico que se introduce durante el calentamiento o enfriamiento. Cuando el esfuerzo residual causa distorsión, la cantidad de distorsión es proporcional a la magnitud del esfuerzo residual. Cuando la distorsión es causada por esfuerzo térmico o de transformación, el grado de la distorsión es mayor para piezas que tienen configuración compleja o grandes diferencias en el espesor de sección y para velocidades de calentamiento o enfriamiento más rápidas.

La mayor parte del alabeo es el resultado de deformación plástica que ocurrió en alguna región de la pieza a temperatura elevada o durante un cambio de temperatura. Los cambios dimensionales que acompañan al alivio de esfuerzo son el resultado de reajustes que implican tanto deformación elástica como plástica. La distorsión que ocurre durante otros tipos de tratamiento térmico implica principalmente deformación plástica y generalmente da como resultado altos niveles de esfuerzo residual en la pieza alabeada. La magnitudad y distribución de esfuerzos residuales y si son de tensión o compresivos, ello se determina por la composición, forma, tamaño y condiciones de tratamiento térmico de -- una pieza dada.

Frecuentemente, el alabeo es severo en tratamientos térmicos que involucran enfriamiento. En aceros endurecibles, la causa principal del alabeo al enfriamiento son las velocidades no uniformes de transformación. El efecto de los esfuerzos de transformación se puede intensificar si existe una

composición no uniforme; esta falta de uniformidad puede ser resultado de segregación o puede ser resultado de procesamiento, como en una pieza carburizada. Tales faltas de homogeneidad pueden producir una variación en la temperatura de transformación en puntos que son geoméricamente equivalentes y que se enfrían a la misma velocidad. Durante el temple también pueden ocurrir esfuerzos de transformación no uniformes resultantes de falta de homogeneidad.

Con frecuencia el alabeo se puede reducir al mínimo modificando las condiciones del tratamiento térmico. Por ejemplo las velocidades lentas de calentamiento y enfriamiento son menos susceptibles de causar alabeo, porque las variaciones locales de temperatura y las velocidades de cambio de temperatura son mínimas. El calentamiento previo a la austenización, se usa frecuentemente como medio de reducir al mínimo el alabeo en algunos aceros de herramientas y secciones gruesas, porque el precalentamiento reduce el gradiente de temperatura entre la superficie y el interior de la pieza. El endurecimiento por inducción y nitruración se han usado para reducir al mínimo el alabeo cuando la dureza superficial es de importancia principal para el rendimiento de una pieza.

En los tratamientos térmicos que requieren enfriamiento rápido o lento, el alabeo excesivo generalmente se puede reducir cambiando las condiciones, en muchos casos la orientación de una pieza al entrar al enfriador influirá la cantidad de distorsión que ocurra. El enfriamiento en artefactos especiales, o prensas de enfriamiento, se usa extensamente en ciertas industrias para reducir la distorsión al proporcionar velocidades de enfriamiento controladas, en lugares diferentes de una pieza dada. El temple isotérmico martensítico se ha usado también para reducir al mínimo la distorsión, porque en este proceso las velocidades de transformación se igualan por toda la pieza.

Endurecimiento Superficial Defectuoso. La carburización que incrementa tanto la dureza superficial de una pieza como proporciona resistencia al desgaste y la indentación, puede, si se controla inadecuadamente producir un endurecimiento o cementación que sea demasiado bajo o demasiado alto de contenido de carbono. Con un contenido de carbono demasiado bajo, la superficie puede ser no suficientemente dura para soportar cargas normales de servicio. Esta condición puede estar acompañada de poca profundidad de cementación, lo cual agrava el problema. Con un contenido de carbón excesivamente alto que generalmente es resultado de un potencial de carbón excesivamente alto o difusión inadecuada durante el ciclo de

carburización, pueden estar presentes cantidades excesivas de austenita retenida en la zona carburizada despues del tratamiento térmico dependiendo de la composición del acero. La austenita retenida reduce la resistencia a la capa superficial a la deformación (indentación) y bajo ciertas condiciones, se puede transformar en martensita en el servicio. Cuando ocurre la transformación en servicio, la martensita no templada resultante puede agrietarse y de esta manera promover una falla prematura por fatiga superficial o una falla por distorsión en un ensamble de ajuste preciso puede ocurrir debido al cambio de volumen que acompaña a la transformación.

Reparaciones Defectuosas. Con frecuencia se reparan los productos para corregir deficiencias que se encuentran en piezas nuevas durante la inspección de control de calidad o en partes usadas después de que se han deteriorado en el servicio. La soldadura de reparación se reconoce como fuerte potencial de alteraciones indeseables de las propiedades de las aleaciones tratables térmicamente. Las piezas se pueden volver más suaves o más quebradizas a causa de la reparación descuidada, dependiendo de la aleación y de las condiciones bajo las cuales se haga la reparación.

La sustitución de una pieza, especialmente un sujetador, cuyas propiedades no concuerdan con las de la pieza que remplaza, pueden conducir a la falla de la pieza sustituta, a falla de otra pieza o de ambas.

ANALISIS DE FALLAS POR DISTORSION

Frecuentemente se considera que las fallas por distorsión son fenómenos relativamente simples, fáciles de analizar por que la deformación puede ocurrir sólo cuando el esfuerzo aplicado excede la resistencia de fluencia del material. Por lo contrario, la distorsión no siempre resulta de simple sobrecarga o uso de una pieza procesada inapropiadamente. Fracuentemente, el análisis de una falla por distorsión debe ser excepcionalmente completo y riguroso a fin de determinar la causa de la falla y, de manera más importante, para especificar la acción correctiva apropiada. Se deben considerar factores que pueden no haber sido previstos en el diseño de la pieza, tales como sustituciones de material o cambios de proceso durante la fabricación y mal uso, abuso u ocurrencia de campo de esfuerzo complejos en el servicio.

Procedimiento Analítico. Los diez pasos que se dan en la lista siguiente, constituyen el procedimiento general que se sugiere específicamente para el análisis de una falla por

distorsión.

1. Definir el efecto de la falla sobre la estructura o ensamble y definir los resultados deseados de la acción correctiva.
2. Obtener toda la información de diseño y servicio disponible.
3. Examinar la pieza distorsionada, registrando las observaciones, incluyendo un bosquejo o fotografía de la pieza distorsionada y una anotación de todas las mediciones de las dimensiones pertinentes. Usualmente es útil registrar estas mediciones, que se deben hacer por lo menos con la misma precisión que en la inspección de control de calidad, junto con las dimensiones de diseño en un plano de la pieza.
4. Realizar las pruebas de laboratorio que sean necesarias para conformar la composición, estructura y otras características químicas o metalúrgicas de la pieza distorsionada.
5. Rastrear la pieza fallida por todo el proceso de fabricación para descubrir si ocurrieron desviaciones de proceso durante la producción.
6. Comparar las condiciones reales de servicio en las suposiciones de diseño.
7. Comprobar las propiedades reales del material con la especificación de diseño.
8. Determinar si cualquier diferencia encontrada en las operaciones 6 y 7 son responsables de la distorsión observada en la estructura fallida. Si las diferencias no son responsables de la distorsión observada, la información obtenida en las operaciones 2 a 4 es incorrecta o incompleta.
9. Preparar cursos alternativos de acción para corregir los factores variantes que causaron la distorsión observada y seleccionar el curso que parezca más idóneo para producir el resultado deseado, que se definió en el paso 1.
10. Probar el curso seleccionado de acción correctiva, para comprobar su efectividad. Evaluar los efectos secundarios de la acción correctiva, tales como sus efectos sobre el costo o sobre la facilidad de su puesta en práctica.

TIPOS DE FALLAS POR DISTORSION ESPECIALES

El análisis de fallas por distorsión puede ser particularmente difícil cuando no hay deformación permanente visible de la pieza o cuando están involucrados campos de esfuerzo complejo. A continuación se tratarán tres tipos de fallas por distorsión.

Distorsión elástica. Una falla por distorsión no necesariamente implica elasticidad bajo una sola aplicación de carga. La mayoría de las piezas deflexionan elásticamente bajo carga. Si, por ejemplo, una pieza hecha ordinariamente de una aleación de alto módulo se hace de una aleación de bajo módulo, deflexionará más bajo una carga dada que si fuera hecha de la aleación de alto módulo.

Si esta mayor cantidad de deflexión coloca a la pieza en la trayectoria de otra pieza en un ensamble, podría decirse que falló por distorsión elástica. Como se mencionó anteriormente un cambio de módulo de un material debido a un cambio en la temperatura puede causar una falla por distorsión elástica. El alabeo de una columna larga, delgada, es otro tipo de falla por distorsión en la cual la resistencia a punto cedente del material no se excede, a menos que la estructura se colapse.

Matraqueo. La acumulación cíclica de deformación requiere que una pieza se esfuerce por una carga de estado multiaxial y que se suponga a la pieza a una deformación variable cíclicamente en otra dirección distinta a la del esfuerzo principal. En el matraqueo, una carga oscilatoria o una variación cíclica deforma el material más allá del punto cedente en lados alternos de un solo miembro o en miembros alternos de una estructura durante cada medio ciclo. Con ciclos sucesivos, se acumula la deformación plástica, con el resultado de que uno o más de las dimensiones totales del miembro o la estructura cambia relativamente uniformemente a lo largo de la dirección del esfuerzo de estado constante. La deformación producida por una variación cíclica en la carga se conoce como matraqueo isotérmico (aun cuando un cambio de temperatura puede ocurrir simultáneamente con la variación de carga).

El incremento progresivo debido a la deformación plástica incurrida durante un cambio en la temperatura, se denomina matraqueo térmico. Este puede resultar finalmente en fractura dúctil o en falla por fatiga de ciclo bajo.

A temperatura elevada el matraqueo se puede distinguir de el deslizamiento o relajación de esfuerzo. El matraqueo solamente es un fenómeno dependiente de la deformación, en tanto que el deslizamiento y la relajación de esfuerzo depende del tiempo. La exposición a temperatura elevada por un lapso prolongado es necesaria para que ocurra el deslizamiento o relajación de esfuerzo, pero puede ocurrir una extensa deformación por matraqueo en periodos breves, algunas veces tan solo en minutos. El matraqueo puede parecer ser dependiente del tiempo cuando se imponen deformaciones cíclicas a intervalos regulares. Sin embargo, el factor que distingue al matraqueo es la ocurrencia de deformación plástica durante ambas mitades de la variación cíclica.

En general, la acción correctiva adecuada para fallas por matraqueo implica (a) cambiar el diseño de la pieza o las condiciones de servicio para reducir la magnitud de los esfuerzos de servicio o (b) especificar un material con una resistencia a punto cedente más alta para la aplicación.

Alabeo Cíclico Inelástico. Algunos materiales exhiben --ablandamiento por deformación cíclica, un decremento continuo del límite elástico o módulo tangente que ocurre con la imposición de esfuerzos alternados cuya magnitud se encuentra entre el límite proporcional y la resistencia a punto cedente. Las columnas de materiales que exhiben este comportamiento pueden fallar por desplazamiento lateral en la parte media (alabeo) durante esfuerzos mucho menores que los predichos por el diseño clásico.

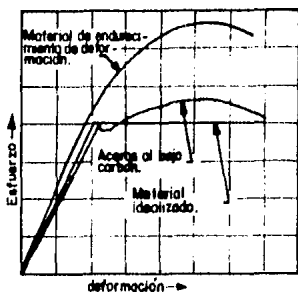


Figura 1. Comparación esquemática del comportamiento de deformación por esfuerzo convencional de un acero al bajo carbono, un material de endurecimiento de deformación y el material idealizado supuesto en el análisis de límite, todos con la misma resistencia a punto cedente.

Figura 2. Selección de la proporción de distorsión a proporción de esfuerzo para dos vigas voladizas de acero de sección transversal de sección rectangular.

La relación de distorsión es deflexión permanente medida a una distancia del soporte de diez veces el espesor de la viga, dividida por el espesor de la viga. La relación de esfuerzo es el máximo esfuerzo, calculado por la carga aplicada y las dimensiones originales de la viga, dividida por la resistencia a punto cedente.

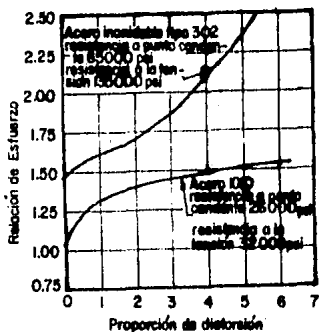
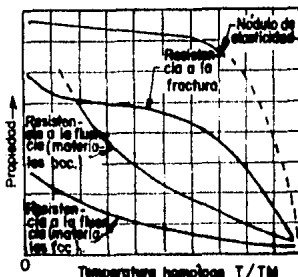


Figura 3. Diagrama esquemático de la dependencia de temperatura del comportamiento elástico, plástico y de fractura de materiales policristalinos que no exhiben una transformación de estado sólido. T es la temperatura absoluta instantánea y T_M es la temperatura de fusión absoluta del material.



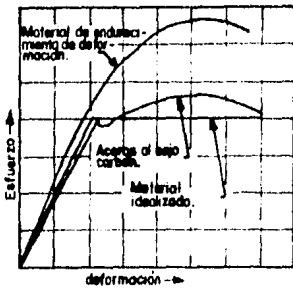


Figura 1. Comparación esquemática del comportamiento de deformación por esfuerzo convencional de un acero al bajo carbono, un material de endurecimiento de deformación y el material idealizado supuesto en el análisis de límite, todos con la misma resistencia a punto cedente.

Figura 2. relación de la proporción de distorsión a proporción de esfuerzo para dos vigas voladizas de acero de sección transversal de sección rectangular.

La relación de distorsión es deflexión permanente medida a una distancia del soporte de diez veces el

espesor de la viga, dividida por el espesor de la viga. La relación de esfuerzo es el máximo esfuerzo, calculado por la carga aplicada y las dimensiones originales de la viga, dividida por la resistencia a punto cedente.

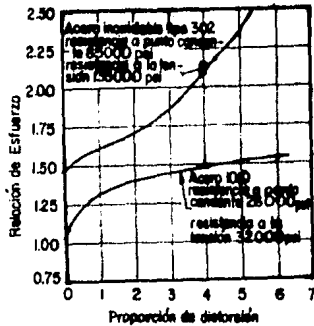
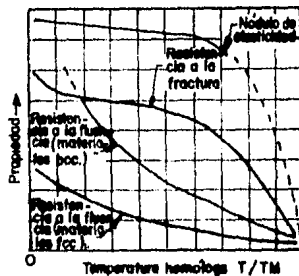


Figura 3. Diagrama esquemático de la dependencia de temperatura del comportamiento elástico, plástico y de fractura de materiales policristalinos que no exhiben una transformación de estado sólido. T es la temperatura absoluta instantánea y T_M es la temperatura de fusión absoluta del material.



CAPITULO VI

FALLAS POR DESGASTE

FALLAS POR DESGASTE

El desgaste es un fenómeno superficial que ocurre por desplazamiento y desprendimiento del material. Debido a que usualmente el desgaste implica una pérdida de peso y alteración de dimensiones por un período de tiempo, los problemas de desgaste generalmente difieren de los que entrañan rotura completa. Aun cuando el remplazo de piezas puedan romperse - es más probable que una pieza desgastada se retire del servicio porque no es ya capaz de funcionar satisfactoriamente o porque la calidad de su rendimiento es marginal. Aunque el reemplazo de una pieza rota raramente es dudoso, el remplazo de una pieza desgastada puede serlo, especialmente cuando se carecen de normas establecidas.

Todos los componentes mecánicos que sufren contacto de deslizamiento o rodamiento, están sujetos a cierto grado de desgaste. Son típicos componentes tales como baleros, frenos, embragues, sellos, guías, anillos de pistón, ranuras. El desgaste de estos componentes va desde fricción suave del tipo de pulimiento hasta remoción rápida y severa del material con la consiguiente aspereza de la superficie. El que el desgaste constituya falla de un componente, depende de si el desgaste afecta de manera delaterea la posibilidad de funcionamiento del componente. Por ejemplo, aún el desgaste leve del tipo de pulimiento de un carrete de ajuste preciso en una válvula hidráulica puede ocasionar fuga excesiva y de esta manera constituir una falla, aun cuando la superficie del carrete este lisa y al parecer sin daño. Por otra parte, el martillo de una trituradora de roca, por ejemplo, puede continuar operando satisfactoriamente a pesar de melladura e copeladura severas y el desprendimiento de hasta varios centímetros de superficie del metal.

La lubricación implica el uso intencional de una sustancia que reduce la fricción entre las superficies de contacto. La lubricación es un factor que mitiga el desgaste y de esta manera el desgaste lubricado y no lubricado aunque no es mecanismo de desgaste, se diferencian. En general el desgaste no lubricado está asociado con los tipos de aplicaciones en los cuales el uso de un lubricante no es factible o no es posible.

TIPOS DE DESGASTE

El desgaste, de acuerdo con una definición del diccionario es el deterioro debido al uso. Frecuentemente implica el deterioro gradual y los efectos son en su mayor parte fenómenos superficiales, pero estas restricciones no se deben aplicar a análisis de fallas, si se debe aceptar la suposición que el desgaste sea enteramente mecánico porque la co-

rosión química puede combinarse con otros factores de desgaste.

Las fallas por desgaste pueden ser graduales, rápidas y ocasionalmente pueden ser catastróficamente repentinas. Las fallas pueden ocurrir dentro de una amplia gama de temperaturas y esfuerzos. El esfuerzo casi siempre involucra desgaste y por ello es una consideración primaria en el análisis de falla; desafortunadamente, con frecuencia solamente es posible hacer una evaluación cualitativa del esfuerzo.

Generalmente hay cinco tipos principales de desgaste ; Desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, desgaste por erosión , desgaste corrosivo y desgaste por fatiga superficial. Además, hay otros tipos de desgaste, los cuales, aunque no se consideran como primarios, se les considera aparte. Estos incluyen erosión-corrosión, rozamiento y erosión por cavitación.

En general el desgaste se puede definir como el daño a una superficie sólida a causa de desprendimiento o desplazamiento de material por la acción mecánica de un contacto sólido, líquido o gaseoso. Usualmente, el desgaste es perjudicial, pero en forma leve, como asentamiento puede ser beneficioso.

Cuando una falla es causada predominantemente por un tipo de desgaste, el análisis puede ser relativamente simple. Sin embargo, muchas fallas por desgaste resultan de una combinación de tipos o modalidades de desgaste.

Desgaste Adhesivo. El desgaste adhesivo, conocido también como rayadura, raspadura, agarro, etc, ocurre cuando dos superficies metálicas se deslizan una contra la otra bajo presión. Las proyecciones microscópicas o asperezas se unen a las caras deslizantes bajo muy alta presión local. Subsecuentemente las fuerzas deslizantes fracturan las uniones, desgarrando el metal de una superficie y transfiriéndolo a la otra. Esto da por resultado la formación de cavidades diminutas en una superficie y proyecciones diminutas en la otra, lo cual a su vez puede dar por resultado la formación de partículas de desgaste sueltas y estas pueden contribuir al desgaste abrasivo.

Desgaste Abrasivo. Es el desplazamiento de material de una superficie por contacto con proyecciones duras sobre una superficie de contacto o con partículas duras que se mueven con respecto a la superficie de desgaste. Cuando existen partículas duras, pueden ser atrapadas entre dos superficies

deslizantes y ocurre abrasión de una o ambas o se pueden in crustar y causar abrasión a la superficie opuesta. El desgaste de abrasión puede ocurrir en estado seco o en presencia de un líquido.

Desgaste por Erosión. Es el desgaste abrasivo que implica la pérdida del material de la superficie por contacto con un fluido que contiene partículas. El movimiento relativo entre la superficie y el fluido es esencial para este proceso y la fuerza sobre las partículas que en sí infligen el daño es aplicada cinéticamente. Aunque con más frecuencia el desgaste por erosión implica partículas sólidas, el tipo de erosión por impacto líquido es causado por gotas de líquido llevadas por una corriente rápida de gas. La erosión en la cual el movimiento relativo de partículas sólidas es casi paralelo a la superficie erosionada, se llama erosión abrasiva, en tanto que la erosión en la cual el movimiento relativo de particulas es casi normal hacia la superficie erosionada, se denomina erosión de impacto.

Desgaste por Corrosión. El desgaste por corrosión es un tipo de desgaste abrasivo en el cual la relación química o electroquímica con el medio contribuye de manera considerable a la velocidad de desgaste. En algunos casos, la relación química ocurre primero y es seguida por la remoción de productos de corrosión por acción mecánica (abrasión). Sin embargo la acción mecánica procede a la acción química y da por resultado la formación de partículas muy pequeñas de desechos - que subsecuentemente reaccionan con el medio.

Erosión-corrosión. La erosión-corrosión es un tipo de desgaste en el cual hay movimiento relativo entre una superficie y un fluido corrosivo (el cual también puede transportar partículas abrasivas), siendo la velocidad del desgaste directamente proporcional a la velocidad del movimiento relativo. Cuando están presentes partículas abrasivas, el desprendimiento del material se efectúa por contacto con las partículas.

Otra forma especial de erosión-corrosión, es la raedura (algunas veces conocida como oxidación por desgaste, oxidación por fricción o rozadura). Ocurre entre dos superficies que hacen contacto sujetas a deslizamiento repetido de poca amplitud, tal como vibraciones en presencia de oxígeno. El daño puede aparecer como picadura o surcos, con productos de corrosión (óxidos), en una o ambas superficies. La raedura es un proceso complejo y con frecuencia involucra una combinación de desgaste corrosivo, adhesivo y abrasivo. Como resultado de vibración, el desgaste por fatiga puede también estar

involucrado en la raedura.

Las fallas por servicio es un tipo especial de daño superficial debido al cual las partículas de metal se desprenden de una superficie bajo altos esfuerzos cíclicos de -- contacto, causando picadura o astilladura.

PAPEL DE LA FRICCIÓN EN EL DESGASTE

La fricción entre dos superficies en contacto es causada por las mismas condiciones de contacto que son básicas al proceso de desgaste. La fricción y el desgaste se inician ambos en puntos de contacto localizados. Es en estos contactos concentrados donde los altos esfuerzos causan fractura, cizallamiento o fluencia; fragmentos diminutos se pueden separar de la superficie para convertirse en desechos de desgaste. El proceso es complejo y se puede seguir o no o -- más de varios mecanismos, dependiendo de las fuerzas que actúan entre las superficies de contacto y el medio circundante, incluso el efecto de cualquier materia en forma de partículas del medio.

Características Superficiales. Cuando se coloca un cubo sólido sobre una superficie plana, una cara del cubo parece estar en contacto íntimo con la superficie plana. Sin embargo las superficies en sí tienen un cierto grado de rugosidad y ondulación; por consiguiente, el área efectiva de contacto entre la cara del cubo y la superficie plana (verdadera área de contacto) es la suma de un gran número de áreas -- diminutas donde puntos altos de las superficies opuestas hacen contacto una con otra. Las áreas individuales de verdadero contacto, son de aproximadamente 10^{-3} a 10^{-5} de pulg. de diámetro y están distribuidas aleatoriamente sobre el -- área de contacto aparente.

La rugosidad y ondulación de la superficie de piezas manufacturadas, tienen patrones geométricos distintivos características del proceso que produjo las piezas. La superficie de una flecha torneada está compuesta de lomos y surcos; -- la superficie de la pista amolada de un balero de bolas consisten de valles poco profundos, paralelos, en forma de U con lomos delgados entre ellos. La superficie de un contacto eléctrico con baño de oro, normalmente es una distribución de pequeñas superficies convexas que asemejan una masa de burbujas aglomeradas estrechamente. El tamaño y la configuración de estas características superficiales a escala -- fina determinan las condiciones reales de contacto entre superficies opuestas y lo que ocurre en estos puntos de contacto tiene una influencia importante en la fricción y el -- desgaste.

Las condiciones microscópicas de esfuerzo en los puntos de contacto se pueden describir más simplemente por la analogía de una esfera lisa sostenida por una superficie plana lisa. El esfuerzo resultante en el punto de tangencia es suficientemente alto para causar deformación elástica tanto de la esfera como de la superficie plana y el área de contacto diminuta se esparce hasta que el esfuerzo se reduce hasta un punto ligeramente inferior al límite elástico. Al aplicar una carga externa en dirección perpendicular a la superficie plana, el área de contacto aumentará aproximadamente en proporción al aumento en la carga admitida y los dos tercios de la potencia. Conforme aumenta la carga, el límite elástico de la superficie plana (que está relacionada con la dureza) se excede finalmente. Cuando se excede el límite elástico ocurre una abolladura permanente en la superficie. (esto es comparable a lo que ocurre en una prueba de dureza en la cual el penetrante es más duro que la superficie que se está probando).

Debido a la deformación de las áreas de contacto verdadero bajo carga es similar a la deformación del área bajo el penetrante en una prueba de dureza, la dureza de penetración es una propiedad del material que proporciona una medida aproximada de la resistencia al desgaste. Bajo condiciones de contacto similares, los materiales más duros generalmente exhiben mayor resistencia al desgaste, que los materiales más suaves.

Fuerza Friccional. Cuando un cuerpo sólido se desliza sobre otro, Los puntos altos de las superficies opuestas establecen contacto una con otra y (a) se deforman bajo el esfuerzo de contacto localizado o (b) se unen y luego se dividen. La fuerza friccional es una medida de resistencia al movimiento tangencial y es la suma de fuerzas necesarias para dividir los puntos altos unidos y deformar las no unidas. Conforme avanza el deslizamiento, se mantiene una fuerza friccional constante por la formación y división de muchas uniones diminutas entre las superficies.

Se ha sabido por mucho tiempo que en muchos sistemas de materiales la fuerza friccional entre dos superficies de contacto es proporcional a la carga normal y es independiente el área de contacto aparente. De acuerdo con la teoría moderna de la fricción, el área de contacto verdadero aumenta proporcionalmente con la carga y la fuerza friccional es proporcional a la carga y el área de contacto verdadero. Si la fuerza friccional es proporcional a la suma de las áreas de las juntas microscópicas que se están dividiendo (área

de contacto verdadero) resulta la siguiente relación simple:

$$F = SA \dots\dots\dots (Ec. 1)$$

donde F es fuerza friccional, en libras; S es la resistencia de cizallamiento o división del más débil de los componentes de la unión, en libras por pulgada cuadrada y A es el área de contacto verdadero, en pulgadas cuadradas.

La teoría de adhesión de la fricción supone que la adhesión ocurre en las uniones de contacto y que la fuerza friccional iguala la suma de las fuerzas requeridas para dividir estas uniones. El área de contacto real es inversamente proporcional a la dureza del material más suave y proporcional a la carga normal:

$$A = W/P \dots\dots\dots (Ec. 2)$$

Donde A es el área de contacto verdadero, en milímetros cuadrados; W es la carga normal (o fuerza de contacto) en kilogramos y P es la dureza de indentación (con frecuencia denominada en una prueba Vickers) en kilogramos por milímetro cuadrado. La ecuación 2 se puede combinar con la ecuación 1 para dar:

$$F = SW/p \text{ o } F/W = S/p \dots\dots\dots (Ec. 3)$$

Donde $S/p = \mu$, coeficiente de fricción. La fig. 1 muestra la relación entre W, la carga normal y F, la fuerza friccional sobre un cuerpo que se desliza a través de una superficie horizontal estacionaria.

Se puede observar de la ecuación para calcular el coeficiente de fricción $\mu = S/p$, que el coeficiente es más bajo cuando la dureza del miembro es más suave del par en contacto es alta con respecto a su resistencia de cizallamiento. Debido a que los tratamientos usuales que incrementan la dureza de un metal o aleación también aumentan su resistencia de cizallamiento, es raro encontrar una relación alta de dureza a la resistencia de cizallamiento en un solo metal o aleación. Se puede lograr una alta relación, no obstante, usando un material compuesto. En contactos eléctricos resistentes al desgaste, por ejemplo, se ha logrado un coeficiente bajo de fricción bañando el substracto duro con una capa muy fina de oro.

La ecuación $\mu = S/p$ es útil en el análisis de los fenómenos de fricción. Sin embargo, el factor S (resistencia de cizallamiento) es difícil de medir para superficies de con

tacto efectivo y por ello se observan amplias variaciones en el coeficiente de fricción para cualquier combinación de material dada.

MECANISMOS DEL DESGASTE ADHESIVO

El desgaste adhesivo verdadero se encuentra más frecuentemente en condiciones de contacto no lubricado o seco y cuando ambas superficies en contacto son metálicas. El desgaste adhesivo sí ocurre en contacto lubricado, pero en una escala muy reducida en comparación con el contacto no lubricado.

Se ha desarrollado un modelo matemático simple del desgaste adhesivo. Se basa en la suposición de que el desgaste ocurre por cizallamiento del área de contacto verdadero entre dos superficies de contacto y de que el área de contacto verdadero es una función del esfuerzo de fluencia o elasticidad de contacto de la superficie del material más suave. Así pues, cuanto más bajo sea el punto de fluencia, tanto mayor será el área de contacto verdadero para una carga real y mayor el desgaste. Además, debido a que cada contacto de aspereza durante el movimiento tiene una probabilidad estadística de producir una película de desgaste, el desgaste es proporcional a la distancia de deslizamiento total. Se ha derivado una ecuación simple sobre la base de estas premisas:

$$V = KlW/p \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde V es la pérdida de volumen en mm cúbicos; K es el coeficiente de desgaste; l es la distancia del deslizamiento en mm; W es la carga normal en Kg; y p es la dureza de indentación en Kg por mm cuadrado.

Se ha verificado experimentalmente que el desgaste es proporcional a la carga y la distancia del deslizamiento es inversamente proporcional a la dureza del material más suave. El principio de que el desgaste es proporcional a la carga es válido en tanto que el desgaste ocurra por un solo mecanismo. El aumentar la carga hasta el punto en el que cambia el mecanismo de daño superficial, puede estar acompañado de un cambio en la velocidad del desgaste de un orden de magnitud. El coeficiente de desgaste K, se ha interpretado como una medida de la probabilidad de que cada contacto de aspereza producirá una partícula de desgaste. Los coeficientes de desgaste determinados experimentalmente para varios pares de materiales, cubren una amplia gama de valores, pero para cada par hay un valor específico. En la tabla 1 se dan varios valores representativos de K, para el extremo de un cilindro que se desliza contra la superficie plana a 1.8 mts.

por segundo bajo una carga de 400 gramos, para varias combinaciones de materiales de cilindro y anillo.

DESGASTE ABRASIVO

El desgaste abrasivo ocurre cuando las partículas duras tales como rocas, arena o fragmento de ciertos materiales duros se deslizan o giran bajo presión a través de una superficie. Esta acción corta surcos para la superficie de una manera muy parecida a los surcos que produce una herramienta de corte.

Tipos de Desgaste Abrasivo. El desgaste abrasivo se puede definir como el desprendimiento de material de una superficie por acción mecánica de partículas abrasivas (duras) en contacto con la superficie. El tipo de desgaste abrasivo se puede clasificar generalmente como: (a) abrasión de escopleadura (b) abrasión de amoladura de alto esfuerzo y (c) abrasión de raspadura o erosión de bajo esfuerzo.

Abrasión de Escopleadura. El resultado de este tipo de desgaste abrasivo es el desprendimiento de grandes partículas de una superficie metálica. La superficie desgastada muestra grandes escopleaduras.

Abrasión por Amoladura de Alto Esfuerzo. Este tipo de abrasión por desgaste ocurre en la superficie de componentes usados para fragmentación de partículas abrasivas. Se cree que el desgaste es causado por esfuerzo compresivo concentrado en el punto de contacto abrasivo y que resulta de fluencia y fatiga plástica de componentes dúctiles y agrietamiento de componentes duros de la superficie del metal.

Abrasión o Erosión de Raspadura de Bajo Esfuerzo. El resultado de este tipo de desgaste abrasivo es la raspadura de la superficie del metal y las raspaduras usualmente son diminutas. El esfuerzo impuesto sobre la partícula abrasiva no excede la resistencia de trituración del abrasivo.

La acción de una partícula dura sobre la superficie bajo la influencia de una fuerza oblicua a la superficie generalmente se conoce como desgaste abrasivo. La interacción de la partícula de alta resistencia de trituración y la superficie, es muy parecida a la interacción de una herramienta de corte y una pieza de trabajo en el maquinado. Con un material dúctil, una partícula similar a una viruta continua de maquinado se desprende de la superficie por cada partícula abrasiva de corte. En un material quebradizo, se desprenden muchas partículas durante un solo encuentro con una partícula abrasiva. Los parámetros que son importantes en el corte de metales de

ben ser importantes también en el desgaste abrasivo. Sin embargo, en contraste a la mayor parte de las operaciones de corte de metales, es difícil definir con precisión la configuración de las caras de corte de las partículas abrasivas debido a su forma aleatoria.

Mecanismo de Desgaste Abrasivo. El desgaste abrasivo difiere del desgaste adhesivo, que ocurre entre dos superficies. En el desgaste adhesivo, las asperezas de contacto en las superficies adyacentes se unen entre sí y la interacción resultante puede conducir al desprendimiento de material de la superficie. En el desgaste abrasivo, el material se desprende de la superficie por la acción de corte de partícula abrasiva. La dureza de la partícula abrasiva debe exceder la de la superficie desgastada para que ocurra el corte. Cuando la resistencia de trituración del abrasivo se excede, el método para desprender el material puede ser un tanto diferente de una simple acción de corte.

El componente de fuerza que es normal hacia la superficie y actúa sobre la partícula dura, causa penetración de la superficie por la partícula. El componente de fuerza que es paralelo a la superficie ocasiona que ocurra movimiento tangencial relativo entre la partícula y la superficie. Esto da por resultado, cizallamiento, surcado o desbarbado de la superficie lo cual produce canales. En superficies dúctiles y partículas duras con caras de bordes agudos, ocurre el cizallamiento y el metal se desprende de una manera que se asemeja a una viruta continua de maquinado. Las partículas de caras lisas o redondas, tienden simplemente a arar una superficie dúctil. Durante el arado, el material de la superficie se empuja transversalmente en la dirección del movimiento de la partícula para formar un canal. La mayor parte del material desplazado se apila a lo largo de los bordes de la canal en lugar de ser retirado de la superficie.

La severidad del desgaste abrasivo en un material y -- abrasivo dado varía notablemente, dependiendo de la magnitud de las fuerzas que actúan. Cuando las fuerzas son débiles, la velocidad del desgaste por partícula abrasiva, también es baja este mecanismo también se conoce como raspadura (abrasión de bajo esfuerzo) cuando están involucradas partículas fijas o sueltas. En la terminología de taller, este tipo de abrasión se conoce como pulido. Se denomina erosión cuando partículas fluidas sueltas atacan una sola superficie. Durante la erosión, la velocidad del desgaste general puede ser alta si la velocidad de flujo de las partículas abrasivas es alta. Cuando la magnitud de las fuerzas que actúan es más alta, el des

gaste será más rápido y el mecanismo se conoce como escoplada dura, ya sea que estén involucradas partículas fijas o sueltas.

Cuando están presentes partículas sueltas entre las dos superficies deslizantes (partículas sueltas atrapadas), este tipo de abrasión se refiere a asentado en términos de taller. Este desgaste de tres cuerpos, de partículas sueltas desprende menos material por encuentro que el de dos cuerpos y partículas fijas debido a que las partículas sueltas tienden a girar sin cortar aproximadamente el noventa por ciento del tiempo. Si el esfuerzo aplicado al abrasivo es tan alto como para exceder su resistencia de trituración, entonces este tipo de abrasión se conoce como abrasión de amoladura. Aquí el abrasivo se está amolando y fue de tamaño pequeño inicialmente. Esta abrasión de amoladura de alto esfuerzo no se debe confundir con el amolado de taller, el cual se clasifica como abrasión de escopleaduras.

Cuando ocurre trituración del abrasivo, como en la abrasión de amoladura, el mecanismo del desprendimiento del material puede ser un tanto diferente del simple mecanismo de corte. El abrasivo quizá tenga poca oportunidad de rodar o cortar antes de que ocurra la trituración y el efecto principal sobre la superficie desgastada sería entonces debido al esfuerzo compresivo concentrado en el punto de contacto abrasivo. La superficie de un material dúctil será desplazado plásticamente por el abrasivo en la forma de una impresión de dureza de indentación.

Con muchas impresiones estrechamente espaciadas, el material puede fluir de atrás a adelante y fallar finalmente por fatiga. Hay también la posibilidad de cierta acción de corte por el abrasivo de ruptura siendo la fuerza de corte suministrada por la energía elástica almacenada en la partícula comprimida. En la superficie del material duro ocurrirá poco desplazamiento plástico. En esta situación el desgaste puede ocurrir como resultado de un agrietamiento frágil de la superficie del material (astilladura). Hay también la posibilidad de agrietamiento subsuperficial debido a fatiga bajo esfuerzo repetido, como ocurre en el desconchamiento de pistas de cojinetes de bolas.

Métodos Analíticos. Todos los tipos de desgaste abrasivo involucran básicamente el mismo mecanismo, excepto quizá cuando se tritura la partícula abrasiva. La penetración y la canaladura de la superficie, varía dependiendo de la ductilidad del material de la superficie y la configuración de la partícula.

Los medios por los cuales la fuerza se aplica a la partícula abrasiva, se pueden dividir en dos categorías: (a) la aplicación mecánica directa de fuerza por las superficies cuando están involucradas partículas atrapadas sueltas; y (b) la aplicación cinética de fuerza resultante de la energía cinética de una partícula abrasiva que fluye, al encontrar una superficie.

La primera categoría de aplicación de fuerza se experimenta en abrasión de escopleadura, abrasión de amoladura y abrasión de raspadura. La segunda categoría se experimenta en abrasión de erosión y pertenece al manejo de abrasivos en sistemas neumáticos o líquidos, chorro de arena o erosión de polvo en aspas de compresores de turbina de gas. La segunda categoría de aplicación de fuerza probablemente no sea tan común como la primera. Sin embargo, se considerará aquí porque se ha realizado bastante trabajo analítico para esta categoría. Hay una expresión analítica definitivamente diferente del desgaste abrasivo para cada categoría de aplicación de fuerza.

Teoría del Desgaste Abrasivo con Aplicación Mecánica. Directa de fuerza a las partículas abrasivas. Ha habido varias investigaciones de desgaste abrasivo que implican la aplicación mecánica directa de fuerza a las partículas abrasivas. Hay el acuerdo general de que la teoría simplificada resulta en la siguiente expresión diferencial de velocidad de volumen de desgaste por longitud unitaria de desplazamiento, q :

$$q = dQ/dl, \text{ o } q \propto W/p \quad (\text{Ec. 5})$$

donde Q es el volumen deslavado por abrasivo, l es la distancia deslizante, W es carga y p es dureza de la superficie desgastada. Si qt es la tasa de tiempo de desgaste, entonces $qt = qv$, donde v es la velocidad de deslizamiento. La fig. 2 es una representación idealizada de este tipo de desgaste.

La ecuación 5 supone que las partículas abrasivas son más duras que la superficie que se está desgastando y que la partícula abrasiva es rígida (no triturada). La ecuación 5 es válida para el tamaño de partícula abrasiva, D superior a 70 micras. (para D inferior a 70 micras, q también depende de D ; la relación entre q y D es diferente no obstante porque con partículas fijas ocurre la oclusión y con partículas sueltas los fragmentos de desgaste son aproximadamente del mismo tamaño que las partículas abrasivas). La relación de

partículas abrasivas que cortan con respecto a las que no cojtan y la forma de las partículas, son importantes.

La ecuación 5 se aplica a metales recocidos. La resistencia de desgaste (l/q) de aceros endurecidos es una función de su límite elástico, así como de su dureza. Sin embargo, en este caso, la resistencia de desgaste varía como potencias fraccionarias bajas de estos parámetros. La fatiga de la superficie también puede ser de importancia. Para materiales frágiles, pueden ocurrir tasas de desgaste más altas debido a la posibilidad de deformación de fragmentos de desgaste que tenga un volumen total mayor que el volumen barrido por la partícula abrasiva. Sin embargo, los materiales frágiles siguen por lo general la relación de la ecuación 5, aún cuando se encuentren tasas más altas de desgaste.

La presencia de vapor de agua en la atmósfera o la presencia de un fluido lubricante sobre la superficie desgastada al parecer por desechos de desgaste de lavado, procedentes del sistema y por consiguiente incrementan la efectividad de la acción de abrasión.

La ecuación 5 no es necesariamente válida para abrasión de amoladura, es decir, cuando se están triturando partículas abrasivas pequeñas. Una expresión teórica de la tasa de desgaste no existe actualmente para la abrasión de amoladura. La abrasión de amoladura es común en el molino de bolas.

TEORIA DEL DESGASTE ABRASIVO CON APLICACION CINETICA DE FUERZA

Partículas abrasivas (erosión). En el desgaste abrasivo en el cual se aplica fuerza cinética a la partícula abradiva, la energía cinética de la partícula se disipa sobre una superficie dúctil en trabajo plástico, que causa indentación o cizallamiento de la superficie. Cuando las partículas simplemente mellan la superficie, se extruyen exfoliaciones semejantes a capas de la superficie. Sin embargo, cuando ocurre el cizallamiento, el material es escopleado de la superficie. En materiales frágiles, la energía cinética de la partícula se disipa en propagación de grieta, lo cual causa astillamiento de la superficie.

El volumen Q , desprendido de una superficie dúctil dedicada a una masa m de partículas abrasivas angulares, que tienen una velocidad, V , se da en la ecuación 6.

$$Q = mv^2 / 8p \cdot f(\alpha) \quad (\text{Ec. 6})$$

donde v es la velocidad de aproximación de una partícula; p es la dureza de la superficie desgastada y $f(\alpha)$ es $(\sin 2\alpha - 3 \sin \alpha)$ para $\alpha \geq 18.5^\circ$ (α es el ángulo de impacto de la partícula, medida en relación de la superficie desgastada).

Si m se expresa como la masa que impacta una superficie - por unidad de tiempo, estableciendo así una tasa de tiempo, v se convierte en qt , es decir la tasa de tiempo de desgaste. La figura 3 es una representación idealizada de este tipo de desgaste.

El volumen Q , desprendido de una superficie frágil bajo condiciones de impacto similares, pero no necesariamente reg tringidos a partículas angulares se da en la ecuación 7.

$$Q \propto \frac{m (v \sin \alpha - K)^2}{e} \quad (\text{Ec. 7})$$

donde K es la velocidad de impacto a la cual se calcula justamente el límite elástico y " e " es la energía necesaria para desprender un volumen unitario de material de la superficie. Los valores de K y e en la ecuación 7 son.

$$K \propto P_e^{3/2} (1/D)^{1/2} [(1-\nu_1)/E_1 + (1-\nu_2)/E_2]^2 \quad (\text{Ec. 7a})$$

$$e \propto P_e^2 / E_2 \quad (\text{Ec. 7b})$$

donde P_e es el límite elástico, ν es la relación de Poisson E es el módulo de elasticidad, D es el tamaño de las partículas abrasivas y los índices 1 y 2 se refieren a la partícula y a la superficie, respectivamente.

La ecuación 7 supone que la partícula penetra en la superficie hasta una profundidad que es solo una fracción de su propio diámetro. Para partículas de bordes agudos, el valor de K resultante será menor. A altas velocidades, se pueden romper fragmentos grandes de la superficie, resultando un valor bajo de e .

La ecuación 6 predice razonablemente bien las tenden-cias de los abrasivos de carburo de silicio sobre el acero 1020 y del polvo de sílice sobre el acero 1050. Sin embargo sobrestima Q a ángulos alfa altos; este error se debe a la falta de consideración de las propiedades elásticas de las partículas abrasivas y la superficie desgastada. La erosión-del vidrio con granalla de acero está en buen acuerdo con la ecuación 7. Estas exposiciones no toman en cuenta la fatiga.

de la superficie, que puede ser de importancia.

Desgaste Lubricado

Un medio importante para reducir el desgaste, es la lubricación. No sólo reduce el consumo de energía necesaria para vencer la fricción, sino también protege las superficies de contacto rodante y deslizante del desgaste excesivo. Aún con lubricación ocurre el desgaste.

En las superficies lubricadas, el proceso de desgaste es ligero y genera desechos finos de partículas del tamaño de una o dos micras. En condiciones lubricadas predomina el desgaste abrasivo. El examen al microscopio electrónico de las superficies desgastadas de ensamblajes lubricados usualmente revela una multitud de arañes finos orientados en la dirección del movimiento relativo. El desecho fino que se genera por abrasión generalmente se encuentra suspendido en el aceite o grasa. En dispositivos que usan lubricación de aceite circulante, se ha aprovechado el hecho de que el desecho de desgaste se puede analizar por espectroscopía y que el deterioro del dispositivo a causa del desgaste se puede diagnosticar a partir de estos resultados. Esta técnica se usa para vigilar la condición de componentes vitales en motores de aeronaves y locomotoras.

Modalidades de Lubricación

Hay varias modalidades básicas de lubricación. En todas ellas las superficies en contacto están separadas por un medio lubricante, el cual puede ser sólido, semisólido o líquido bajo presión o gaseoso. La lubricación hidrodinámica es un sistema en el cual la forma y el movimiento relativo de las sustancias deslizantes causan la formación de una película fluida que tenga suficiente presión para separar las superficies. La lubricación hidrostática es un sistema en el cual el lubricante se suministra bajo presión exterior suficiente para separar las superficies opuestas por una película fluida. La lubricación elastohidrodinámica es un sistema en el cual la fricción y el espesor de la película entre los dos cuerpos en movimiento relativo determinan por las propiedades elásticas de los cuerpos, en combinación con las propiedades viscosas del lubricante a la presión prevalente, la temperatura y la velocidad de cizallamiento. La lubricación de película seca (película sólida) es un sistema en el cual una capa de lubricante sólido separa las superficies opuestas y el lubricante en sí es el que se desgasta.

Lubricación Hidrodinámica. Se puede utilizar la dinámica de fluidos para definir y predecir la capacidad de carga,

fricción y generación de calor en una película fluida cuando prevalece la lubricación hidrodinámica, hidrostática o el as hidrodinámica.

La viscosidad del lubricante es importante para determinar las características de operación y se prevé desgaste o no. La presión generada en la película del lubricante líquido -- por el proceso de cizallamiento, soporta la carga y mantiene separadas las superficies sólidas. Conforme aumenta la carga, aumenta la temperatura de la película, se reduce la velocidad de cizallamiento, disminuyendo el espesor de la película y las superficies sólidas se acercan entre sí. Cuando el espesor de la película lubricante se acerca a las di mensiones de la aspereza superficial, el contacto empieza y se puede detectar la evidencia del desgaste. Para condiciones hidrodinámicas, el espesor de la película, T , o acerc a miento t depende de las superficies μ y v de la relación:

$$t = \left(\frac{\mu v}{W} \right)^{1/2} \quad (\text{Ec. } 8)$$

donde μ es la viscosidad del lubricante a temperatura de la chumacera, v es la velocidad de deslizamiento y W es la carga de la chumacera. Una chumacera que opera bajo condiciones hidrodinámicas, es un tanto autorregulada. Es decir, con una película lubricante de espesor establecido. El aumento de la velocidad incrementará la velocidad de cizallamiento de la película de aceite y el aumento resultante en la entrada de energía aumentará la temperatura de la película de aceite, resultando una disminución de la viscosidad.

La lubricación hidrostática, usada frecuentemente en chumaceras de presión de alta velocidad, es similar a la etapa de película gruesa de la lubricación hidrodinámica en cuanto que superficies opuestas se deslizan sobre una capa relativamente gruesa de lubricante. Sin embargo, en la lubricación hidrostática, la película se mantiene por presión fluida procedente de una fuente externa y por una tasa controlada o fija de fuga entre las dos superficies. Debido a que la mayor parte de las chumaceras hidrostáticas se diseñan de modo que tengan crestas de presión fluida igualmente espaciadas alrededor de la superficie, la flecha se coloca más cerca del centro de la chumacera, que en la lubricación hidrodinámica y el espesor de la película es aproximadamente igual para cualquiera dos puntos alrededor de la chumacera. Una de las ventajas principales de la lubricación hidrostática sobre la hidrodinámica es que con la segunda, la flecha se sostiene con una película total a cualquier velocidad. De esta manera se evita la película delgada y la lubricación límite al arranque y el paro, con el aumento de

fricción y desgaste consiguiente. Además se puede tener lubricación de película gruesa con lubricantes de baja viscosidad - que en una chumacera hidrodinámica no podría crear suficiente presión de la película para soportar la carga de la flecha.

Lubricación elastohidrodinámica. Bajo condiciones elastohidrodinámicas, típicas de cojinetes de bolas y rodillos el espesor mínimo de las películas lubricantes, t_{min} , sigue aproximadamente la relación:

$$t_{min} \approx (\mu \alpha)^{0.7} (N^{0.7} / W^{0.09}) \quad (\text{Ec. 9})$$

donde μ , es la viscosidad del lubricante a la temperatura de la chumacera, α , es el coeficiente de aumento de la viscosidad según la presión, N , es la velocidad rotacional y W es la carga de la chumacera.

Bajo condiciones de contacto, el espesor de la película no es tan sensible a la carga como la velocidad rotacional. Un aumento en la carga produce un aumento en la deflexión - elástica en el área de contacto y distribuye la presión de - contacto sobre una área mayor. Debido a que el contacto rodante implica línea inicial resulta un esfuerzo de contacto localizado muy grande, necesitando el uso de materiales de apoyo de alta resistencia a punto cedente (aceros para baleros tratados térmicamente). Las películas lubricantes extremadamente delgadas requieren acabados superficiales muy lisos para - lograr la lubricación elastohidrodinámica verdadera. Sin embargo, si ocurre desgaste en baleros de bolas y rodillos.

El desgaste por contacto rodante puede ser muy insidioso progresando con un mejoramiento en el acabado de la superficie y sin pérdida de esfericidad, pero con suficiente pérdida de material para causar pérdida de precarga vital, como puede ocurrir en baleros. El desconchamiento o picadura es otro tipo más grave de desgaste que puede ocurrir en aplicaciones de contacto rodante. Este es un tipo de daño superficial que se puede agravar por sí mismo y que ocasiona que el funcionamiento de los baleros de elementos giratorios se vuelvan crecientemente ásperos y finalmente puedan dar como resultado la fractura de los elementos rodantes.

La lubricación límite ocurre en gran número de dispositivos mecánicos, porque con frecuencia no se pueden lograr las condiciones que requiere la lubricación de película total o siquiera la lubricación de película delgada usando una sustancia fluida sin utilizar un sistema complejo y costoso de

lubricación. Por ejemplo, un balero lubricado con grasa sujeto a movimiento oscilatorio intermitente bajo fuerte carga funciona casi exclusivamente bajo lubricación límite. Bajo estas condiciones, entran en contacto puntos altos o asperezas de la superficie, pero la adhesión se evita mediante películas delgadas, suaves y sólidas. Estas películas se cortan fácilmente y evitan el desprendimiento del metal o la rayadura fuerte de las superficies.

Las películas límite tienen una amplia variedad de formas y composiciones. Los experimentos han mostrado que una sola capa de ácido esteárico lubrica y evita la adhesión de asperezas. En condiciones de funcionamiento práctico no obstante, las películas límite activas en maquinaria son productos de reacción complejos del lubricante, la atmósfera y los componentes en la superficie de soporte. Aunque no existen condiciones de lubricación de película completa, con la adición de lubricante la velocidad de desgaste de las superficies de contacto se pueden reducir hasta en un 5% de la velocidad del desgaste sin lubricación.

La temperatura de la superficie probablemente tenga la mayor influencia sobre la eficiencia de la lubricación límite. La energía friccional produce calor en la superficie deslizante. Con lubricación límite, generalmente no hay suficiente flujo de lubricante para disipar el calor en comparación con la lubricación hidrodinámica, la cual es muy efectiva para disipar el calor de la fricción. Hay varias consecuencias posibles del calentamiento friccional durante la lubricación límite. Bajo lubricación de presión extrema (EP), los aditivos químicos del lubricante reaccionan con superficies metálicas para formar productos de reacciones suaves y sólidas los cuales presumiblemente son los agentes que impiden la adhesión metálica y el daño de la superficie. El calor incrementa la velocidad de la reacción de manera que en los contactos de aspereza, donde las temperaturas superficiales locales son más altas. La velocidad de la reacción es máxima y se provee un lubricante sólido en los puntos en los que el potencial de adhesión es el más alto. Así mediante ataque químico modificado por la temperatura superficial localizada, se evita que ocurra desgaste severo -- por sustitución de corrosión leve.

Efecto Sobre las Características Superficiales

Las características de una superficie que se ha desgastado bajo condiciones lubricadas, son diferentes a las que se encuentran en una superficie que ha sufrido desgaste sin lubricación. El examen de superficies deslizantes mediante el microscopio electrónico de alta amplificación revela que

cuando esta presente un lubricante ocurre desgaste por deformación de las asperezas superficiales más altas. Más bien que por escoriación y rotura, que predominan en el desgaste no lubricado. Por ejemplo, cuando se sujeta una superficie amolada a desgaste lubricado ligero, los riscos superficiales resultantes de la acción abrasiva de partículas duras en la rueda de amolar, entran en contacto con la superficie opuesta y se alisan. Los riscos más altos entran primero en contacto y se sujetan a grandes esfuerzos de contacto que causan flujo plástico. Cuando las crestas de los riscos se deforman, frecuentemente se producen lenguas delgadas de metal extruido que subsecuentemente se rompen, formando partículas muy finas de desecho de desgaste. De esta manera, la superficie se nivela gradualmente o se alisa conforme entran más y más riscos en contacto.

En superficies pulidas o asentadas, el desgaste lubricado produce un patrón de microrasguños extremadamente finos que frecuentemente son invisibles salvo con el microscopio electrónico. El examen de estos microrasguños revela que son causados por deformación plástica y no por labrado ni maquinado. La deformación parece ser el resultado de contacto en asperezas duras de la superficie de contacto o por desecho fino. Cada rasguño usualmente es una canal de fondo plano y lados muy pendientes. Los riscos producidos por este proceso de rasguñamiento se desgastan lo cual produce desecho fino de manera muy parecida en que se genera desecho de desgaste de superficies amoladas.

Lubricantes

Casi cualquier película superficial puede obrar como lubricante, evitando la soldadura fría de asperezas en las superficies opuestas o permitiendo que las superficies opuestas se deslicen una con respecto a la otra con una fuerza friccional inferior a la que prevalecerá si no estuviera presente la película. (En algunas ocasiones las películas de gas pueden obrar como lubricantes). Una de las funciones de un lubricante es disipar el calor generado por dos superficies que se deslizan bajo presión de contacto. Los lubricantes líquidos pueden disipar el calor mejor que los sólidos o semifluidos, pero en todos los tipos las propiedades de corte del lubricante son críticas para su rendimiento.

Propiedades de los Lubricantes. Los lubricantes líquidos mantienen la separación de superficies opuestas mediante presión dentro de la película, la cual opone la fuerza de

contacto. Esta presión se puede generar dentro de la película, usualmente como resultado de la forma de las superficies opuestas, o el líquido puede ser forzado entre las superficies opuestas por presión proveniente de una fuente externa. Cualquiera que sea el medio de crear presión dentro de la película, las superficies opuestas se deslizan sobre un cojín de líquido. La fricción y el desgaste son influidos directamente por el espesor y las propiedades de viscosidad del líquido. Cuando es apropiado el uso de un lubricante de alta viscosidad usualmente da por resultado una película relativamente gruesa y una velocidad de desgaste baja. Sin embargo, las velocidades altas de deslizamiento no se pueden avenir con una película viscosa porque el calor excesivo generado dentro de la película ocasiona que se vuelva menos viscosa y se descomponga químicamente.

La lubricación de película total, como la que ocurre en condiciones hidrostáticas o hidrodinámicas, efectivamente separa las asperezas de las superficies opuestas, en tanto que la lubricación de película delgada y límite permite el contacto de aspereza. La diferencia entre estas tres condiciones de lubricación líquida se ilustra esquemáticamente en la figura 4.

Algunos tipos especiales de lubricantes, límite, más notablemente los lubricantes de presión extrema (EP), reaccionan con una superficie metálica, frecuentemente a altas temperaturas, para producir una película monomolecular en la superficie. Esta película muy delgada "contamina" las superficies en contacto y evita el contacto de metal a metal o la adhesión. Los lubricantes de presión extrema frecuentemente contienen componentes extremadamente reactivos que reforman la película intensamente si esta se desprende de una de las superficies. La formación de película de este tipo es en efecto, corrosión; cuando no se controla o cuando la película se raspa frecuentemente y se reforma, puede resultar el deterioro de la superficie.

Los lubricantes de la película sólida deben ser adherentes para que sean efectivos: de otra manera, permiten el contacto de metal a metal o introducen partículas indeseables que giran y se deslizan dentro de la unión. Cuando se puede mantener dentro de ella, el grafito y el disulfuro de molibdeno hacen buenos lubricantes, porque se controlan fácilmente en ciertas direcciones cristalográficas. Las películas de óxido inherente, duras tales como Fe_2O_3 anodizado en aluminio, resisten el desgaste porque resisten la penetración y no se unen con la mayor parte de las superficies en contacto.

Los aceites lubricantes son sustancias orgánicas relativamente fluidas que se usan para reducir el coeficiente de fricción en dispositivos mecánicos. Están disponibles en una amplia variedad de viscosidades y pueden estar mezclados o contienen aditivos para hacerlos adecuados a usos específicos. En general, las sustancias lubricantes que son fluidas a 20°C se denominan aceites; las sustancias que son sólidas o semifluidas a 20°C, se denominan grasas.

Los aceites se derivan del petróleo (aceites minerales) o de plantas o animales (aceites fijos). Los aceites minerales se clasifican de acuerdo con el origen (tipo de crudo), proceso de refinación (destilado o residual) y uso comercial. Los productos comerciales de base de aceite mineral consisten principalmente de carbohidratos (aunque los crudos de base de nafteno son insaturados predominantemente) en la forma de moléculas de cadena o de anillo, que son químicamente inactivos y no tienen cabezas polares. Estos productos comerciales pueden contener o no ceras, compuestos volátiles, aceites fijos y aditivos de uso especial. Los aceites y grasas fijos difieren de los aceites minerales porque (a) consisten de una radical de alcohol y una radical de ácido graso, (b) pueden reaccionar con un álcali (hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, por ejemplo) para formar glicerina o jabón, (c) no se pueden destilar sin descomponerse, y (d) contienen 9 a 12.5% de oxígeno. Todos los aceites fijos son insolubles en agua, y excepto el aceite de recino, son insolubles en alcohol a temperatura ambiente.

Generalmente se considera que los aceites fijos tienen mayor "aceitosidad" que los aceites minerales. Aceitosidad es un término que describe la propiedad relativa de cualquier lubricante de actuar como lubricante limítrofe. Los experimentos de difracción electrónica han mostrado que las moléculas del agente lubricante efectivo o sea un ácido graso de cadena larga de peso molecular alto, como el ácido esteárico o el ácido oleico, se adhieren a una superficie metálica por adhesión polar y se mantienen de manera muy parecida a los hilos de una alfombra de pilotes, como se ilustra en la figura 5., lo cual da por resultado una capa superficial de alta adhesión, alta resistencia a los esfuerzos por contacto y baja resistencia al cizallamiento lateral a lo largo de la superficie.

La grasa lubricante se define como un producto sólido a semifluido que consiste de una dispersión de un agente de espesamiento en un lubricante líquido. En términos más prácticos, la mayoría de las grasas son mezclas estabilizadas de aceite mineral y jabón metálico. El jabón generalmente es un compuesto de calcio, sodio o litio y está presente en forma de fibras cuyo tamaño y configuración son características de

la radical metálica en el compuesto de jabón.

Los lubricantes sólidos, que son sólidos con propiedades lubricantes, se pueden mantener entre dos superficies en movimiento para reducir la fricción y el desgaste. Numerosos sólidos inorgánicos y compuestos orgánicos, así como ciertos materiales compuestos, se pueden clasificar como lubricantes sólidos. El bisulfuro de molibdeno, grafito y politetrafluoretileno (TFE) son los lubricantes sólidos de uso más común.

Aunque los lubricantes sólidos se pueden aplicar para lograr la simplificación del diseño o la reducción del peso usualmente se adoptan debido a su buena estabilidad a (a) temperaturas elevadas, (b) en ambientes químicamente activos y (c) cuando se exponen a radiación nuclear.

Los lubricantes sólidos también proporcionan ciertas ventajas en aplicaciones al alto vacío, aeroespaciales y criogénicas, donde los líquidos se evaporarían o congelarían.

Fallas de Lubricantes que Conducen al Desgaste

En los dispositivos que dependen de los lubricantes para combatir la fricción y evitar el deterioro por desgaste, la falla del lubricante puede ser desastrosa. La mayoría de las fallas de los lubricantes ocurre por (a) descomposición química, (b) contaminación, (c) cambios de las propiedades ocasionados por calentamiento excesivo o (d) pérdida total de flujo o flujo inadecuado de un fluido, bajo presión, hacia las áreas lubricadas. Los aceites y grasas lubricantes pueden fallar por cualquiera de los procesos mencionados únicamente. Sin embargo, en la mayoría de los casos de descomposición química, la contaminación y la temperatura, están todas involucradas o interrelacionadas.

En general los lubricantes de película sólida fallan por remoción mecánica de capas microscópicamente delgadas. El desecho del desgaste, que consiste principalmente de partículas de lubricante, se genera por la acción de deslizamiento de un borde agudo contra la película adherida sobre una superficie de contacto. El borde agudo cizalla una capa de la película del sustrato. El contacto entre un elemento rodante y un resaca agudo puede astillar la película, lo cual inicia una falla más extensa. Este proceso da por resultado final una falta de estabilidad dinámica o en rozamiento o atascamiento de superficies metálicas en contacto.

La contaminación del lubricante con agua o sustancias químicas reactivas pueden conducir a la descomposición o cor-

rosión de las superficies de contacto o a ambas. La contaminación con sustancias abrasivas, especialmente cuando el tamaño de las partículas de contaminante son aproximadamente del mismo tamaño que el espesor de la película lubricante.

Debido a su naturaleza química, los aceites fijos son especialmente susceptibles a alteración química por alcalisis - (formación de jabón) por reacción química directa con los ácidos grasos en aceites fijos. Esta reacción altera la naturaleza del lubricante y en consecuencia, sus propiedades lubricantes.

La viscosidad de los aceites minerales, aceites fijos y grasas se afecta tanto por temperatura como por presión. Un aumento en la presión causa un incremento en la viscosidad, aunque el efecto no es importante por lo general excepto a muy altas presiones. Contrariamente cualquier cambio en la temperatura tiene un efecto muy importante en la viscosidad.

Los aceites que contienen cantidades sustanciales de compuestos volátiles pueden perder estos componentes por evaporación cuando las temperaturas de operación son demasiado altas. Este proceso no solo altera la viscosidad sino también torna la naturaleza química del aceite, cambiando así otras propiedades.

Temperatura de Transición. Cuando se proporciona lubricación limítrofe mediante jabones metálicos suaves (estearato de hierro, por ejemplo) el aumento de la temperatura de la superficie puede dar por resultado un aumento notable del coeficiente de fricción y un cambio repentino de la velocidad de desgaste leve a severo. La temperatura a la cual ocurre este cambio (temperatura de transición) es el punto en el cual el jabón desorbe de la superficie metálica y no proporciona una película superficial adherida continua. Las temperaturas de transición generalmente se encuentra dentro de la gama de 120 a 250°C, dependiendo del lubricante y de la composición química del substrato metálico. Los lubricantes de presión extrema funcionan por reacción con la superficie metálica más bien que por absorción de componentes en el lubricante y frecuentemente se usan como sustitutos para lubricantes limítrofes del tipo de jabón cuando las temperaturas sobrepasan la temperatura de transición.

Prevención de Fallas del Lubricante

Frecuentemente se puede encontrar el origen de la falla del lubricante en la selección de un lubricante inapropiado. Los aceites lubricantes de petróleo existen en una amplia variedad de fórmulas, con una variedad igualmente amplia de

propiedades especiales. Cuando estas propiedades no se pueden obtener mediante técnicas de refinación comunes o son obtenibles solamente a muy alto costo por refinación, tales propiedades se imparten al lubricante mediante aditivos.

Los aditivos del aceite pueden servir para mejorar una o más de las propiedades de la base de aceite para impartirle características de rendimiento completamente nuevas o para reducir la velocidad a la cual ocurren cambios indeseables durante el servicio. Algunos de los aditivos más comunes incluyen:

1. **Mejoradores del índice de viscosidad.** Estas sustancias reducen el efecto que tiene la temperatura sobre la viscosidad, haciendo el aceite más viscoso a alta temperatura que la que tendría sin el aditivo.
2. **Depresores de Punto de Vaciado.** Estas sustancias hacen el aceite que contiene cera menos viscoso a temperaturas bajas inhibiendo el crecimiento y la coalescencia de cristales de cera suspendidos en el aceite.
3. **Desespumantes.** Estos aditivos promueven la coalescencia de burbujas de aire diminutas atrapadas en burbujas mayores, que se pueden elevar a la superficie y colapsarse.
4. **Agentes Humificadores y Emulsificadores.** Estos aditivos permiten que el aceite desplace agua de las superficies metálicas o absorba el agua como una emulsión estable, promoviendo así la formación de la película de aceite sobre una superficie metálica.
5. **Inhibidores de Oxidación.** Estos combaten la oxidación del aceite mismo ya sea interrumpiendo la cadena de reacciones químicas que conducen al deterioro o desactivando las superficies metálicas catalíticas.
6. **Detergentes y Dispersantes.** Ampliamente usados en lubricantes para motores de combustión interna, estos aditivos combaten la formación de cieno y barniz.
7. **Inhibidores de Corrosión.** Los aditivos en esta clasificación se usan para reducir y evitar la corrosión de superficies lubricadas por contaminantes en el aceite, tales como oxígeno, agua, ácidos y productos de combustión.

8. **Mejoradores de Propiedad Lubrificante.** Esta categoría incluye una variedad de aditivos destinados a reducir la fricción (especialmente bajo lubricación límite), acelerar un proceso de "asentamiento", refuerzan la resistencia de la película o proporcionan lubricación bajo altas presiones de contacto.

Diseño Mecánico. Ciertos tipos de fallas de lubricantes se pueden evitar mediante cambios en el diseño del dispositivo en sí o en el diseño del sistema de lubricación. La escasez de lubricante en un balero causada por flujo inadecuado o por obstrucción de los conductos de aceite, se puede corregir algunas veces aumentando el diámetro de tales conductos. Frecuentemente un aumento o una reducción del claro entre las superficies deslizantes permitirá que el lubricante funcione más eficazmente. Se pueden usar blindajes, cubiertas y sellos para evitar contaminación del lubricante a partir de -- fuentes externas. En otros casos la filtración o absorción se puede obtener mediante dispositivos incorporados en el sistema para eliminar contaminantes indeseables.

Desgaste no Lubricado

La adhesión del metal y la soldadura fría caracterizan el proceso de desgaste en ausencia de lubricante. Solo cuando se mantienen superficies metálicas en un ambiente de vacío ultra alto y se limpian con un haz electrónico, son "no lubricados" realmente. Bajo estas condiciones, la soldadura fría de las superficies puede ocurrir inmediatamente a contacto.

Análisis de fallas por Desgaste

Hay tres fuentes de evidencia que conducen a un análisis exacto de una falla por desgaste: La superficie desgastada, el ambiente de operación y el desecho del desgaste.

El daño de la superficie puede variar desde el pulido o bruñido hasta desprendimiento de un volumen relativamente grande de material. El examen de la superficie desgastada puede proporcionar mucha información, por ejemplo, la cantidad de material removido, el tipo de daño (rayadura, escopla dura, surcado, adhesión picadura, corrosión, astilladura, o simple penetración), la existencia y carácter de las películas de superficie, ya sea que ciertos constituyentes estén -- siendo atacados preferencialmente la dirección del movimiento relativo entre una superficie desgastada y partículas de abrasión o si éstas se han incrustado en la superficie.

Procedimiento para el Análisis del Desgaste. En general Los pasos que comprenden el análisis de una falla por desgaste, son los siguientes:

1. Identificar los materiales efectivos de la pieza desgastada, ambiente abrasivo, desecho de desgaste lubricante.
2. Identificar el mecanismo o combinación de mecanismos de desgaste adhesivo, abrasivo, corrosivo, fatiga de superficie o erosivo.
3. Definir la configuración de la superficie desgastada y de la superficie original.
4. Definir los movimientos relativos en el sistema incluyendo la dirección y la velocidad.
5. Definir la fuerza o presión entre las superficies en contacto o entre la superficie desgastada y el ambiente del desgaste tanto a escala microscópica y macroscópica.
6. Definir la velocidad del desgaste.
7. Definir el coeficiente de fricción.
8. Definir la efectividad y tipo de lubricante: aceite, grasa, película superficial, capa de óxido que ocurre naturalmente.
9. Establecer si el desgaste observado es normal o anormal para la aplicación de que se trata.
10. Idear una solución si se requiere.

Solución a los Problemas de Desgaste. El desgaste se puede combatir con uno de dos métodos: Alterando las condiciones de servicio para proporcionar un ambiente menos destructivo o seleccionando un material más resistente al desgaste para el componente desgastado. En general el último método es más fácil y menos costoso y así el cambio a un material diferente es la elección más frecuente para evitar problemas de desgaste.

Importancia del Historial de Servicio en el Análisis de Fallas

Uno de los primeros pasos del análisis de fallas por desgaste, es la identificación del tipo de desgaste o si se pue

de reconocer más de un tipo, la evaluación de la importancia de cada tipo tan cuantitativamente como sea posible. Esta identificación del tipo o tipos de desgaste requieren una descripción detallada de las condiciones de servicio, basadas en una observación detenida y experiencia adecuada.

No es probable que una descripción casual y superficial sea de mucho valor.

En el análisis de desgaste lubricado común es esencial la descripción detallada del lubricante y frecuentemente se debe complementar con datos relativos a las presiones aplicadas a la superficie en contacto, temperaturas de funcionamiento y condiciones de las superficies. Cuando la corrosión es un factor en el desgaste lubricado, puede ser difícil determinar la temperatura, el grado de aereación, la concentración de iones de hidrógeno y la velocidad del lubricante, así como la composición y concentración del corrosivo en el lubricante. Otras complicaciones que hacen el análisis más difícil incluyen la presencia de sustancias que inhiben o aceleran la corrosión.

Efecto De Las Propiedades del Material Sobre el Desgaste

El análisis de fallas solo puede ser válido cuando se comprenden totalmente las propiedades de cada componente en un sistema y el efecto de estas propiedades sobre el proceso de desgaste.

Es probable que el desgaste adhesivo sea severo cuando se froten metales similares con poca o ninguna lubricación. Las partículas metálicas se desprenden de una o ambas superficies. Bajo cargas de contacto ligeras, las partículas serán muy finas y si está presente el aire, probablemente reaccionen con oxígeno para formar desechos de desgaste de óxido.

Bajo cargas pesadas, las partículas serán un tanto mayores y el desecho de desgaste será principalmente metálico, aún cuando esté presente aire. Si los metales son similares, es más probable que sean mutuamente insolubles (no aglutinables) y por ello menos susceptibles al desgaste adhesivo. Este es el principio de los materiales usados en los baleros deslizantes; se escogen deliberadamente insolubles en el material con que operan. Sin embargo, es rara la insolubilidad absoluta y de este modo generalmente el rendimiento satisfactorio depende de un tercer factor, tal como un lubricante o una película superficial.

El frotamiento de un metal contra un material no metálico como el plástico, algunas veces causa reacciones similares al desgaste adhesivo de metal a metal. Las partículas del plástico pueden adherirse al metal y romperse dando por resultado la destrucción de componentes plásticos. Los plásticos tienen mala conductividad térmica y no pueden disipar rápidamente el calor en una unión. Por esta razón, películas delgadas de ciertos plásticos (tales como el nylon y el teflón) soportadas a una base metálica frecuentemente son mejores que capas más gruesas de plástico solo, porque el substrato metálico actúa como disipador de calor para mantener frío el plástico.

El desgaste abrasivo puede ocurrir en superficies deslizantes que operan en un ambiente contaminado, como ocurre frecuentemente con chumaceras. Las partículas de polvo pueden entrar en el espacio delgado entre la chumacera y la superficie del balero e incrustarse en el metal suave de éste. Las proyecciones resultantes pueden cortar la chumacera como muchas brocas diminutas. En consecuencia, una propiedad importante de cualquier material de baleros es su capacidad de permitir la incrustación de partículas extrañas con suficiente profundidad para evitar que se dañe la flecha.

Las máquinas agrícolas y para mover tierra, utilizan herramientas cuidadosamente conformadas destinadas a ser empujadas por una masa de partículas. Los materiales que funcionan bien bajo ciertas condiciones de suelo pueden funcionar mal con un tipo diferente de suelo o aun en el mismo suelo bajo condiciones diferentes de humedad, compactación o velocidad.

Debido a que el frotamiento genera calor por fricción, los materiales de alta resistencia en caliente y alta dureza son más resistentes al desgaste abrasivo y adhesivo que los materiales de resistencia baja en caliente y dureza inferior.

Esta es una razón importante del éxito de aceros para herramienta de alta velocidad y carburos cementados en herramientas de corte. El carburo de tungsteno pulido finamente que se desliza a través de una superficie de acero endurecido proporciona un sistema de bajo desgaste. El desgaste adhesivo no puede ocurrir porque los dos materiales son mutuamente insolubles, el desgaste abrasivo es mínimo, porque el carburo de tungsteno no tiene proyecciones que penetren y corten el acero con el que hace contacto.

Los revestimientos con propiedades resistentes a la temperatura proporcionan resistencia excelente al desgaste abrasivo severo en herramientas de labranza agrícola y equipo pa

ra mover tierra, cuando se trata de suelos libres de roca. Sin embargo, con suelos rocosos la susceptibilidad de tales revestimientos a fractura frágil hace que su uso no sea aconsejable.

Efecto de La Microestructura

La heterogeneidad microestructural de una superficie de desgaste influye el proceso de desgaste, porque los componentes tales como carburos, inclusiones, compuestos intermetálicos y fases dispersas tienen propiedades diferentes de las de la matriz. Los microcomponentes duros, tales como carburos pueden hacer a un metal extremadamente resistente al desgaste abrasivo si están espaciados proximalmente en una matriz relativamente dura.

La dureza de la matriz es importante para la resistencia al desgaste. Si los microcomponentes duros están dispersos ampliamente en una matriz que no es suficientemente dura para tener una buena resistencia al desgaste propia, la matriz puede desgastarse rápidamente, dejando las partículas duras proyectándose desde la superficie donde pueden cortar una superficie con la que tengan contacto. Por esta razón, en condiciones de deslizamiento seco, la perlita exhibe considerablemente mejor resistencia al desgaste que la perlita gruesa o una mezcla de ferrita y perlita.

La resistencia a la abrasión de los aceros que contienen carburo con una dureza superior a aproximadamente 0.6 veces la dureza de un abrasivo en contacto es considerablemente mayor que la resistencia de abrasión de aceros más suaves que contienen carburos. En los aceros más suaves, los carburos tienen poco efecto sobre la resistencia a la abrasión, probablemente porque la matriz no proporciona el apoyo necesario para la fase dispersa. En aceros hipereutectoides la dureza máxima no es necesariamente óptima para la resistencia al desgaste. Una red limítrofe de grano de carburos, que se puede encontrar en muchos aceros hipereutectoides de la superficie desgastada. Por consiguiente los aceros hipereutectoides se deben procesar de manera que los carburos se redistribuyan como una fase dispersa, la cual usualmente no produce dureza máxima.

El acero al manganeso austenítico, es una aleación no magnética extremadamente tenaz en la cual se ha suprimido el endurecimiento mediante una combinación de contenido de alto carbono y manganeso y rápido enfriamiento a partir de una alta temperatura. El acero al manganeso excede aún a los aceros inoxidable austeníticos en su propiedad de endurecerse al trabajo y probablemente no tengan igual en este sentido.

Esta propiedad hace a la aleación excepcionalmente resistente al desgaste acompañado por impacto intenso, tal como el que ocurre en equipo triturador de minerales y de movimiento de tierra y en cruceros de vías de ferrocarril.

Algunas veces se cree que a menos que el acero al manganeso se halla endurecido al trabajo, tendrá poca resistencia al desgaste. Esto no es una generalización válida. El malentendido probablemente se origina de el hecho de que cuando está presente mucho impacto y el consiguiente endurecimiento al trabajo, el acero Mn al 12% es tan evidentemente superior a otros metales que su rendimiento se atribuye al endurecimiento superficial. Sin embargo, pruebas de abrasión controlada indican que hay circunstancias en las cuales la resistencia a la abrasión del acero austenítico al manganeso se modifica poco por el endurecimiento al trabajo y otras en las que superará a hierros fundidos blancos perlíticos más duros sin endurecimiento al trabajo.

Los bronce de estaño se usan ampliamente en baleros simples que operan bajo lubricación limítrofe, porque no rozan la flecha de acero si se rompe la película de lubricante. El estaño en el bronce refuerza también las adhesiones de absorción del agente activo en muchos lubricantes limítrofes. Sin embargo, un contenido de estaño que exceda del 12% puede formar una fase intermetálica Cu_3Sn_3 dura que raya la flecha de acero.

El plomo, el cual se usa en bronce de chumaceras en cantidades hasta del 10%, existe como fase separada y, bajo condiciones de deslizamiento seco, se extenderá sobre la superficie como se muestra esquemáticamente en la figura 6 para actuar como lubricante limítrofe, ya sea como metálico o como óxido de plomo. El plomo en los bronce de balero puede reducir el coeficiente de fricción en el deslizamiento seco contra el acero hasta en un 50%. El plomo puede reforzar también la lubricación influyendo el proceso químico que produce películas semisólidas como una fase dispersa, lo cual usualmente no produce dureza máxima.

Por consiguiente, los aceros hipereutectoides se deben procesar de manera que los carburos se distribuyan como una fase dispersa, lo cual usualmente no produce dureza máxima.

Los hierros colados generalmente tienen buena resistencia al desgaste. Aunque se sabe poco acerca de los papeles específicos de los diversos componentes, particularmente el grafito, se conviene generalmente que los hierros grises resis-tentes a la abrasión deben tener una microestructura que consiste de grafito libre en una matriz perlítica con poca o niñguna ferrita libre. Los hierros blancos fundidos pueden ser muy resistentes a la abrasión si la composición se controla para producir una microestructura de carburo (Fe_3C o Cr_7C_3) en martensita con una cantidad pequeña de austenita retenida para tenacidad. Los hierros fundidos martensíticos resis-tes a la abrasión contienen típicamente cromo, en cantidades hasta del 35%. Los hierros martensíticos de bajo cromo se alean con 4% a 5% de níquel para obtener la máxima dureza; --ci cantidades mayores promueven la retención de la austenita. Algunas veces se agregan cantidades pequeñas de molibdeno o cobre para reforzar la posibilidad de endurecimiento en seciones gruesas.

Mecanismos de Desgaste Combinados

Más de un mecanismo puede ser responsable del desgaste observado en una pieza determinada. Por ejemplo, una herramienta agrícola usada en suelo acidógeno puede sufrir desgaste abrasivo, corrosivo y erosivo simultáneo. El análisis del desgaste que implica mecanismos combinados es muy difícil y exige rigurosa atención a cada detalle.

La interacción de los mecanismos de desgaste puede complicar el análisis. Por ejemplo, en la corrosión por erosión, la velocidad del deterioro por acción corrosiva puede aumentar por un orden de magnitud o más cuando también ocurre erosión. Muchas aleaciones resistentes a la corrosión, tales como el acero inoxidable son relativamente estables en un medio corrosivo porque forman una película fuertemente adherente y delgada que inhibe la corrosión subsecuente. Si la película se remueve por acción abrasiva o erosiva, la corrosión puede proseguir en la superficie expuesta nuevamente. La acción química puede reestablecer la película, pero si la erosión la remueve tan rápidamente como se forma, no puede existir ya la estabilidad en el medio corrosivo.

La selección del material para aplicaciones de desgaste frecuentemente se basa en pruebas seleccionadas arbitrariamente que implica un ambiente de desgaste artificial. La diferencia entre este ambiente artificial y las condiciones rea

les de servicio no se puede pasar por alto en un análisis de falla y si las pruebas se van a usar como la base de la acción correctiva deben duplicar tanto como sea posible el mecanismo real o los mecanismos reales del desgaste en servicio.

Configuración de la Superficie

Debido a que el desgaste es un fenómeno superficial, la configuración de la superficie original de los componentes - en contacto influye el desgaste al influir la resistencia al movimiento relativo. En los baleros, por ejemplo el desgaste mecánico aumentará al incrementar la aspereza de la superficie o la falta de redondez, factores que incrementan la resistencia a la rodadura o el deslizamiento. Las herramientas de corte se desgastan enormemente si sus filos de corte no son agudos o si sus ángulos de corte y ángulos de claro son incorrectos para la aplicación.

Los cambios en la configuración de la superficie que ocurren durante el proceso de desgaste afectan etapas subsecuentes del desgaste. El proceso de desgaste de asentamiento - que implica la reducción progresiva de la aspereza de la superficie por desgaste adhesivo o abrasivo de superficies opuestas generalmente es seguido por un período de relativamente poco desgaste. La suavización inicial de asperezas, especialmente en sistemas lubricados que operan con lubricación límite, reduce las elevaciones y valles de la superficie a una altura aproximadamente igual al espesor de la película lubricante. Entonces las superficies montan una sobre otra sin interferencia entre los picos de las superficies opuestas y cesa el desgaste esencialmente.

En otros casos, especialmente si las superficies iniciales están un tanto más ásperas o si la lubricación límite es ineficaz, el desgaste adhesivo puede originar la aspereza progresiva de la superficie y la falla final. Si este proceso suelta desechos de desgaste hacia la unión y si este desecho tiene un tamaño de partícula que excede el espesor de la película lubricante, el desgaste adhesivo y abrasivo combinado entre las superficies opuestas y el desecho del desgaste puede dar por resultado un deterioro rápido.

Dirección de Movimiento Relativo. Cuando solamente existe deslizamiento unidireccional, las rayaduras o escopladuras producidas sobre la superficie devastada están alineados con la dirección del movimiento relativo. En un balero de manivento, por ejemplo, las rayaduras deben correr circunferencialmente sobre la superficie interior del balero y sobre la flecha que sostiene. Las rayaduras resultantes del desgaste - que están orientadas en otras direcciones indican factores -

tales como desalineamiento, vibración o piezas sueltas. Estos factores pueden contribuir a la severidad del desgaste.

En dispositivos que sufren rodadura y deslizamiento combinados, es necesario conocer las velocidades relativas y las direcciones de la rodadura y el deslizamiento para definir el mecanismo del desgaste. La dirección de la rodadura se define como la dirección en la cual se mueve el punto de contacto; la dirección de la rodadura es siempre opuesta a la dirección de rotación de un elemento rodante. En una superficie dada, existe la condición de deslizamiento positivo si la dirección del deslizamiento es la misma que la dirección de la rodadura. El deslizamiento negativo ocurre sobre la superficie en contacto cuando las direcciones de rodadura y deslizamiento son opuestas entre sí.

La mayoría de las fallas por fatiga superficial se originan en regiones de deslizamiento negativo, debido a que los esfuerzos de cizallamiento allí son usualmente más severos que en las regiones de deslizamiento positivo. El deslizamiento negativo ocurre en la raíz de los dientes de los engranes, en el seguidor de la leva que corre sobre una leva y en otros dispositivos en la pieza que tiene la menor velocidad de superficie en un sistema de deslizamiento y rodamiento.

Evaluación de la Picadura por Fatiga de la Superficie

En un sistema de rodamiento o rodamiento y deslizamiento, la ubicación del esfuerzo de cizallamiento máximo que puede estar en la superficie o ligeramente abajo de ella, determina donde se originará una picadura por fatiga de superficie. -- Cuando el esfuerzo de cizallamiento máximo está en la superficie, el origen de la picadura estará también en la superficie como se muestra en la figura 7 a la izquierda, y una sola grieta puede producir picadura. Sin embargo, cuando el esfuerzo de cizallamiento máximo está bajo la superficie, las grietas se deben propagar bajo de la superficie e irradiarse hacia la superficie uniéndose con grietas adyacentes para formar una grieta. Este proceso se muestra a la derecha de la figura 7.

La picadura procede de un origen superficial generalmente se puede distinguir por propagación de grieta, tanto paralela como perpendicular a la superficie (véase figura 7, derecha). La forma del área picada es principalmente irregular, algunas veces con torcimiento superficial a lo largo de los bordes. En muchos casos la operación del dispositivo después de la picadura subsuperficial altera la picadura original de los lados rectos y fondo plano, por desgaste abrasivo o deformación de los bordes del área picada, haciendo difícil identificar el mecanismo.

En dispositivos en los que el esfuerzo de contacto máximo es subsuperficial, las inclusiones no metálicas y muescas metalúrgicas similares aumentan la probabilidad de picadura. La eliminación de estas características microestructurales tales como por ejemplo de acero fundido al aire con acero fundido al vacío o desgaseado de vacío, deben proporcionar una duración prolongada de servicio. Si el tratamiento de vacío del acero no incrementa la duración, es posible que otros mecanismos y no la picadura subsuperficial sean responsables de la falla.

Esfuerzo de Cizallamiento. Cuando sólo existe deslizamiento en los baleros de manguito, el esfuerzo de cizallamiento máximo ocurre en la superficie de cada componente; cada superficie arrastra a la otra superficie consigo. El calor de fricción es alto en el punto de unión a menos que las superficies sean lisas y estén bien lubricadas. Sin embargo, cuando sólo existe rodamiento, como en los cojinetes de rodillos, los esfuerzos de cizallamiento máximo en todos los elementos rodantes se encuentran ligeramente debajo de la superficie. El calor de fricción es bajo a menos que altos esfuerzos o altas velocidades causen deformación elástica y deslizamiento.

Quando existe tanto deslizamiento como rodamiento, como en el movimiento de dientes de engranes (excepto en la línea de avance, donde sólo ocurre rodamiento), levas y seguidores de leva, las condiciones del desgaste son intermedias entre las que se encuentran con deslizamiento solo o rodamiento solo. La ubicación del esfuerzo máximo de cizallamiento varía desde la superficie hasta la subsuperficie dependiendo del grado de deslizamiento y del lubricante, los cuales afectan el coeficiente de fricción. Se cree que el esfuerzo de cizallamiento máximo será en la superficie cuando el coeficiente de fricción es superior a 0.10 aproximadamente.

El esfuerzo de cizallamiento máximo es importante porque causa fatiga. Si el esfuerzo de cizallamiento excede la resistencia de cizallamiento. Con aplicaciones sucesivas de carga, las grietas por fatiga pueden propagarse, soltar finalmente fragmentos relativamente grandes de la superficie y dejar cavidades o picaduras. Estas a su vez se agrandan rápidamente y finalmente pueden traer como resultado la destrucción completa de ambas superficies, especialmente cuando los fragmentos resultantes de fatiga superficial (desecho de desgaste) permanecen atrapados entre las superficies de contacto y causan abrasión.

Esfuerzo por Contacto. Los esfuerzos producidos por las cargas que fuerzan componentes a ponerse en contacto estrecho se pueden considerar tanto a escala macroscópica como microscópica. El esfuerzo de contacto aparente (esfuerzo macroscópico) se calcula usando la carga aplicada y el área de contacto aparente; en realidad, el esfuerzo macroscópico es solamente una apreciación aproximada del esfuerzo en áreas de contacto verdadero. Los esfuerzos a escala microscópica son siempre más altos que este porque la carga en realidad es soportada sobre el área de contacto verdadero.

Los esfuerzos máximos usualmente se encuentran bien dentro del límite plástico cuando se encuentran las asperezas de las superficies opuestas. En condiciones favorables, sólo la de formación plástica de las asperezas ocurre. Esto aumenta el área de contacto efectivo al aumentar el número total de áreas microscópicas que tienen la misma altura y están en contacto con áreas similares en la superficie opuesta. Los esfuerzos microscópicos se reducen en proporción al número de nuevos contactos de asperezas que se producen por esta acción, hasta que se alcanza un equilibrio en el que los esfuerzos en las asperezas en contacto no exceden la resistencia a la flexión y cesa la deformación plástica de las proyecciones. Este proceso es el medio por el cual las superficies opuestas se asientan desgastándose y ello es deseable en muchos componentes de maquinaria. Cuando las condiciones son menos favorables, el proceso de asentamiento puede no cesar nunca y continuará el deterioro progresivo hasta que se desgasta la pieza o hasta que otro mecanismo más devastador toma su lugar.

Bajo deslizamiento sólo, el desgaste es una función del esfuerzo macroscópico y la aspereza superficial y ocurre por adhesión y rayadura. Tal desgaste se puede reducir aumentando la resistencia de las superficies o haciendo las superficies más lisas o ambas o mejorando el sistema de lubricación.

Coeficiente de Fricción

Como se definió anteriormente, el coeficiente de fricción indica la resistencia relativa al deslizamiento. No se mide directamente, si no se determina por la ecuación 3, usando mediciones de la fuerza friccional y de contacto. El coeficiente de fricción es influido por los materiales en contacto, acabado de la superficie y cualquier lubricante o película entre las superficies en contacto, pero es independiente de la carga, velocidad, forma y área de contacto aparente.

Cuando no existe desecho abrasivo o de desgaste, los coeficientes altos de fricción resultan del cizallamiento simultá

neo de muchos contactos diminutos adheridos, tales como cuando metales similares libres de contaminación superficial se frotan entre sí en el vacío. Estos coeficientes bajos de fricción ocurren cuando superficies en contacto se deslizan una contra otra con poca o ninguna adherencia en las asperezas, como cuando ocurre cizallamiento totalmente dentro de una película lubricante de baja viscosidad. Los coeficientes intermedios de fricción generalmente implican alguna adhesión entre superficies que trabajan juntas.

Efectos del Ambiente

El ambiente de servicio influye en el desgaste afectando principalmente (a) reacciones químicas en las superficies de desgaste y (b) la estabilidad química y física de los materiales en el sistema de desgaste.

Los efectos del ambiente pueden ser útiles. Aunque variaciones relativamente oscuras, tales como diferencias en la humedad atmosférica se ha visto que tienen gran efecto sobre la fricción y el desgaste.

Clasificación del Desgaste

Las clasificaciones de desgaste se evalúan más comúnmente cuando el objetivo del análisis de fallas es mejorar la duración del servicio de las piezas que ordinariamente fallan por desgaste. La prueba de desgaste puede ser necesaria para evaluar si la velocidad de desgaste observada es normal o no para la aplicación.

Las pruebas de desgaste son generalmente menos precisas y menos dignas de confianza que las pruebas de otras propiedades de ingeniería de materiales o componentes. Debido a que no hay prueba universal del desgaste, el desgaste se evalúa por muchos procedimientos diferentes, cada uno diseñado para evaluar un tipo o mecanismo específico de desgaste. Una prueba de desgaste no es una buena evaluación de ingeniería, si no:

1. Es digna de confianza, es decir, es capaz de producir - desgaste de cierto material de una manera predecible y estadísticamente significativa.
2. Es capaz de catalogar materiales, es decir, capaz de obtener diferencias estadísticamente significativas de tasas de desgaste entre tipos diferentes de materiales.

3. Es válida, o sea capaz de predecir con precisión el rendimiento en servicio de un material dado.

Las tasas de desgaste se pueden determinar ya sea en pruebas de servicio o prueba de laboratorio en un ambiente controlado o artificial. Pocas pruebas de servicio pueden cumplir los criterios necesarios de confianza y capacidad de catalogación; así, las pruebas de campo raramente justifican la confianza. Sin embargo, las pruebas de laboratorio usualmente se realizan bajo condiciones artificiales que difieren de manera significativa de las condiciones reales de servicio y por ello puede ser dudosa su validez.

Las pruebas de laboratorio se realizan frecuentemente usando un abrasivo. No se pueden considerar más que como evaluaciones preliminares de selección y pueden ser engañosas cuando se usan para seleccionar material, a menos que simulen con exactitud:

1. Dureza y tamaño de partículas del abrasivo específico en el ambiente que controla el desgaste en servicio (generalmente esta es la sustancia más dura en una mezcla abrasiva).
2. Fuerzas que causan contacto entre las partículas abrasivas y la superficie de desgaste (presión de contacto)
3. Movimiento relativo (tanto velocidad como dirección) entre el abrasivo y la superficie de desgaste.

Tabla I. Coeficientes de Desgaste de Varias Combinaciones de Materiales Bajo Condiciones Bajo Deslizamiento Seco (a)

Combinaciones deslizantes		Coeficiente de Desgaste K.	Dureza del miembro mas suave 10^6 g/cm^2
Cilindro	Anillo		
Acero al bajo carbón	Acero al bajo carbón	7.0×10^{-3}	18.6
Latón 60-40	Acero endurecido	6.0×10^{-4}	2.5
Reflex	Acero endurecido	2.5×10^{-5}	0.5
Bakelita	Acero endurecido	7.5×10^{-6}	2.5
Cobre de berilio	Acero endurecido	3.7×10^{-5}	21.0
Acero de herramienta	Acero endurecido	1.3×10^{-4}	85.0
Estalita	Acero endurecido	5.5×10^{-5}	69.0
Carburo de Tungsteno	Acero al bajo carbón	4.0×10^{-6}	18.6
Carburo de Tungsteno	Carburo de tungsteno	1.0×10^{-6}	130.0

(a). Los coeficientes de temperatura dados son para el extremo de un cilindro que se desliza contra la superficie plana de un anillo a 1.0 metros por segundo, bajo una carga de 400 gramos.

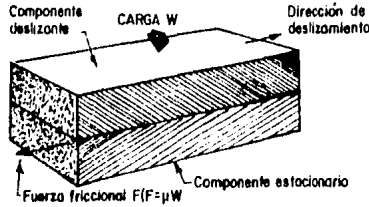


Fig. 1. Representación esquemática de la relación entre carga normal y fuerza friccional sobre un objeto que se desliza a través de una superficie estacionaria horizontal.

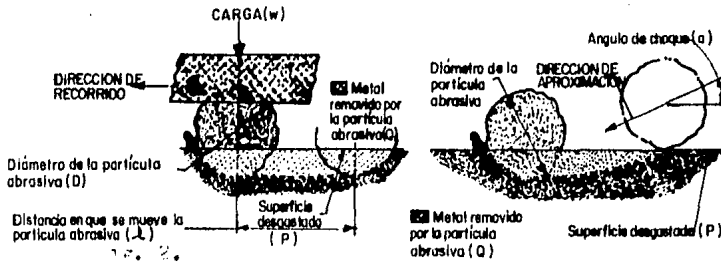


Fig. 2. Representación idealizada del desgaste abrasivo resultante de la aplicación mecánica de fuerza a una partícula abrasiva.

Figura 3. Representación idealizada de desgaste abrasivo resultante de la aplicación cinética de fuerza a una partícula abrasiva.

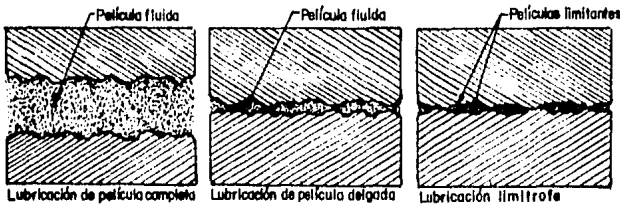


Figura 4. Ilustración esquemática de la relación de aspereza superficial con el espesor de la película bajo condiciones de película completa, película delgada y lubricación limitrofe.

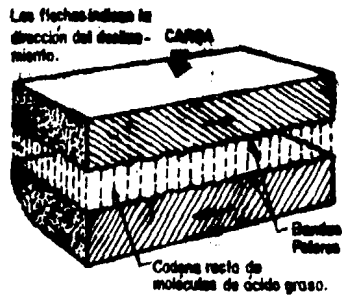


Fig. 5.
 Ilustración esquemática de la adhesión y orientación polar de moléculas de ácido graso de cadena recta en un lubricante limítrofe entre superficies deslizantes.

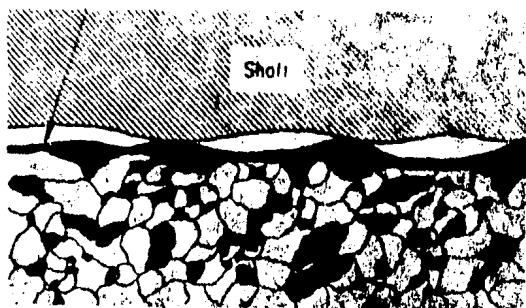


Figura 6. Ilustración esquemática de cómo el plomo libre en una atención de cojinete proporciona lubricación limitrofe.

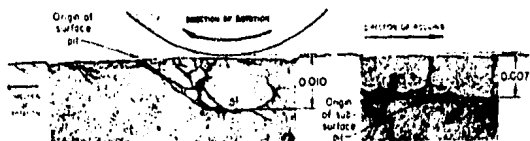


Figura 7. Micrografías de picadura incipiente causada por superficie de fatiga. La relación del origen de picadura de la cara y la forma, con respecto a la dirección de rodamiento, se muestra en la micrografía de la derecha, concreción de una picadura subsuperficial ilustrada esquemáticamente.

CAPITULO VII

FALLAS POR ROZAMIENTO

FAJAS POR ROZAMIENTO

El rozamiento es un fenómeno de despaste que ocurre entre dos superficies en contacto; es de naturaleza adhesiva y la vibración es un factor causativo inicial. Usualmente el rozamiento ocurre entre dos superficies en contacto íntimo que están sujetas a movimiento relativo cíclico de amplitud extremadamente pequeña.

El rozamiento también se conoce como corrosión por rozadura, oxidación por fricción, fatiga por excoiación, fricción molecular y oxidación por despaste.

CARACTERISTICAS DEL ROZAMIENTO

La diferencia entre rozamiento y desgaste ordinario es que el rozamiento generalmente ocurre en superficies en contacto que se destinan a estar fijas en relación con la otra, pero en realidad experimentan un movimiento alternado diminuto relativo, llamado deslizamiento que usualmente es producido por vibración. Sin embargo, hay excepciones como el contacto en tre bolas y pistas en los cojines o baleros oscilantes y acoplamientos flexibles. El rozamiento se diferencia también del desgaste ordinario en que el grueso del desecho producido se retiene en el sitio de la misma.

En materiales ferrosos, el proceso de rozamiento crea una masa de partículas de óxido rojizo. El rozamiento ocurre también en materiales no oxidantes, tales como oro, platino y óxido cúprico.

Los sitios comunes de rozamiento son uniones remachadas, acunadas sujetas con pernos, a presión, ranuras, acoplamientos, embragues, espigas y sellos, en montajes a presión en flechas y uniones universales, placas de base, abrazaderas y dispositivos prostéticos. Un problema con el rozamiento es que puede iniciar grietas por fatiga. Usualmente no son suficientes el desgaste localizado y el desprendimiento del material hasta una profundidad de 1/16 de pulgada.

FUNDAMENTOS DEL ROZAMIENTO

El proceso de rozamiento se divide generalmente en los tres etapas siguientes: a) adhesión inicial, b) oscilación acompañada de la generación de desechos oxidados y c) fatiga y despaste en la región de contacto.

ADHESION INICIAL

Las mediciones de resistencia eléctrica han establecido que el contacto intermetálico íntimo ocurre durante las etapas muy tempranas del rozamiento.

La adhesión entre las superficies que se rozan se desarrolla por la formación de uniones adheridas entre las asperezas de las superficies en contacto. Para movimiento del rozamiento de amplitudes relativamente altas, se pueden crear puntos de adhesión y destruirse varias veces dentro de la amplitud. Ha ocurrido rozamiento a amplitudes tan pequeñas como una micropulgada. Sin embargo, si el movimiento relativo es suficientemente pequeño para ser absorbido por deformación elástica en las asperezas de las superficies, no se produce daño por rozamiento. Los coeficientes de adhesión producidos por rozamiento entre una aleación no ferrosa cúbica de cara centrada de acero al bajo carbono son más bajos que si cualquiera de estos materiales se rozan consigo mismo tal vez por las diferencias en sus estructuras de cristal.

Inicialmente una película de óxido, del grueso de un angstrom, que se forma sobre las superficies, evita el contacto metálico. Para que los metales se adhieran, la capa de óxido se debe desorganizar para permitir el contacto de metal a metal. Si la pareja de rozamiento es de material idéntico, ocurrirá la deformación del material que se encuentra debajo de la película de óxido igualmente en ambas superficies y las películas de óxido se desorganizarán en ambas superficies. Si la pareja que se roza consiste de metales disimilares, el material más suave se deformará en mayor grado, de manera que la película de óxido en el metal suave se desorganizará pero la del metal más duro permanecerá intacta. Los metales de la misma estructura cristalina generalmente producen coeficientes de adhesión de valores bajos, en tanto que los metales más suaves producen coeficientes de adhesión de valores altos. En menor grado, la dureza del óxido parece desempeñar también un papel en la producción de coeficientes de adhesión. Sin embargo, la dureza relativa del metal subyacente es el factor primordial. En los aceros ocurre una desorganización más eficiente de la película de óxido y se produce mayor contacto intermetálico conforme aumenta la dureza de los metales no similares en contacto.

GENERACION DE Desecho

El componente principal del desecho producido por acero al bajo carbón o hierro cuando se roza en el aire, es óxido férrico (alía- Fe_2O_3) que es de color pardo rojizo y altamente abrasivo. El óxido férrico ocurre naturalmente como hematita y se usa como agente pulidor en forma de polvo pardo rojizo, que se conoce como rojo de joyería. También se incluyen cantidades pequeñas de hierro metálico en el desecho. El color del desecho cambia de negro (el color del Fe_2O_4) a pardo rojizo conforme el desecho generado se mueve del centro del rozamiento hacia las áreas periféricas donde el oxígeno está más disponible. Las gradaciones del color son una función tanto del tiempo como de distancia. Si hay una alta humedad ambiente, se puede producir óxi-

férrico hidratado ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), el cual es una forma de herrumbre. Al parecer, en el proceso de rozamiento se desprende material virgen de la superficie, se forma, y finalmente se oxida espontáneamente, debido a la actividad química incrementada de las partículas metálicas.

El desecho formado por muchos metales no ferrosos mayormente no oxida y es de tamaño de partícula mayor que el de metales ferrosos. Por otro lado, en materiales duros, tales como el acero de herramientas y el cromo, las partículas de desgaste inicial son muy pequeñas con mucho óxido presente. Si ocurre rozamiento en una atmósfera protectora o inerte, se produce poco desecho, aunque el daño superficial puede ser extenso.

Hay evidencia de que la temperatura local asciende bajo cargas y velocidades de deslizamiento similares a aquellas a las cuales ocurre la rozadura y que consecuentemente se acelera la oxidación por un incremento de la temperatura durante el desgaste por rozamiento. Las variaciones de la amplitud del deslizamiento relativo y la fuerza friccional muestran una espira de histeresis en un ciclo, indicando la cantidad de energía perdida en el área de rozadura. Los cálculos basados en datos experimentales muestran que de la energía liberada en la vibración por rozadura, sólo una parte en diez millones a mil millones de partes, dependiendo de la combinación de materiales se consume en el desgaste por ruptura de adhesión. Siendo el resto disipado como calor.

Si uno de los metales de una pareja de rozadura es suave, los fragmentos de óxido duro pueden incrustarse en el metal suave y de esta manera reducir la velocidad del desgaste. Por consiguiente, los óxidos formados en el rozamiento pueden reducir la velocidad del desgaste si se adhieren a las superficies o aumentarla, si se mantienen sueltos. En hierros grises ocurre un notable aumento cuando el tamaño de las partículas de desecho es más pequeño que las distancias entre las escamas de grafito.

Fatiga y Desgaste. Las regiones rozadas son altamente susceptibles al agrietamiento por fatiga. Bajo condiciones de rozamiento, las grietas por fatiga se inician a muy bajos esfuerzos, bien por debajo del límite de fatiga de especímenes no rozados. La iniciación de las grietas por fatiga en regiones rozadas dependen principalmente del estado del esfuerzo en la superficie y especialmente en los esfuerzos superpuestos al esfuerzo cíclico. La dirección del crecimiento de las grietas por fatiga está asociado con la dirección de los esfuerzos de contacto y ocurre en dirección perpendicular al esfuerzo principal máximo en el área de rozamiento. Por esta razón la resistencia de fatiga que se basa en la iniciación de grieta decrece linealmente al incrementar la presión del contacto.

Un fenómeno peculiar del rozamiento es que alguna de las grietas de fatiga producidas no se propagan. La no propagación de tales grietas de fatiga se debe a que el efecto de las superficies de contacto se extiende solamente a una profundidad muy pequeña debajo de la superficie rozada. Esta fatiga de superficie produce picadura o escamación local que es una característica del rozamiento. Los esfuerzos residuales compresivos favorables retardan o detienen la propagación, pero no impiden la iniciación de la grieta. Es vitalmente importante la prevención de la propagación de grietas en componentes que soportan esfuerzos considerables. Tales como ejes o flechas porque la modalidad usual de la falla de tales componentes es fatiga iniciada por rozamiento.

RECONOCIMIENTO DEL ROZAMIENTO

El rozamiento de metales ferrosos en el aire produce un desecho pardo rojizo de óxido férrico característico el cual, al mezclarse con aceite o grasa, produce un desecho que con frecuencia se llama "sangre", "cacao" o "lodo rojo". En componentes que se lubrican de manera que no es probable que ocurra la corrosión ordinaria, la presencia del desecho pardo rojizo es indicación de rozamiento. Si un componente no se lubrica, la presencia de polvo de óxido puede no significar necesariamente rozadura, sino más bien desgaste. Sin embargo, el desgaste usualmente es causado por falta de lubricación y se puede evitar por completo utilizando un lubricante adecuado. Por otra parte, la verdadera rozadura no se puede remediar totalmente mediante lubricación.

El análisis del óxido puede determinar si el compuesto es óxido férrico ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$; hematita) u óxido férrico hidratado -- ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, goetita). Estos dos componentes se pueden distinguir por difracción de rayos X, porque sus patrones son diferentes, o mediante análisis químico.

Si está presente el rozamiento, el examen macroscópico de la superficie afectada se puede hacer después de que la corrosión se ha fregado con una pasta de alúmina y hexano, por ejemplo. El examen revelará áreas muy reflejantes, así como depresiones y picaduras que contienen parches negros de Fe_3O_4 , que se produce cuando es limitada la previsión de oxígeno. Si sólo está presente corrosión ordinaria el examen microscópico mostrará picaduras de corrosión pequeñas pero bien definidas que han producido rosetas de herrumbre consistentes en óxido de hierro hidratado voluminoso.

PREVENCION DEL ROZAMIENTO

Los componentes propensos al rozamiento se pueden dividir en dos grupos:

Grupo I. Componentes en los cuales las superficies nunca se destinaron para sufrir movimiento relativo, que incluye montajes de contracción y presión y superficies sujetas con pernos, pasadores y remaches.

Grupo II. Componentes en los cuales las superficies están destinadas para sufrir movimiento relativo intermitentemente o continuamente, tales como el contacto de rodamiento u oscilación de baleros y sellos en flechas.

Las medidas que evitan o alivian el rozamiento son (a) eliminación o reducción de vibración, (b) eliminación del deslizamiento, (c) lubricación, (d) separación de superficies y (e) inducción de esfuerzos residuales.

Eliminación o Reducción de vibración. El remedio ideal para la rozadura es eliminar la vibración, la cual es la causa del deslizamiento entre las superficies de rozantes. Esto reducirá al mínimo la rozadura de otro tipo, porque el movimiento cíclico entre las superficies es el ingrediente esencial en cualquier tipo de rozamiento. Aunque algunas veces es posible cambiar un diseño para reducir la vibración suficientemente para detener el deslizamiento, con más frecuencia no se puede eliminar la vibración en la práctica.

La eliminación del deslizamiento es efectiva solamente para componentes del grupo I. En estos componentes el deslizamiento se puede eliminar incrementando la carga o incrementando la fricción.

El incremento de la carga se puede lograr simplemente apretando conexiones de tornillo o incrementando el ajuste de un montaje. Sin embargo, si el incremento de la carga no evita el deslizamiento, el daño causado por el rozamiento aumentará.

El incremento de la fricción se puede lograr aplicando una capa superficial, tal como óxido de níquel que es eficaz para detener el rozamiento de aspas de turbina. El baño de cobre o de plomo de piezas de acero tratadas con chorro de arena, también es eficaz.

Lubricación. El deslizamiento a amplitudes muy pequeñas que generalmente implican rozamiento, produce un efecto limpiador excelente y no permite la relubricación del área de contacto.

por esta razón, el rozamiento no se puede evitar en su totalidad mediante la lubricación. Sin embargo, el daño por rozamiento se puede reducir o retardar considerablemente mediante lubricación efectiva.

No se ha establecido claramente si un lubricante es eficaz por su propiedad de evitar el acceso del oxígeno a la superficie o por su propiedad de separar las superficies. Los lubricantes líquidos no pueden separar las superficies por completo, pero pueden hacerlo hasta el punto que reduzcan el número de asperezas de la superficie en contacto y por consiguiente el número de uniones adheridas. Así pues, para lograr la máxima eficiencia el lubricante debe tener fácil acceso a las superficies. La efectividad de los lubricantes fluidos o semifluidos usualmente es aplicable sólo a los componentes del grupo II.

En el uso efectivo de aceites o grasas, las superficies .. en contacto deben tener un acabado superficial con surcos o valles microscópicos que permitan que el lubricante penetre tan profundamente como sea posible en las áreas de contacto real, si es práctico. Los aceites deben tener la viscosidad práctica más baja para permitir el flujo capilar en la superficie surcada. Los aceites y grasas deben contener también inhibidores de desgaste y oxidación adecuados, tales como fenil-alfa-naftilamina. Las grasas pueden ser efectivas, siempre que se puedan alimentar suficientemente o siempre que la amplitud del deslizamiento sea suficiente para permitir la relubricación de las superficies rozadas. El desmontar, limpiar y relubricar las superficies protegidas por lubricación, también es eficaz para controlar los efectos del rozamiento.

La lubricación retrasa pero no evita el rozamiento. Aún con lubricantes sólidos adheridos, la rozadura se retrasa sólo hasta que la película lubricante no se desgasta.

Separación de Superficies. La separación completa de superficies insertando un material de alto límite de deformación elástica, tal como material de hule o polímero, evita el rozamiento siempre que el material insertado pueda absorber elásticamente la amplitud vibratoria. Una película de hule de goma adherida puede absorber elásticamente vibraciones de 0.002 de pulgada de amplitud.

Inducción de Esfuerzos Residuales. La propagación de grietas por fatiga iniciada por el rozamiento, especialmente en montajes a presión se puede evitar induciendo esfuerzos compresivos residuales sobre las superficies. Esto se puede lograr en friando debajo de la temperatura de transformación de fase mediante cilindrado de superficie, martillado de granalla o martillado de cuentas de cristal. El cementado y nitruración también

son efectivos no tanto por reducir el rozamiento, sino más bien por mejorar la resistencia a la fatiga.

ROZAMIENTO DE CABLES DE ALAMBRE

El movimiento relativo entre los hilos de cables de alambre ocurre cuando éstos están bajo tensión y se flexionan. Cuando la flexión es repetitiva, este movimiento relativo se puede conducir a corrosión por rozamiento y a la fatiga por rozamiento subsecuente. Cuando el rozamiento ocurre entre los alambres del tipo de bobina cerrada de cable de alambre, que es de una construcción muy compacta, los desechos de la corrosión separan los alambres produciendo abultamiento del cable e impidiendo el deslizamiento de cada uno de los alambres y causando rigidez en el punto de corrosión.

La elección de un lubricante adecuado durante la fabricación del cable evitará el rozamiento subsiguiente en el servicio. La viscosidad del lubricante debe ser tal que fluya fácilmente a los puntos de rozamiento potencial sin que al mismo tiempo se fugue del cable.

ROZAMIENTO EN FLECHAS DESLIZANTES

El rozamiento en flechas y superficies de soporte ocurre usualmente como resultado de una o más de las causas siguientes:

1. Movimiento oscilatorio diminuto entre los dos componentes.
2. Carga de soporte sobre una área de contacto limitado.
3. Adhesión de asperezas y transferencia de metal entre los componentes.
4. Deterioro de la superficie por abrasión.

El movimiento oscilatorio diminuto usualmente crea una nebulosidad siguiendo una línea circunferencial, en algunos casos varias líneas, sobre la superficie de la flecha donde la superficie ha estado en contacto con el soporte. Ocasionalmente, la condición aparece como una serie de defectos de forma elíptica que crea cavidades ubicadas centralmente conforme avanza el rozamiento. Los defectos que rodean la flecha indican que la carga de soporte es absorbida por una área de contacto limitado

Cargas de Soporte. Estrictamente, las cargas estáticas aplicadas perpendicularmente a las superficies de soporte no causan desgaste; sin embargo, conjuntamente con un movimiento oscilatorio diminuto, conducen a corrosión por rozamiento.

Adhesión de Asperezas. El desgaste se inicia cuando los picos de las asperezas de las superficies se fragmentan y oxidan para formar partículas de óxido duro, lo cual promueve subsiguien

te abrasión. Si las superficies en contacto se aproximan a distancia de angstroms puede resultar la adhesión (soldadura fría) a partir de la presión, aunque sea ligera. Se cree que las asperezas se adhieren y cizallan durante el desgaste, pero este proceso no es necesariamente indeseable en tanto que las adhesiones se cizallen. Sin embargo, cuando una adhesión de aspereza se hace más fuerte que los metales de soporte, ocurre la fractura en el metal de base más débil y el metal se transfiere a la cara o puesta del soporte. Estas partículas adherentes se acumulan y finalmente causan rozamiento o rayadura.

Abrasión. En baleros no lubricados cuando los componentes de la flecha y el balero tienen dureza casi equivalente, su fren abrasión mutua y se calientan localmente. Una acción similar ocurriría cuando falla un lubricante.

Debido a su dureza, la resistencia al desgaste del carburo de tungsteno sintetizado es muy bueno y las flechas y baleros de este material se pueden operar con lubricantes de muy bajas viscosidades o sistemas de lubricación de neblina. El balero no puede funcionar seco o sin lubricante sin que ocurra daño grave.

CAPITULO VIII

AGRIETAMIENTO DE METAL-LIQUIDO

AGRIETAMIENTO DE METAL-LÍQUIDO

El agrietamiento de Metal-Líquido. Es la disminución de la resistencia o ductilidad de un metal sólido causada por contacto con un metal líquido.

El agrietamiento por un metal líquido da por resultado (a) una disminución en la elongación de tensión antes de la falla o (b) la fractura sin deformación plástica a niveles de esfuerzos inferiores a la resistencia a punto cedente normal del material. La iniciación del agrietamiento puede ocurrir instantáneamente al contacto del metal sólido con el líquido o puede demorar hasta que no ocurra la humectación del metal sólido.

Un metal normalmente dúctil sujeto a esfuerzo de tensión-mientras está en contacto con un metal líquido, puede fracturarse a un esfuerzo anormalmente bajo, con poca o ninguna ductilidad. La iniciación de la fractura por agrietamiento de metal líquido no depende del tiempo. Se inicia inmediatamente que se aplica el esfuerzo, si ha ocurrido la humectación y si la grieta continúa creciendo en tanto que (a) haya suficiente metal líquido presente para cubrir por lo menos una parte de la superficie de fractura, (b) llegue algún vapor a la punta de la grieta.

MECANISMO

Generalmente se aceptan las siguientes condiciones como requisitos previos para que ocurra el agrietamiento de metal-líquido.

1. Los metales involucrados no forman compuestos intermetálicos estables de alta fusión.
2. Los metales no tienen solubilidad mutua significativa.
3. La superficie del metal sólido debe ser humedecible por el metal líquido,

El agrietamiento puede ocurrir por transporte a la punta de la grieta de átomos del metal agrietante en la fase de vapor a una temperatura bien abajo del punto de fusión de dicho metal.

SUSCEPTIBILIDAD DE VARIOS METALES

Los aceros al carbón y aleaciones bajas, los aceros inoxidables, las aleaciones de aluminio, las aleaciones de cobre y el cobre, las aleaciones de magnesio y las aleaciones de níquel y el níquel, las aleaciones de titanio, difieren en susceptibilidad al agrietamiento por contacto con metales líquidos.

El agrietamiento de aceros al carbón y de baja aleación a temperaturas de 260 a 815^oC, es causada por contacto con los siguientes metales en estado líquido: latón, bronce, aluminio, cobre, cinc, soldadura de plomo, estaño e indio, litio, cadmio.

La falla de acero 4130 soldado ocurre en un minuto a un esfuerzo aplicado de sólo 15,000Psi. en presencia de litio fundido.

Los aceros inoxidables son bastante resistentes al agrietamiento de metal líquido y sufren poco o ninguna degradación en sus propiedades cuando se ponen en contacto con metales líquidos que agrietan los aceros simples al carbón y de baja aleación severamente.

ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO. Aunque no es común el agrietamiento de metal líquido de aleaciones de aluminio, puede dar como resultado falla rápida. El mercurio, galio, indio, estaño, y metales alcalinos excepto el litio) son agentes agrietadores, en tanto que el plomo, bismuto y cadmio, no lo son.

En estructuras no sujetas a cargas de fatiga, los componentes fabricados de aleaciones de aluminio 5XXX y 6XXX que no son susceptibles a agrietamiento por corrosión de esfuerzo, pueden fallar catastróficamente si se exponen al mercurio.

Después de tal falla, la eliminación de la contaminación por el mercurio de otros componentes o estructuras adyacentes debe ser total.

ALEACIONES DE COBRE Y COBRE. Los latones y bronce **son** especialmente susceptibles al agrietamiento de metal líquido por el mercurio. En general, el agrietamiento sigue una trayectoria intergranular. El tiempo para que ocurra la falla depende del nivel del esfuerzo. No se ha encontrado un inhibidor -- efectivo del agrietamiento del latón y bronce por el mercurio, pero las adiciones de estaño o silicio parecen reducir el grado del agrietamiento.

El cobre y las aleaciones de cobre, excepto el latón ..son agrietados por el bismuto, litio y en ciertas condiciones el .. mercurio. Las grietas causadas por la exposición de estos metales en estado sólido a metales líquidos, usualmente son intergranulares. El agrietamiento por corrosión de esfuerzo en aleaciones de cobre puede ser intergranular o transgranular ..dependiendo del PH, concentraciones de la aleación y variación de las especies ambientales.

Las aleaciones de magnesio son relativamente insensibles ..a el agrietamiento por metales líquidos. El sodio y el cinc son los únicos metales de punto bajo de fusión que causan agrietamiento del magnesio.

El níquel y las aleaciones de níquel, aunque son corroídas -- rápidamente por el mercurio o el plomo, muestran poco o ningún agrietamiento. Se han registrado observaciones similares del -- cobalto expuesto al bismuto y al cadmio.

Titanio y aleaciones de titanio. El agrietamiento por el mercurio del titanio ha ocurrido cuando el titanio se deforma -- al sumergirse en mercurio. El cadmio fundido agrieta el titanio además, la fractura frágil de varias aleaciones de titanio en íntimo contacto con el cadmio sólido ha ocurrido a temperaturas ambientes.

La película de óxido sobre el titanio debe romperse antes de que pueda ocurrir el agrietamiento.

CAPITULO IX

FALLAS EN DATOS

FALLAS EN DADOS

Características de los Dados. Los dados tienen dos características que los distinguen de la mayoría de otras piezas metálicas. En primer lugar, los dados están involucrados en la fabricación de otros productos. De hecho, los dados están involucrados ya sea directa o indirectamente en la fabricación de la mayoría de los productos metálicos. De esta manera la falla prematura de un dado puede causar demoras de producción que aumenta considerablemente el costo de los artículos. En segundo, los dados usualmente se emplean a durezas más altas que los otros productos, muy frecuentemente tan altas como 60 Rockwell C y algunas veces más altas. Esto significa que los dados están más propensos a fractura repentina que la mayoría de otros componentes de maquinaria.

Consecuentemente los dados deberán hacerse lo suficientemente duros para resistir las condiciones previstas de servicio y lo suficientemente tenaces para no agrietarse, ya sea durante la manufactura de los dados o después de que se ponen en servicio.

Causas de las Fallas de los Dados. Para lograr una duración de servicio aceptable y evitar fallas prematuras se deben mantener las siguientes condiciones estrictamente. La mayoría de estas condiciones están interrelacionadas:

1. Diseño que sea compatible con el material del dado seccionado y con el procedimiento de proceso planeado.
2. Selección de material que sea compatible con el diseño y procedimiento de proceso.
3. Selección de un procedimiento térmico que sea compatible con el diseño y el material.
4. Control del procedimiento de tratamiento térmico especificado.
5. Control del esmerilado y otras operaciones de acabado.
6. Control del montaje del dado, especialmente alineamiento, en el equipo.
7. Operación, específicamente, evitación de sobrecarga.

Virtualmente todas las fallas de dados son causadas por alguna falta de control de una o de una combinación de dos o más de las condiciones citadas.

Tipos de Fallas. Además de simple ruptura, la falta de control de las condiciones señaladas en la lista anterior puede dar por resultado una o más de las siguientes condiciones, las cuales se pueden anunciar como falla si el dado ya no es capaz de desempeñar el trabajo requerido: Agrietamiento, pica dura o grabado, deformación, desgaste anormal, erosión y exfoliación.

INSUFICIENCIA DEL DISEÑO EN LA FALLA

Una parte considerable de las fallas de los dados se puede atribuir al diseño, ya sea directa o indirectamente, porque los tratamientos térmicos prescritos o los procedimientos de acabado no fueron compatibles con el diseño. De esta manera, el buen diseño es de gran importancia en la prevención de fallas.

Los diseños erróneos incluyen ángulos agudos, filetes con radios que son demasiado pequeños, ranuras mal colocadas o diseñadas y muescas, cambios abruptos de sección, ubicación de barrenos que dan por resultado paredes delgadas, secciones que son demasiado delgadas y claros inapropiados.

Los factores del diseño se pueden clasificar en términos generales como (a) los que reaccionan al tratamiento térmico (b) los que se relacionan a condiciones de servicio. El primero exige que se considere el tipo de acero, el método del tratamiento térmico y el equipo disponible tanto para el tratamiento térmico y proceso junto con condiciones de servicio para prevenir la falla prematura de dados fabricados apropiadamente.

El diseño de dados para trabajo en frío es difícil porque los esfuerzos de servicio no se pueden calcular con exactitud por lo general. Debido a los muchos factores que intervienen, el diseño se basa más frecuentemente en la experiencia.

Las fallas de diseño que causan falla en el tratamiento térmico incluyen la presencia de secciones gruesas adyacentes a secciones delgadas, bordes agudos, marcas estampadas, barrenos ciegos y espacio incorrecto de barrenos. Los defectos de diseño que ocasionan fallas de servicio incluyen no filetear bordes, no proporcionar claros adecuados, secciones demasiado delgadas y grandes diferencias en los espesores de las secciones.

Todas las causas de fallas potenciales están asociadas con

esfuerzos presentes en el dado, que se generan durante su fabricación o durante su servicio o ambas.

Fallas Causadas por Mal Tratamiento Térmico

Una investigación de las fallas de dados reveló que el 70% fue causada por irregularidades durante el tratamiento térmico. Este 70 por ciento es el total de 40 por ciento debido a no encontrar la composición de la superficie del acero, el 20 por ciento al enfriamiento a temperatura demasiado baja o a temperatura ineficaz y el 10 por ciento a enfriamiento a partir de temperaturas de austenización excesivamente altas. Solo el 30 por ciento fue causada por mal diseño, esmerinado abusivo o selección de un grado inapropiado de acero para dados.

Notese que en esta investigación la causa más importante de fallas estaba asociada con la incapacidad de controlar la composición de la superficie. Idealmente, la mayoría de los dados debía endurecerse en una atmósfera neutra, la cual ni a adierera carbón ni lo sustrajera de la superficie, pero la .. perfección en este aspecto raramente es alcanzable en la prática. Sin embargo, es esencial mantener el contenido básico de carbono durante el tratamiento térmico para obtener la dureza de trabajo adecuada para la duración de servicio que prevé. La composición de la superficie se puede controlar de varias maneras, todas las cuales tienen por objeto proporcionar protección de la atmósfera. Entre éstas están el endurecimiento del acero calentándolo encerrado en un material neutro para evitar el contacto con la atmósfera del horno y ... procesando en hornos de atmósfera controlada, en hornos al vacío o en baños de sal o plomo fundido.

En muchos casos cuando los dados han sufrido cambios serios en la composición superficial, fallan antes de que se concluya el tratamiento térmico o fallan durante las operaciones de acabado subsiguientes. En otros casos, tales dados pueden sobrevivir hasta que no se ponen en servicio, pero la duración del servicio probablemente sea corta.

Efecto de la Temperatura de Austenización

Los aceros para dados son extremadamente sensibles al sobrecalentamiento durante la austenización. El sobrecalentamiento causa crecimiento del grano y formación de martensita gruesa y cantidades excesivas de austenita retenida en la microestructura. Todo lo cual da por resultado dados frágiles que son susceptibles de fallar en servicio, especialmente si se les sujeta a sobrecarga ligera o condiciones de mal trato.

El Templado y su Relación con la Falla del Dado. Los dados deben templarse inmediatamente después del enfriamiento y antes de que lleguen a la temperatura ambiente. Cuando alcanzan uniformemente la temperatura de 52 a 65 °C, después del enfriamiento, se deben colocar en el horno de templado. Es importante que todas las partes del dado hayan alcanzado esta gama de temperatura antes del templado. Algunos dados se han agrietado a partir del templado demasiado rápidamente es decir, no se permitió que su temperatura se uniformara y aún estaba ocurriendo cierta transformación.

El templado sirve para evitar esfuerzos residuales, los cuales frecuentemente están cerca de la resistencia a la tensión del material del dado. Cuando los dados se colocan en servicio sin el templado adecuado, es probable que fallen prematuramente.

Para los dados fabricados de acero para herramientas de aleaciones de alto grado, el retemplado (doble o algunas veces triple templado) es necesario para una mayor seguridad contra falla prematura en servicio. Los dados hechos de aceros para herramienta, tales como los grados D, M o T, retienen cantidades importantes de austenita, que se transforma en martensita durante el enfriamiento a partir del primer paso de templado; por consiguiente, por lo menos un templado adicional para aliviar los esfuerzos causados por la transformación que ocurre durante el enfriamiento después del templado inicial.

El templado posterior en proceso puede ser apropiado o necesario cuando ciertas operaciones de esmerilado o maquinado de descarga eléctrica se han realizado.

Fallas Causadas por Operaciones Siguiendo al Tratamiento Térmico

Varias operaciones realizadas comúnmente después del tratamiento térmico pueden causar o por lo menos contribuir a la falla del dado. Algunas veces la identificación de los dados por operaciones tales como estampado en frío o grabado con un lápiz eléctrico, contribuyen a la falla causando elevadores de tensión.

Sin embargo con más frecuencia el esmerilado y el maquinado por descarga eléctrica son causas de la falla prematura de dados para trabajo en frío.

Efectos del Esmerilado. El esmerilado da por resultado calentamiento intenso localizado y produce altos esfuerzos superficiales que pueden causar grietas en dados. Las fallas

comunes de esmerilado son: (a) quemadura de esmerilado, resultante de remover metal demasiado rápidamente; (b) esmerilado con una rueda sin filo o cargada; (c) esmerilado con una rueda de grano demasiado fino para el trabajo; y (d) reacción ineficaz del calor generado por el esmerilado.

El daño resultante del esmerilado abusivo se puede manifestar como descoloración superficial (frecuentemente llamada quemadura de esmerilado), grietas poco profundas (generalmente de menos de 0.004 pulgadas de profundidad) o grietas profundas.

Debido a que las áreas quemadas y las grietas poco profundas no siempre son evidentes en un examen visual, puede ser necesaria la prueba de partícula magnética o el grabado en frío con ácido nítrico diluido para revelar este tipo de daño. Frecuentemente se pueden detectar grietas más profundas mediante examen visual.

Los componentes de dados deben tener acabados adecuados para un buen servicio, un aspecto del esmerilado, raramente considerado en el taller común, es la dirección en la cual se esmerila la superficie del dado. Independientemente de lo liso que se acaben las superficies con el esmerilado, la superficie contendrá arañes paralelos al esmerilado con respecto a la dirección de éste. Se ha probado que la dirección de las marcas del esmerilado en un dado, influye en la duración del mismo, especialmente de dados que se usan como punzones y estirado profundo.

La técnica del esmerilado no es siempre la única causa de las grietas de esmerilado; algunas prácticas de tratamiento térmico producen extrema sensibilidad hacia las grietas de esmerilado, sin importar cuán cuidadosamente se haga. Entre estas prácticas de tratamiento térmico están (a) no templar el dado inmediatamente después del enfriamiento; (b) enfriar el dado a partir de una temperatura excesivamente alta; (c) producir una cementación carburizada al alto carbón especialmente con una red de carburo; y (d) usar procedimientos de templado que dejan ya sea martensita sin ... templar o cantidades excesivas de austenita retenida que se ... transforma con el esmerilado.

Los aceros al carbón y de baja aleación para dados raramente ocasionan dificultades en las operaciones normales de esmerilado. Debido a que los aceros para herramienta de aleación más alta, tales como los grados de alto carbón y alto cromo o de alta velocidad están más propensos al agrietamiento por esmerilado, usualmente no se pueden esmerilar con las mismas ruedas utilizadas para grados de baja aleación. Si se

toman precauciones razonables para usar una rueda limpia de grano grueso y fluido enfriador adecuado, se pueden esmerilar aceros de más alta aleación sin dificultad cuando se van a remover cantidades moderadas de metal.

Maquinado por Descarga Eléctrica (MDE). El uso del maquinado por descarga eléctrica puede producir una capa endurecida poco profunda de martensita no templada en la superficie debajo de la cual hay una capa de acero templado, en aceros endurecidos. Esta capa "blanca" de martensita no templada contiene microgrietas que pueden convertirse en grietas graves cuando la herramienta se carga en el servicio.

Cuando se usan aceros endurecidos, dicho maquinado también agrega esfuerzos superficiales a los esfuerzos residuales ya establecidos. Por consiguiente, es importante aliviar esfuerzos en dados procesados con MDE retemplando a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura máxima de templado usada en el tratamiento térmico.

Otras medidas precautorias son: (a) si se usó MDE de baja frecuencia para acabado basto, se debe usar MDE de alta frecuencia para reducir a lo mínimo la profundidad de la capa blanca reendurecida; y (b) la capa blanca se puede eliminar o reducir al mínimo mediante esmerilado ligero o asentado, seguido también de retemplado.

Soldadura. La reparación por soldadura de dados fallidos requiere mano de obra experta y capacitada. Cuando se recuen, la mayoría de las piezas de acero para herramientas se pueden soldar sin dificultad utilizando prácticas establecidas. En general, estas prácticas incluyen: (a) igualación de las composiciones del metal de base y metal de soldadura; (b) preparación apropiada del área que se va a soldar; y (d) procedimientos que incluyen precalentado, postcalentado y alivio de esfuerzos o recocimiento. El dado soldado se trata entonces térmicamente de la manera convencional.

La soldadura de dados endurecidos es difícil. Las soldaduras se usan, por ejemplo, para reparar dados agrietados o rajados por el calor, restaurar bordes desconchados, rellenar bordes o superficies desgastadas, hacer cambios al diseño del dado y corregir errores de taller. Debido a que la soldadura de herramientas endurecidas es riesgosa, se deben seguir procedimientos detallados.

CAPITULO X

FALLAS DE ENGRANES

PALLAS DE ENGRANES

Los engranes pueden fallar de muy diferentes maneras y salvo el aumento de nivel de vibración y ruido, la falla total es frecuentemente la primera y única indicación de dificultades. En general, cada tipo de falla deja pista característica en los dientes del engrane y el examen detallado frecuentemente proporciona suficiente información para establecer la causa de la falla.

Materiales para Engranes

Se usa una variedad de hierros colados, materiales de metalurgia en polvo, aleaciones no ferrosas y materiales no metálicos para engranes, pero los aceros son los materiales más ampliamente usados debido a su alta proporción de resistencia a peso y relativamente bajo costo.

Entre los aceros de endurecimiento integral de uso extendido, se encuentra el 1040, 4140, 4340. Estos aceros también se pueden cementar efectivamente por calentamiento de inducción. Entre los aceros carburizantes usados para engranes se encuentran el: 1018, 4026, 1524, 4008, 4320, 4620 y 4820, 8620. Algunos engranes de acero de uso especial son cementados mediante carbonitruración o nitruración. Otros engranes de uso especial, como los que se usan en equipo químico o de procesamiento de alimentos, se fabrican de acero inoxidable o aleaciones a base de níquel por su resistencia a la corrosión o su propiedad de satisfacer normas sanitarias o ambas cosas. Los engranes destinados a operar a temperaturas elevadas pueden fabricarse de aceros para herramientas o aleaciones a alta temperatura.

La mayoría de los engranes se fabrican de acero al carbón y aleaciones bajas, incluso aceros carburizantes y el número limitado de aceros de baja aleación que responden favorablemente a la nitruración. En general, los aceros seleccionados para aplicaciones de engranes deben satisfacer dos series de requisitos que no siempre son compatibles: O sea los que implican fabricación y procesamiento y los que implican servicio. Los requisitos de fabricación y proceso incluyen maquinabilidad, forjabilidad, y respuesta al tratamiento térmico ya que afecta a la fabricación y el proceso. Los requisitos de servicio se refieren a la propiedad del engrane de funcionar satisfactoriamente bajo las condiciones de carga para la cual fue diseñado y de este modo abarcar todos los requisitos de propiedad mecánica, incluso resistencia a la fatiga y respuesta al tratamiento térmico, ya que afecta a esta y otras propiedades.

Debido a que la resistencia a la fatiga depende en parte a la limpieza del acero y de la naturaleza de inclusiones permisibles, la práctica de fusión también puede ser un factor en la selección del acero y se puede justificar la selección de un acero producido por fusión en vacío o refinación de electroescoria. La forma de la fresa con la cual se maquina un engrane de acero, es otro factor que puede afectar su funcionamiento. Muchos engranes para trabajo pesado se maquinan de blancos forjados que se han maquinado para proporcionar fluencia de grano compatible con el patrón de carga, más bien que ser maquinados de blancos cortados de una barra es tirada en fabrica.

Clasificación de las Fallas de los Engranes

El análisis sistemático de la falla de engranes se inicia con la clasificación de la falla por tipo. El tipo de falla se determina por la apariencia del engrane fallido y por el proceso o mecanismo de la falla, resta determinar qué causó la falla. En general el entendimiento de la falla es de considerable ayuda para aislar la causa o causas de la falla.

Los tipos de fallas de engranes se han agrupado en cuatro clases generales: Desgaste, fatiga de superficie, fluencia plástica y rotura. Cada una de estas clases generales se ha subdividido para lograr una identificación más precisa y específica.

Desgaste (para engranes definido como la pérdida de material a causa de contacto de las superficies de los dientes). Este se clasifica después como desgaste normal (pulido), rayadura (forma severa de desgaste corrosivo), cortadura, desgaste por interferencia, desgaste corrosivo, descascaramiento, quemadura y decoloración. Obviamente el desgaste normal no constituye una falla porque implica pérdida de metal a una velocidad demasiado lenta para afectar el funcionamiento dentro de la expectativa de duración del engrane. Sin embargo, el desgaste normal es una clasificación útil en el análisis de fallas porque proporciona una base para la comparación. El desgaste por interferencia puede no tener consecuencia grave que no sea el funcionamiento ruidoso o que puede tener como resultado la picadura severa en el punto de interferencia o la rotura del diente.

La fatiga de superficie, o sea la falla de un material como resultado de esfuerzos superficiales o subsuperficiales que excedan el límite de resistencia del material, se clasifica después como picadura inicial, picadura destructiva y desconchamiento. La picadura inicial puede no constituir falla si es autocorregible y no progresiva.

La fluencia plástica, que es una deformación de la superficie resultante de la elasticidad de la superficie metálica bajo cargas pesadas, se clasifica luego como de rodadura, martillado, ondulación y formación de riscos. La ondulación, o sea la formación de ondas en la superficie a ángulo recto con respecto a la dirección del deslizamiento, no constituye falla a no ser que se permita que progrese.

Un tipo de falla de fluencia plástica que se acompaña de agrietamiento superficial y subsuperficial, se conoce como trituración de superficie y se limita especialmente a engranes de acero carburizado.

La rotura se define como una fractura del diente completo o de una parte importante del mismo y se clasifica después como ruptura por fatiga, ruptura a partir de desgaste intenso, ruptura por sobrecarga, grietas de enfriamiento y de esmerilado, un tipo esencial de falla por desgaste en la cual se desprende suficiente metal del diente por desgaste para reducir la resistencia del diente al nivel al que ocurre la fractura.

No es poco común que un engrane falle en más de una modalidad. Por ejemplo, por desgaste y rotura o por fluencia plástica y rotura. La falla por una o más modalidades puede ocurrir simultáneamente o una puede ser resultado de la naturaleza continuada o progresiva de la otra. La clasificación de los diferentes tipos de desgaste o falla tienen por finalidad ayudar a distinguir entre causa y efecto, evaluar el grado o progresión de una condición observada y a determinar la acción correctiva apropiada.

Desgaste de Engranes y Fallas por Desgaste

El término "desgaste" como se aplica a los engranes se refiere principalmente a la pérdida de metal de la superficie de los dientes de engranes, pero no se limita a ella y a la pérdida acompañada de perfil (aspereza) como resultado del contacto entre metal y metal a través de la película lubricante. El término desgaste abarca en general el desgaste normal o pulimiento, desgaste moderado, desgaste destructivo y rozadura.

Lubricación y Desgaste de Dientes de Engranes. En muchos juegos de engranes cargados moderadamente a velocidades moderadas, se mantienen películas de aceite relativamente gruesas entre los dientes de los engranes y no ocurre contacto de metal a metal. No ocurre desgaste (excepto al arrancar y parar) y las marcas originales de herramientas son visibles

en los dientes aún después de largos períodos de funcionamiento.

Bajo condiciones de película integral, viscosidad del aceite (a temperatura de la película y la presión ejercida sobre la película) es la propiedad la que determina la capacidad de carga de los dientes del engrane, así como la resistencia al movimiento entre las superficies del diente.

En la práctica no siempre es posible tener lubricación de película integral. Cuando las superficies están en descanso bajo presión, la película gruesa se sale del área de la presión porque el movimiento es necesario para establecer y mantener tal película.

Bajo condiciones de baja velocidad, carga pesada, temperaturas extremas, superficies relativamente ásperas e irregulares, escaso suministro de lubricante o uso de aceite de viscosidad demasiado alta, puede haber solo una película parcial presente en el área cargada. En tales condiciones, habrá cierto grado de contacto de metal a metal entre las superficies.

Las superficies de los dientes de los engranes no son lisas, sino onduladas debido a las características inherentes de las máquinas herramienta utilizadas para cortarlas y acabarlas; sobrepuestas a las ondas hay incontables asperezas diminutas. Cuando las superficies se unen bajo lubricación insuficiente, el contacto ocurre entre crestas de las ondas superficiales. Entonces ocurre un número de acciones: Cizallamiento de películas de superficie; fuerte frotamiento y deformación de metal; aradura de asperezas sobre la superficie del material más duro en el metal más suave, lo cual da por resultado el desprendimiento de partículas de desgaste y la creación de nuevas asperezas; y finalmente, la adhesión de áreas altas diminutas que se han frotado hasta quedar limpias. Las adhesiones diminutas se rompen inmediatamente conforme continúa el movimiento, pero se adhieren en otro punto de manera que el metal es transferido de una superficie a otra. Se forman nuevas asperezas, algunas de las cuales se desprenden para formar partículas de desgaste. Estas acciones constituyen tanto el desgaste como la fricción.

El desgaste normal, llamado también pulimiento, se define como la pérdida lenta de material a partir de las superficies de los dientes de engranes en contacto a una velocidad que no afecta el funcionamiento de manera importante dentro de la expectativa de duración de los engranes. La pérdida de metal es muy lenta y generalmente bastante uniforme... El

desgaste normal en dientes de engranes de acero tienen una apariencia que va desde gris opaca hasta bruñida. Debido a una falla inherente de contraste, una superficie desgastada normalmente es difícil de fotografiar de manera significativa. En la figura 1, se muestra un piñon que muestra desgaste normal. Este piñon se fabricó de acero 8620 endurecido y se desmonto del lado posterior de un camión después de muchos ciclos de operación. El pulimiento se atribuyó a deslizamiento de alta velocidad.

Aunque el desgaste normal no entraña una forma muy benigna de desgaste adhesivo, obviamente, no constituye una falla. Para todo fin práctico, después de un período inicial en el cual ocurre desgaste a velocidad lenta, cesa el desgaste normal. En engranes de gusano es deseable el desgaste normal, porque debe ocurrir algún desgaste antes de que se estables-ca un contacto adecuado de los dientes. Los juegos de engranes cónicos espirales frecuentemente se corren con un compuesto para asentar para simular el desgaste normal antes de ponerlos en servicio.

Desgaste Moderado y Destructivo. El desgaste moderado se refiere a una pérdida de metal más rápida que el desgaste normal. El desgaste moderado no es necesariamente destructivo y puede desarrollarse en dientes de engranes cargados pesadamente o puede ser autocorregible o puede indicar el inicio de desgaste destructivo. El desgaste moderado puede egtar caracterizado por un incremento del nivel de ruido, pero generalmente no constituye una falla. La figura 2 presenta desgaste moderado de los dientes de un engrane helicoidal fabricado de acero endurecido y templado 4340.

El desgaste destructivo usualmente resulta de carga que es excesiva para el lubricante empleado. Este tipo de desgaste que es sinónimo del desgaste adhesivo, es causado por contacto directo del diente y no está relacionado con abrasivos ni corrosión. Tal desgaste ocurre sobre la mayor parte de la cara del diente del engrane, excepto en la línea de avance; no es evidente otra forma de falla. En general, el desgaste destructivo, algunas veces llamado desgaste de sobrecarga, ocurre a bajas velocidades y cargas altas, únicamente. Debido a que el desgaste destructivo destruye el perfil del diente del engrane, puede iniciar otro tipo de falla.

Causas del Desgaste Destructivo (sobrecarga). Como se indico anteriormente, el desgaste destructivo generalmente esta asociado a carga excesiva de los dientes para el lubricante que se está usando. Si la causa del desgaste se puede atribuir al lubricante, la sustitución por un aceite de mayor viscosidad o por un aceite que contenga aditivos de pre

sión extrema ligera, debe ser eficaz para controlar o eliminar el desgaste. Si un lubricante mejorado no es efectivo para controlar el desgaste de sobrecarga en este caso, la causa del desgaste puede ser atribuible a factores de diseño o el uso de materiales inadecuados para engranes o ambas cosas

El desgaste adhesivo asociado con sobrecarga y lubricación inadecuada, puede ser resultado de diseño marginal de los dientes, es decir, un diseño que no puede resistir satisfactoriamente cargas ligeras o normales debido a superficies que no soportan adecuadamente la carga. Usualmente, esta inadecuación se puede rastrear hasta superficies de soporte de carga que son de tamaño insuficiente o dureza insuficiente, o ambas cosas. Sin embargo, un mal alineamiento y la carga excéntrica pueden tener como resultado el desgaste de las superficies de dientes de diseño adecuado.

Rayadura. La rayadura entraña la remoción rápida del metal de las superficies de los dientes causada por la rotura de pequeñas partículas en contacto que se han unido entre sí como resultado del contacto de metal a metal. Es una forma de desgaste adhesivo en el cual la superficie dañada exhibe una apariencia rastrillada y surcada o rasgada con marca en dirección del deslizamiento en contraste con los surcos lisos o pulimiento de una superficie de diente desgastado por abrasión. En la rayadura, las crestas y raíces de los dientes se desgastan más, en tanto que el área de la línea de avance generalmente se conserva en su estado original. Esto se debe a que esencialmente hay contacto rodante en la línea de avance con poca o ninguna acción deslizante. Si el alineamiento del engrane es correcto y la rayadura no es resultado de puntos altos aislados de las superficies del diente, las áreas rayadas se prolongan por todo el ancho de los dientes.

La rayadura es un síntoma de capacidad de carga inadecuada del lubricante; en este sentido, la rayadura es similar al desgaste destructivo. Algunas veces especialmente cuando los engranes están mal alineados, el daño puede cesar y la superficie se puede volver más lisa conforme se extiende el área de contacto y más cara portadora de carga.

La rayadura algunas veces tiene relación con un incremento de la temperatura del aceite suficiente para afectar la lubricación, por ejemplo, por reducir notablemente la viscosidad del aceite. El aumento en la temperatura puede surgir de un incremento en la velocidad de operación o carga o de un calentamiento de la entrada de aceite.

En la figura 3 se muestran dos casos de rayadura. En la figura 3a se muestra la rayadura inicial sobre un engrane helicoidal de cara ancha. Este engrane se fabricó de acero forjado 4340 que se endureció y templó a 300 Bhn. El engrane se terminó por medio de fresado y la rayadura se atribuyó a la presencia de puntos altos sobre los dientes del engrane a consecuencia de la operación de fresado. En la figura 3b se muestra rayadura moderada de un engrane recto, con un ángulo de presión de 20° . Este engrane se fabricó de acero 3310 y se carburizó, endureció y templó a 60 Rockwel C y se terminó por esmerillado. No se reportó la causa de la rayadura.

Desgaste por Interferencia. El desgaste por interferencia ocurre cuando los dientes del engrane casan inadecuadamente al iniciarse o concluirse el contacto. Es un tipo de desgaste por sobrecarga localizada en el cual toda la carga se concentra en el punto de engranamiento bajo en el perfil del flanco de impulsión con la cresta que casa o al desengranar el flanco impulsado y la cresta que casa. El desgaste por interferencia puede variar desde una línea ligera de desgaste o picadura sin consecuencias graves excepto funcionamiento ruidoso hasta daño más severo, en el cual el flanco está escopleado y la cresta fuertemente enrollada, usualmente resultando una falla total del par.

El desgaste por interferencia no es influido en grado alguno por la lubricación. Aunque su apariencia es similar a otros tipos de desgaste y rayadura, se puede distinguir de ellos por la ubicación del área dañada. El desgaste por interferencia usualmente se puede rastrear a errores de diseño, generación de dientes o alineamiento.

Desgaste Abrasivo. El desgaste abrasivo es el daño superficial causado por la presencia de partículas abrasivas en el lubricante. Las partículas pueden ser polvo no removido por completo del sistema, arena o escamas procedentes de la caja de engranes fundida, impurezas del aceite, partículas abrasivas procedentes del medio en que funciona el engrane, o metal desprendido de las superficies del diente o de las chumaceras. El desgaste abrasivo es mucho más común que el desgaste por sobrecarga. Un abrasivo común en engranes de automotores es la arena proveniente de cajas de hierro fundido. La mayoría de las cajas se sumergen en un sellador del tipo de pintura antes de maquinarlos con objeto de sellar fugas debidas a porosidad y para adherir cualquier arena residual de fundición a la superficie del metal. El desecho...de desgaste, virutas de maquinado y contaminantes del ambiente son otros tipos de abrasivos que frecuentemente se encuentran en los lubricantes.

La apariencia del desgaste abrasivo depende del tamaño de la partícula y de la naturaleza del contaminante abrasivo.

Una forma severa potencial de desgaste abrasivo se conoce como rasguño. Se caracteriza por líneas cortas como rasguños o marcas sobre la superficie en contacto de los dientes del engrane en la dirección del deslizamiento.

Desgaste Corrosivo. El desgaste corrosivo es un tipo de deterioro de la superficie que es causada por reacción química del lubricante o de contaminantes tales como agua o ácidos, con la superficie del diente del engrane. Algunas veces la corrosión ataca a otras superficies del engrane también, lo cual hace que la causa del daño sea relativamente fácil de distinguir. En la figura 4 se muestra el desgaste corrosivo de un engrane recto.

El desgaste corrosivo puede tener como resultado la pica dura de las superficies de contacto; la evidencia de tal picadura puede ser removida por el desgaste, en cuyo caso las superficies en contacto aparecen pulidas.

Frecuentemente, como resultado de la exposición a ácidos o a la herrumbre, la corrosión se inicia antes de que el engrane se monte en una unidad. Los engranes de acero que retiene un óxido ligero tenaz resultante del tratamiento térmico tienen una resistencia razonablemente buena a la herrumbre, aún cuando hayan sido bañados en una solución alcalina para remover los aceites del enfriamiento. Los engranes que se han esmerilado o amolado a chorro después del tratamiento térmico tienen superficies altamente reactivas y son más susceptibles a la herrumbre si se almacenan en una área húmeda sin la protección de un revestimiento contra la herrumbre. Los engranes que han sido lavados en sustancias químicas fuertes y expuestas inadvertidamente a ellas por períodos prolongados pueden exhibir severa corrosión y se deben raspar.

Descamación. La descamación se clasifica como un tipo de desgaste en el cual el material se desprende de la superficie del diente en forma de obleas o escamas muy delgadas y pequeñas. Inicialmente, se caracteriza por una apariencia opaca y ligeramente áspera. En general, la descamación se limita a los aceros más suaves y a los bronce para engranes.

Quemadura. La quemadura es un sobrecalentamiento localizado a temperaturas elevadas causadas por fricción excesiva resultante de sobrecarga, velocidad excesiva o lubricación inadecuada.

Fallas por Fatiga de Superficie

La fatiga de superficie es la modalidad más común de falla de engranes y se caracteriza por grados variables de picadura y algunas veces por descantillado de las superficies de los dientes.

Mecanismo De La Fatiga De Superficie. Cada vez que los dientes de un engrane engranan, girando y deslizando mutuamente, la superficie y la subsuperficie del metal esta sujeta a esfuerzos de tensión, compresión y cizallamiento.

Picadura Inicial. Los puntos altos o asperezas en las superficies de los dientes de engranes nuevos se esfuerzan mayormente aún bajo carga normal y las pequeñas áreas involucradas pueden sufrir fatiga en pocos ciclos y caer, dejando picaduras pequeñas. Cuando los puntos altos o asperezas están a una distancia de la línea de avance, donde ocurre deslizamiento o rodamiento, se pueden desgastar uniformemente durante el asentamiento antes de que pueda ocurrir la fatiga y la picadura. Por otro lado, en la línea de avance o cerca de ella, donde hay rodamiento, pero poco o ningún deslizamiento, frecuentemente ocurre la picadura inicial. Esto se conoce frecuentemente como "picadura de línea de avance". El hecho de que la dirección del deslizamiento se recienta en la línea de avance, también se cree que sea un factor en la picadura de la línea de avance.

La picadura inicial puede ser correctiva en cuanto se eliminan las asperezas, se alivian los esfuerzos y cesa la picadura. Al ocurrir esto, usualmente se alisan las superficies con la operación continuada.

Picadura Destructiva. Siempre que los engranes están sobrecargados puede ocurrir falla por fatiga y picadura destructiva de la superficie del metal, usualmente en áreas inferiores a la línea de avance de los dientes impulsores y después de períodos largos de funcionamiento si la sobrecarga es suficientemente grande. Sin embargo, este tipo de picadura se puede desarrollar en un período relativamente breve de operación.

En cualquier momento, las áreas de los dientes impulsores e impulsados en contacto entre sí están sujetos a los mismos esfuerzos. Sin embargo, normalmente ocurre primero la picadura y se puede limitar a las áreas inferiores de la línea de avance de los dientes de los engranes impulsores. Hay dos razones para esto: (a) El engrane impulsor, que usualmente es de menor diámetro gira a más revoluciones y su menor número de dientes están sujetos a más esfuerzos repetidos; y (b) en

los dientes del engrane impulsor, la dirección del deslizamiento es opuesta a la del rodamiento entre las superficies y el estiramiento resultante de la superficie metálica promueve el crecimiento de las grietas por fatiga y finalmente la formación de picaduras.

En la picadura destructiva (progresiva) las picaduras continúan formándose y se agrandan al desmoronarse los bordes o al romperse las picaduras una en otra, finalmente, la forma del diente se puede destruir, el engrane se vuelve ruidoso y funciona ásperamente y si la condición progresa a un grado suficiente, los dientes se pueden fracturar.

Los problemas del control de atmósfera del horno durante la carburización y la protección inadecuada contra la descarburización durante la austenización, son causas relativamente comunes de picadura destructiva en engranes cargados pesadamente.

Desconchamiento. Un tipo de desconchamiento se puede considerar picadura destructiva, siendo las diferencias entre los dos cuestión de grado principalmente. En este tipo de desconchamiento, se une una serie de picaduras por falla del metal entre ellas y finalmente una partícula relativamente grande de metal se desconcha de la superficie. Tal desconchamiento ocurre sólo después de muchos ciclos de operación. Cuando el desconchamiento ocurre después de relativamente pocos ciclos, no está relacionada con picadura destructiva, si no frecuentemente es resultado de defectos subsuperficiales, esfuerzo interno excesivo debido a tratamiento térmico o sobrecargas excéntricas severas. Este tipo de desconchamiento ocurre más comúnmente a lo largo de los bordes superiores o extremos de dientes de engranes y las cavidades resultantes frecuentemente son mayores, más profundas y más nítidamente definidas que los desconchamientos asociados con picadura destructiva.

Sólo raramente se encuentran los dos tipos de desconchamiento en el mismo engrane. Una excepción, la da un piñón de acero de un juego de engranes hipoidales, se muestran en la figura 5. La desconchadura grande visible arriba a la derecha resultó de picadura destructiva que se originó en la línea de avance y arriba de ella. Sin embargo, el desconchamiento que ocurrió en los bordes de los dientes (extrema izquierda) fue el resultado de sobrecarga extrema en un lado del piñón que después se determinó haber sido causada por error dimensional.

Fallas por Fluencia Plástica

El término "fluencia plástica" se refiere a la deformación

superficial del metal del diente del engrane como resultado de elasticidad bajo cargas pesadas. Aunque más comunmente asociada con metales suaves y dúctiles, la falla por fluencia plástica también ocurre en aceros de endurecimiento integral y aceros cementados. La fluencia plástica es siempre el resultado de cargar un engrane más allá de la resistencia al punto cedente del metal en la zona de contacto. Los tres tipos principales de fluencia plástica en engranes son por rodadura y martillado, ondulación y de riscos.

Martillado y Rodadura. Si la carga compresiva es alta, si la vibración causa altas crestas de carga o si la acción de los dientes produce carga de alto impacto, las superficies de los dientes pueden experimentar rodadura y martillado, especialmente si son relativamente suaves. En los engranes estos efectos se caracterizan por aletas en los bordes superiores o extremos de los dientes, por puntas de dientes muy redondeadas o por una depresión en la superficie del engrane impulsor al iniciarse el contacto de un solo diente con un risco levantado cerca de la línea de avance del engrane impulsado. Las partes restantes de los dientes usualmente se deforman en grado considerable antes de que ocurra la destrucción completa. Aunque la causa de la falla reside en el material del engrane, la carga o ambos, la mayor viscosidad del aceite puede contribuir a amortiguar los golpes y con ello prolongar la duración del engrane. Los bordes de pluma en los extremos y superficies superiores de los dientes que se muestran en la figura 6. fueron resultado de rodamiento y martillado de un metal para engranes que era demasiado para la aplicación que se pretendía.

Las fallas causadas por rodamiento y martillado, son fáciles de reconocer y en general, fáciles de corregir. Usualmente la corrección consiste en seleccionar un material para engranes un tanto más duro (y más fuerte) o para aceros de endurecimiento integral, especificar una dureza de superficie más alta o recurrir a un método de endurecimiento superficial, tal como el de flama o inducción para obtener una dureza superficial considerablemente más alta.

Aunque la falla de engranes de acero carburizado a causa de rodamiento y martillado relativamente no es común, tal falla puede ocurrir si la dureza superficial de los dientes del engrane carburizado es inferior a la estándar. Entre las causas comunes de dureza superficial baja son: (a) una superficie carburizada y cementada con contenido de carbón pobre, (b) descarburización de la superficie y (c) omisión inadvertida de endurecer después de la carburización, omisión que es más probable que ocurra cuando los engranes se carburizan y se austenizan en tandas en diferentes hornos.

El daño por rodamiento y martillado se puede reducir reduciendo la carga al engrane y con ello reduciendo la carga a los dientes o reduciendo la carga de choque, si tal choque se debe a alguna condición externa.

Ondulación. (véase figura 7) es un patrón de forma semejante a ondas que aparecen en la superficie del diente a ángulo recto con respecto a la dirección del deslizamiento y es causado por esfuerzo de cizallamiento en las superficies del metal. Algunas veces estos esfuerzos se pueden aliviar cambiando a un lubricante de un coeficiente de fricción más bajo.

La ondulación ocurre mayormente en engranes hipoidales cementados. En general ello no conduce a falla inmediata, si no más bien es una indicación de carga excesiva y debe servir como advertencia de posible falla futura.

Los Riscos. Usualmente aparecen como líneas diagonales (véase figura 8) a través de la superficie del diente, pero se pueden caracterizar por un patrón en forma de cola de pescado orientado en la dirección del deslizamiento. Si progresa la formación de riscos, la superficie del metal se retrabaja continuamente, lo cual da por resultado picadura y falla final del tipo de fatiga. En general, la formación de riesgos está asociada con carga excesiva o lubricación inadecuada o ambas cosas.

Trituración de la Cementación. Es una forma de fluencia plástica que ocurre en engranes carburizados. La causa más común de esta carburización es la insuficiente profundidad de cementación para una dureza de núcleo y carga dada, aun que la condición también puede resultar de sobrecarga severa o de un gran radio de curvatura del perfil del diente. La trituración de la cementación está acompañada de ... agrietamiento. Las grietas se prolongan desde la superficie hacia el material del núcleo y frecuentemente avanzan a través de la cara del diente del engrane sin evidencia de picadura. En general, las grietas no se limitan a ... las partes de la cabeza y la raíz del diente, si no se extienden sobre la mayor parte de la superficie del diente.

La trituración de la cementación se corrige comunmente aumentando la profundidad de la cementación carburizada. La selección de un acero con mayor posibilidad de endurecimiento permite el tratamiento térmico a mayor dureza del núcleo y mayor resistencia, lo cual también puede eliminar la causa de la trituración.

Fallas por Ruptura.

La ruptura se refiere por lo general a la fractura de todo un engrane, del diente o una parte sustancial del mismo.

Ruptura por Fatiga. Los dientes de engranes se cargan como vigas voladizas con carga aplicada a lo largo de las superficies de contacto. A los dientes del engrane se les da forma de tal modo que la carga aplicada causa el máximo esfuerzo de flexión en el área de la raíz del diente. De esta manera cualquier diente que se rompe en la raíz ha fallado a causa de flexión. En alguna falla de fatiga por flexión, una grieta que se inicia en la raíz se puede prolongar hacia arriba en la dirección de la punta del diente. Tal ... grieta usualmente se puede rastrear hasta su origen por marcas de playa en la superficie de la fractura.

Los esfuerzos de flexión repetidos que exceden el límite de resistencia del material y que causan la ruptura por fatiga, pueden resultar de una variedad de factores, incluso diseño deficiente, desalineamiento, sobrecarga y elevadores de tensión inadvertidos, tales como muescas o defectos superficiales o subsuperficiales.

La mayoría de los engranes diseñados para resistencia máxima a la fatiga se cementan mediante carburización, tratamiento destinado a proporcionar una capa superficial extremadamente dura y resistente soportada por un núcleo tenaz.

Ubicación de la Ruptura del Diente. En las fallas que involucran ruptura de dientes de engranes, la ubicación de la ruptura en el diente puede ser importante para ayudar a determinar la causa de la falla o para establecer el mecanismo de la falla. Los lugares en los cuales se rompen los dientes comúnmente, son: Filetes o raíces, bordes o extremos, o superficies superiores.

La carga de contacto máximo en engranes generalmente ocurre a media cara del diente y es posible que se originen fracturas en esas regiones. Cuando ocurre ruptura en los filetes de raíz generalmente es indicación de sobrecarga severa. Las fracturas por fatiga se pueden originar también en filetes de raíz, que son las partes de los dientes sujetas al más alto esfuerzo de flexión. Las marcas de playa relativamente lisas de las superficies de la fractura son características de la propagación lenta de la grieta.

La figura 9 muestran ruptura en un extremo de un diente de un engrane, típica de la resultante de desalineamiento

to. Entre las causas comunes de desalineamiento se encuentran una desviación excesiva cuando se cortaron los dientes, deflexión elástica de la flecha o de la caja de engranes, claro de cojinete excesivo e inexactitudes en el alineamiento del barrenado.

La ruptura por fatiga en las superficies superiores de los dientes, tal como se muestra en los dientes del piñón de la figura 10, ocurre en engranes fuertemente cargados con un perfil del diente que no permite la deflexión del diente bajo carga. La superficie superior del diente es el primer punto de contacto y por consiguiente la más vulnerable a la fractura. La solución a este problema es modificar el diseño para aliviar la cabeza del piñón y la raíz del piñón.

Ruptura por Fatiga Causada por Elevadores de Esfuerzo. Las muecas mecánicas en forma de surcos o marcas de herramientas y las muecas metalúrgicas en forma de defectos superficiales y subsuperficiales, son elevadores comunes de esfuerzo que pueden contribuir a ruptura por fatiga de dientes de engranes. En general, el origen de tales elevadores de tensión se puede encontrar en el proceso defectuoso o material defectuoso, aunque las características del diseño, tales como radios de filete inadecuados en las raíces de los dientes constituyen también muecas mecánicas que promueven la falla por ruptura.

Ruptura a Partir del Desgaste Intenso. Este tipo de ruptura se clasifica más apropiadamente como falla por desgaste. Así por ejemplo, el desgaste abrasivo o corrosivo fuerte puede remover suficiente metal del engrane para reducir la sección del diente y la capacidad de soporte de carga del diente; al punto de que es inevitable la ruptura. La placardura severa, causada por fatiga de superficie, puede conducir también a la ruptura.

La ruptura por sobrecarga puede involucrar fatiga o no; desde el punto de vista del análisis de fallas, la distinción es muy importante.

La ruptura por sobrecarga que no implica fatiga no es muy común, pero puede resultar de (a) sobrecarga de choque repentino, (b) acuñadura de dientes debido a falla de chumacera, (c) flexión de flecha o (d) la introducción de grandes pedazos de material extraño entre engranes que engranan. La superficie de fractura producida por ruptura de sobrecarga no exhibe la progresión de grieta característica de la falla por fatiga; en su lugar tiene una aparición sedo

sa en los metales más duros y más quebradizos y una apariencia fibrosa y desgarrada sin patrón definido en los metales más dúctiles. Cuando se rompen varios dientes o partes de dientes, el examen puede mostrar que la primera ruptura fue el resultado de la fatiga y que las otras rupturas ocurrieron subsecuentemente como resultado de los desechos y la carga de choque causada por el diente roto.

Agrietamiento. El agrietamiento que resulta del proceso abusivo, notablemente, grietas por esmerilado y enfriamiento, es un tipo más común de daño y no se descubre antes de que el engrane se ponga en servicio, ello conduce generalmente a ruptura. Finalmente el enfriamiento puede resultar de una característica del diseño del engrane que contribuye a un aumento de los esfuerzos internos o reduce la resistencia del engrane o ambas cosas.

Grietas por Esmerilado. Uno de los peligros de las grietas por esmerilado es que algunas veces no aparecen hasta que la superficie afectada se ha sujetado a carga; en consecuencia puede escapar a la detección aún cuando la inspección posterior a la fabricación sea rigurosa. Las grietas por esmerilado son grietas superficiales finas que usualmente siguen un patrón definido. Se producen durante el esmerilado y son causadas por el uso de una rueda incorrecta, velocidad o alimentación incorrecta o en el caso de aceros endurecidos, especialmente los de alto contenido de carbono, por transformación de austenita retenida en martensita como resultado de los esfuerzos impuestos por el esmerilado o por la formación de martensita "blanca" no templada, ..como resultado de sobrecalentamiento localizado y autoenfriamiento. Las grietas por esmerilado pueden ser orígenes de ruptura por fatiga o desconchamiento inducido por fatiga.

Las grietas por enfriamiento resultan de los esfuerzos internos excesivos desarrollados durante el enfriamiento de la temperatura de austenización y al igual que las grietas por esmerilado, pueden ser origen de ruptura por fatiga. Usualmente son grietas del grueso de un cabello que ocurre por la superficie del diente; son visibles, siguiendo el radio de la raíz del diente o siguen una dirección aleatoria en los extremos del diente. En la figura 11 se muestran grietas típicas de enfriamiento. Si las grietas son grandes el engrane puede fallar en servicio después de relativamente pocos ciclos de una manera similar a la ruptura por sobrecarga. En general, las grietas por enfriamiento son causadas por temperaturas excesivas de austenización o velocidades excesivas de enfriamiento, enfriamiento no uniforme o restricción indebida durante el enfriamiento.

Agrietamiento Relacionado con El Diseño. Las aceiteras, cuñeros, nervaduras delgadas y ángulos agudos se encuentran entre las características de diseño que contribuyen el agrietamiento. En general, el agrietamiento relacionado con el diseño se puede rastrear hasta elevadores de esfuerzo mecánico o resistencia inadecuada o ambas cosas. La colocación de aceiteras en engranes puede contribuir al agrietamiento y ruptura prematura.

La falla del piñón de acero que se muestra en la figura 12 resultó de una combinación de factores de diseño desfavorables. El espesor de la pared de este piñón hueco era marginal, cuando mucho, para las cargas impuestas a los dientes. Sin embargo, aún más crítica fue la colocación de un cuñero en la pared delgada. El efecto de muesca en la base del cuñero produjo una grieta por fatiga a través de la anchura del engrane y ocurrió la fractura poco después.

Estadísticas de Tipos y Causas de Fallas de Engranes

Las estadísticas de fallas de engranes, basadas en un muestreo adecuado, son de valor para el análisis de fallas porque proporcionan una visión general de los tipos y causas de la falla del engrane y las frecuencias relativas con que ocurren.

Informe estadístico de fallas de engranes en un período de 35 años. Todas las fallas se clasificaron tanto por tipo como por causa, los resultados se resumen en la tabla siguiente.

Tipos de Falla. Como se muestra en la tabla, la ruptura constituye el mayor porcentaje de las fallas de engranes (61.2%) seguidas de la fatiga de superficie (20.3%), desgaste (13.2%) y fluencia plástica (5.3%). La mayoría de las fallas por ruptura implicaron dientes de engranes; la ruptura de dientes por fatiga (32.8%) fue más común que la ruptura de dientes por sobrecarga (19.5%).

Como se muestra en la tabla, la mayoría de las fallas de engranes se relacionan con el servicio (74.75%). Las dos causas principales de falla fueron sobrecarga continua ... (25%) y armado incorrecto (21.2%). El tratamiento térmico defectuoso fue la causa siguiente más común de falla (16.2%) seguida de errores de diseño (6.9%), defectos de fabricación (1.4%) y defectos del material (0.8%).

Tabla 1. Resumen de un Informe Estadístico sobre tipos y -
Causas de 931 Fallas de Engranajes en un Período de 35 Años.

Tipo de Falla, %	
Ruptura Total	61.2
Ruptura por fatiga, dientes	32.8
Ruptura por fatiga, barreno	4.0
Ruptura por sobrecarga, dientes	19.5
Ruptura por sobrecarga, barreno	0.6
Astilladura, dientes	4.3
Fatiga de Superficie, Total	20.3
Picadura	7.2
Desconchamiento	6.8
Picadura y desconchamiento	6.3
Desgaste, Total	13.2
Desgaste abrasivo	10.3
Desgaste adhesivo	2.9
Fluencia Plástica, Total	5.3
Causas de Falla, %	
Causas Relacionadas con el Servicio, Total	74.7
Montaje incorrecto	21.2
Lubricación inapropiada	11.0
Sobrecarga continua	25.0
Carga de impacto	13.9
Falla de baleros	0.7
Materias extrañas	1.4
Error de operario	0.3
Manejo abusivo	1.2
Tratamiento Térmico, Total	16.2
Dureza excesiva del núcleo	0.5
Dureza insuficiente del núcleo	2.0
Profundidad excesiva de la cementación	1.8
Profundidad insuficiente de la cementación	4.8
Endurecimiento inapropiado	5.9
Templado inapropiado	1.0
Causas Relacionadas con el Diseño, Total	6.9
Diseño inapropiado	2.8
Selección inapropiada de material	1.6
Especificaciones de tratamiento térmico inadecuado	2.5

Causas Relacionadas con la Fabricación, Total		1.4
quemadura por esmerilado	0.7	
Marcas de herramienta o muescas	0.7	
Causas Relacionadas con el Material		0.8
Defectos de forja	0.1	
Defectos del acero	0.5	
Acero mezclado o composición incorrecta	0.2	



Figura 1. Piñón hipoidal, fabricado de acero S520 carburizado y endurecido, que exhibe desgaste normal (pulido).



Figura 2. Engrane helicoidal, hecho de acero endurecido y templado 4340, que exhibe desgaste moderado.



Figura 3. Rayado inicial de un engrane helicoidal de acero 4340 de cara ancha (b). Rayado moderado de un engrane recto de acero 3310 con un ángulo de presión de 20° .

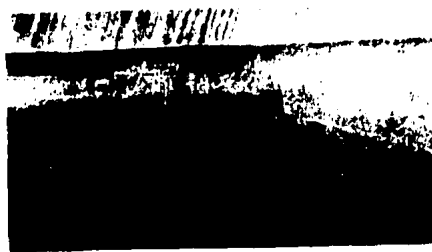


Figura 4. Desgaste corrosivo (parches en las flechas) de un engrane recto.



Dos tipos de desconchamiento en el piñón de acero de un juego de engranes-hipoidales: El extremo izquierdo, desconchamiento debido a sobrecarga, extrema en los bordes de los dientes; a la extrema derecha, (parche oscuro -- grande): Desconchamiento debido a picadura destructiva.



Figura 7. Rizamiento, patrón en forma de ondas en la superficie de un diente de engrane a ángulos rectos - con respecto a la dirección del deslizamiento.



Figura 6. Un caso de rodamiento y martillado en el que los extremos y superficies superiores entre dientes del engrane de acero se han deformado ondeando los bordes.



Figura 8. Formación de lomos en un engrane hipoidal fuertemente cargado, fabricado de acero cementado.



Figura 9. Rotura en un extremo del diente de un engrane, causada por desalineamiento.



Figura 10. Rotura en las superficies superiores entre dientes de un piñón, la cual ocurría causa de que el perfil del diente no permitió la deflexión bajo carga.



Figura 11. Grietas por enfriamiento que se prolongan por las superficies entre dientes a partir de las raíces.



Figura 12. Pinón de acero de caja delgada que se fracturó en un cuñero interno.

BIBLIOGRAFIA

1. Hugh Crowler, A Portable Laboratory for Field Metallography, Metal Progress, Apr 1974, p 76 and 79.
2. Inspection Microscope Tackles Variety of Problem Assignments, - Metal Progress, Aug 1972, p 69.
3. Fracture Toughness, ASTM STP 514, American Society for Testing- and Materials, 1972.
4. W. E. Littman and R. L. Widner, Propagation of Contact Fatigue- From Surface and Subsurface Origins, ASME Paper No. 63-WA/CF-2.
5. B. S. Lement, Distortion in Tool Steels, American Society for- Metals, Metals Park, Ohio, 1959.
6. E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, J. Wiley and --- Sons, Inc., New York, 1965, p 167-186.
7. Ming Feng and B. C. Rightmire, The Mechanism of fretting, Lubri- cation Eng, June 1953.