

Evaluación de la Vida Residual de Equipos y Construcciones metálicas Utilizando el Método de Memoria Magnética Metálica

Autor: Doctor en Ciencias Técnicas Profesor Anatoly Dubov

Director General de Energodiagnostica Moscu Rusia

Se consideran los problemas asociados a la evaluación de la vida residual de componentes metálicos y las formas de solución basadas en métodos rápidos de END.

El artículo describe las ventajas que ofrece el método de memoria magnética metálica (método MMM) para detectar zonas de iniciación de grietas directamente sobre un equipo en operación y para rastrear el desarrollo del proceso de falla por fatiga del metal en estas zonas. Al inspeccionar un equipo operando al 100% de su potencia utilizando el método MMM, se pueden identificar todas las zonas potencialmente peligrosas o con defectos en desarrollo y retirarlas oportunamente durante el período de reparaciones programadas. Por lo tanto, ofrece una oportunidad para evaluar la vida remanente de ese equipo.

La norma ISO 24497-1: 2007 (E) define el método de memoria magnética metálica (método MMM) como un método de ensayo no destructivo basado en el análisis de la distribución del campo de fuga auto-magnética (SMLF) en la superficie de los componentes metálicos de un equipo para determinar Zonas de Concentración de Tensiones (SCZ), imperfecciones y heterogeneidades de la estructura metálica y de las uniones soldadas.

Una característica específica, que distingue al método MMM de otros métodos NDT, es que detecta la concentración de esfuerzos sobre los defectos, es decir, evalúa el peligro de generar daño a partir de detectar el estado de tensión del metal o de las uniones soldadas, no solo de las dimensiones de los defectos volumétricos o las fisuras.

El método MMM y los instrumentos de inspección correspondientes se utilizan en más de 1000 empresas rusas en diversas industrias. Además de Rusia, el método ha sido introducido y probado en empresas en otros 25 países del mundo.

Palabras clave: estado de energía, evaluación de la vida útil, memoria magnética metálica, ensayos no destructivos, evaluación de la vida residual, zona de concentración de tensiones, estado tenso.

- Introducción

Cuando hablamos de la evaluación de la vida útil de componentes metálicos de un equipo entre los principales problemas científico-técnicos deben ser señalados los siguientes:

- la falta de un concepto basado en la ciencia para la determinación de la vida útil remanente
- eficacia insuficiente de los métodos y dispositivos convencionales de ensayo no destructivo (END) en el diagnóstico precoz de los daños por fatiga y en la investigación de las propiedades estructurales y mecánicas del

metal

- baja efectividad de las técnicas de referencia disponibles para el cálculo de resistencia debido a la falta de conocimiento de las propiedades mecánicas estructurales del metal actuales de todos los elementos y partes metálicas de un equipo
- ausencia en la práctica común de dispositivos NDT eficaces y métodos que permitan realizar una inspección del 100% de los componentes metálicos con el fin de evaluar integralmente el estado de esfuerzo-deformación y la vida útil individual de cada unidad o agregado de unidades de un equipo

La realización de una inspección al 100% de los componentes metálicos de un equipo utilizando métodos convencionales de END (UT, MT, etc.) tiene un alto nivel de costes, aunque resulta ineficaz debido a su incapacidad en la detección de daños por fatiga en la fase inicial de su desarrollo.

Por regla general, la resistencia a la fisuración se supone que es un parámetro básico, que caracteriza el estado del metal de un equipo que funciona bajo la condición de carga cíclica. Es necesario tener en cuenta que esta característica condicional del material, se determina por la relación (que es real en un tiempo especificado, en condiciones especificadas) entre la tasa del crecimiento actual de la grieta y la tasa crítica para el material en cuestión. Sin embargo, esta característica se determina en especímenes y la transferencia de los resultados de las pruebas de laboratorio a las condiciones de funcionamiento reales no proporciona una evaluación objetiva de la eficiencia de los componentes metálicos.

Pero ¿es posible llevar a cabo una evaluación de la tasa de crecimiento de las grietas y detectar las zonas de su desarrollo en condiciones reales directamente sobre los componentes metálicos?

1. Una característica específica del método MMM y su capacidad para evaluar la vida útil de los componentes metálicos en SCZ

Se sabe que el objetivo primordial de la inspección del 100% de un equipo es detectar las zonas de concentración de tensiones potencialmente peligrosas (SCZ), en las que se produce el desarrollo de daños debido a la corrosión, la fatiga y la fluencia. Sugerimos aplicar el método de Memoria Magnética Metálica (MMM), el cual está diseñado principalmente para la detección de SCZs basado en la inspección rápida de toda la superficie de los componentes metálicos, exactamente para la solución de este problema. El método no requiere la realización de trabajos preparatorios.

Las SCZ representan no sólo zonas conocidas previamente, donde las características específicas de la estructura crean diversas condiciones para la distribución de tensiones inducidas por la carga de trabajo externa. Pero también representan áreas aleatoriamente localizadas, donde, debido a la inhomogeneidad inicial del metal combinado con cargas de trabajo adicionales fuera de diseño, se

produjeron grandes esfuerzos (en general, esfuerzos de cizallamiento).

En la referencia [1] se analiza la física de la fatiga que daña al metal y se ofrece un patrón de desarrollo de este proceso, que abre una posibilidad para evaluar cuantitativamente el estado del material en caso de la aplicación del método de la memoria magnética del metal.

De acuerdo con la norma ISO 24497-1: 2007 (E) el método de memoria magnética metálica (método MMM) - es un método de ensayo no destructivo basado en el análisis de la distribución del campo de fuga auto-magnética (SMLF) en las superficies de los componentes para la determinación de zonas de concentración de tensiones (SCZ), imperfecciones y heterogeneidad de estructuras metálicas y juntas soldadas.

El campo de fuga magnética (SMLF) es un campo de fuga magnética que ocurre en la superficie del componente en las zonas de bandas de deslizamiento estables donde han ocurrido dislocaciones bajo tensiones operacionales o residuales o en las zonas de marcada heterogeneidad en la microestructura del material.

La lectura de SMLF proporciona una posibilidad única para evaluar integralmente en una prueba rápida el estado de los equipos reales teniendo en cuenta la inhomogeneidad estructural, la distribución de tensiones residuales y los macrodefectos.

El parámetro de diagnóstico básico según el método MMM es el gradiente del campo de fuga magnética H_p (dH_p/dx) o el factor de intensidad de variación de este campo (K_{in}), que es registrado cuando se realiza la exploración a lo largo de la superficie de los componentes metálicos usando el sensor del magnetómetro especializado. Se ha establecido que este parámetro de diagnóstico, debido al efecto magnetomecánico, refleja directamente el estado energético de las capas superficiales y profundas del metal en las ZCS. Al mismo tiempo, el valor máximo del gradiente de campo, determinado en la superficie del metal con precisión de hasta 1 mm, corresponde al punto de iniciación de una fisura. La estructura en esa zona experimenta el proceso de tensión más intenso y, finalmente, se produce una falla. Las fisuras que orientadas en la dirección del deslizamiento, alcanzan dimensiones críticas. Como resultado, se desarrollan áreas con fisuras grandes y otras áreas con microfisuras.

Investigaciones de laboratorio sobre especímenes en condiciones de carga estática y cíclica dieron como resultado la obtención de la relación de energía entre parámetros magnéticos y mecánicos:

$$m = \frac{K_{in}^{lim}}{K_{in}^{ave}} = \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_y} \right)^2, \quad (1)$$

donde K_{in}^{ave} y K_{in}^{lim} son los valores del gradiente de campo magnético registrados en SCZ de especímenes o directamente sobre componentes metálicos de un equipo, respectivamente, cuando se alcanzan el límite elástico del metal σ_y y la tensión de rotura σ_t .

La Figura1 muestra el gráfico de la variación del gradiente de campo K_{in} dependiendo del número de ciclos de carga durante la prueba de tracción de un espécimen de tubo $\varnothing 108\text{mm} \times 4\text{mm}$ (acero 20) en la amplitud máxima de tensión de 276MPa y a una frecuencia de 10Hz. El gráfico obtenido caracteriza las cuatro etapas del fallo por fatiga del metal del espécimen en un SCZ, que se formó durante los primeros 1000 ciclos de la aplicación de carga:

Etapa I - preparatoria, consiste en la redistribución de no-uniformidades longitudinales de deformación, que forman bajo las condiciones creadas una secuencia "conveniente" para el metal. En esta etapa, el proceso se caracteriza por una velocidad comparativamente alta, y su duración es comparativamente corta - 1 ÷ 1,5% del número de ciclos limitantes;

Etapa II - básica, acumulación, caracterizada por un lento desarrollo del proceso. Su duración es comparativamente larga;

Etapa III - se observa el desarrollo intensivo de la mancha plástica, provocando la aparición de microfisuras en las SCZ (etapa de endurecimiento antes de la rotura);

Etapa IV - el período de la transformación de un micro fisura en una macro fisura hasta la rotura.

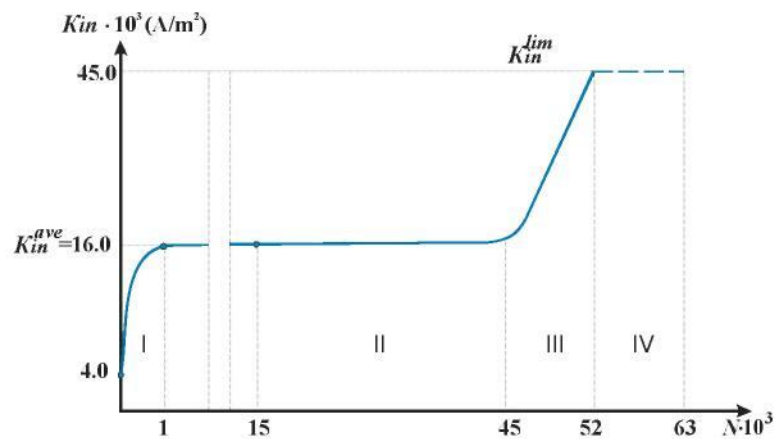


Fig.1. Variación del gradiente del campo en el SCZ de la muestra # 6 dependiendo del número de ciclos de carga de tensión.

Los resultados presentados de las investigaciones experimentales en una muestra de tubería indican la posibilidad de aplicar el método de memoria magnética metálica cuando se evalúa la vida útil de los componentes metálicos reales.

La exactitud de la relación (1) se confirmó muchas veces durante la inspección directamente sobre componentes metálicos usando el método MMM. De acuerdo con los resultados de los cálculos de diseño, presentado en la referencia [1], el parámetro magnético K_{in} caracteriza la densidad de energía magnética w_m , que está condicionada por la energía mecánica de deformación debido a la acción de la fuerza w_c :

$$K_{in} \sim \frac{w_m}{w_c} \sim \frac{2E}{\sigma^2}, \quad (2)$$

donde E es el módulo de elasticidad (o el módulo de plasticidad para la deformación plástica).

De la relación (2) se deduce que cuanto más energía w_c se gasta en la deformación, más energía magnética w_m es generada. Y causa el aumento del parámetro magnético medido K_{in} .

Al comparar el estado de la muestra durante las investigaciones experimentales mediante el parámetro magnético K_{in} cuando alcanza la elasticidad límite σ_y , relativa al estado de la misma muestra cuando alcanza la resistencia máxima σ_t , obtenemos:

$$\frac{K_{in}^t}{K_{in}^y} \approx \frac{\sigma_t^2 \cdot 2E}{2E \cdot \sigma_y^2} \approx \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_y} \right)^2. \quad (3)$$

La relación energética (3), obtenida en el curso de las investigaciones de diseño, confirma la exactitud de la razón (1) obtenida como resultado de investigaciones experimentales. Un análisis más detallado de la relación (3) a nivel físico se presenta en el documento de referencia [3].

Utilizando las relaciones obtenidas (1) y (3) entre los factores magnéticos y mecánicos del endurecimiento por deformación, se sugiere llevar a cabo una evaluación práctica de la vida útil de los componentes metálicos en SCZ en base a los factores medidos K_{in} y el tiempo real de funcionamiento sin falla de la unidad en cuestión en la fecha de inspección T_{act} .

En caso de que sean conocidos el valor promedio K_{in}^{ave} , correspondiente al nivel de deformación plástica en SCZ para las unidades del mismo tipo de equipo (determinado por los resultados de las mediciones prácticas), el valor máximo real K_{in}^{act} , medido en el SCZ de la unidad en cuestión, y el tiempo real de funcionamiento sin fallo de una unidad en cuestión en la fecha de inspección T_{act} , entonces es posible calcular el tiempo límite de operación T_{lim} de esta unidad como sigue:

$$T_{lim} = \frac{K_{in}^{lim}}{K_{in}^{act}} \cdot T_{act}, \quad (4)$$

donde K_{in}^{lim} es conocido por investigaciones de laboratorio o industriales. Y en caso de que se desconozca, entonces K_{in}^{lim} se determina a partir de la relación (1) en función del valor medido de K_{in}^{ave} y las características mecánicas conocidas σ_y y σ_t .

Así, la vida residual de la unidad inspeccionada con SCZ será:

$$T_{life} = T_{lim} - T_{act}. \quad (5)$$

El método sugerido para la determinación del estado de limitación del metal en SCZs y la evaluación del tiempo de vida de los componentes metálicos se basa en el supuesto aceptado de dependencia temporal lineal del proceso de deformación plástica y acumulación de fatiga del metal. En el momento de la inspección, el parámetro magnético K_{in}^{act} caracteriza el estado energético real del metal en SCZ. Al mismo tiempo no importa, cómo se logró este estado de energía. Con el transcurso del tiempo el metal en las SCZ discretamente se transforma de un estado de energía a otro. Si logramos registrar los valores de K_{in}^{act} en diferentes periodos de tiempo (T), se obtendrá la dependencia lineal $K_{in} = f(T)$. Teniendo en cuenta que el parámetro magnético K_{in} refleja la variación de la deformación residual en SCZs, entonces la ley lineal de deformación plástica (y consecuente endurecimiento) es verdadera en esta zona.

En la actualidad, sobre la base de la rica experiencia acumulada en la inspección de tuberías y de diversos componentes metálicos, se dispone de valores cuantitativos de K_{in} , que caracterizan el estado límite del metal en diferentes condiciones de resistencia y el desarrollo inicial de micro y macro fisuras. Se han desarrollado lineamientos metódicos para la evaluación de la vida residual de componentes metálicos basados en los parámetros medidos de la memoria magnética del metal. El documento de referencia [4] contiene ejemplos de la evaluación de la vida útil residual. El procesamiento de los datos obtenidos en la inspección de los componentes metálicos por el método MMM se lleva a cabo utilizando el programa "MMM-System". El cálculo del grado de proximidad del metal en las SCZ respecto del estado límite y el cálculo de la vida residual se realiza con el programa "MMM-Lifetime".

2. Etapas básicas de la determinación de la vida residual de componentes metálicos utilizando el método de MMM y otros métodos rápidos de ensayo no destructivo.

La Figura 2 muestra el diagrama de bloques de la determinación de la vida residual de componentes metálicos usando el método MMM. La principal característica distintiva de este enfoque de la evaluación de la vida residual es la realización de un examen del 100% de la superficie del objeto de prueba (TO), que permite la detección de todos los SCZ potencialmente peligrosos que representan la potencial fuente de fallas que podrían ocurrir en el curso de la operación del equipo por un tiempo adicional.

En 2005 los expertos rusos desarrollaron el borrador de la Norma Nacional de Rusia "Lineamientos Metodicos para la Evaluación de la Vida Residual de Objetos Potencialmente Peligrosos Basados en Métodos Ingenieriles de Diagnóstico Rápido".

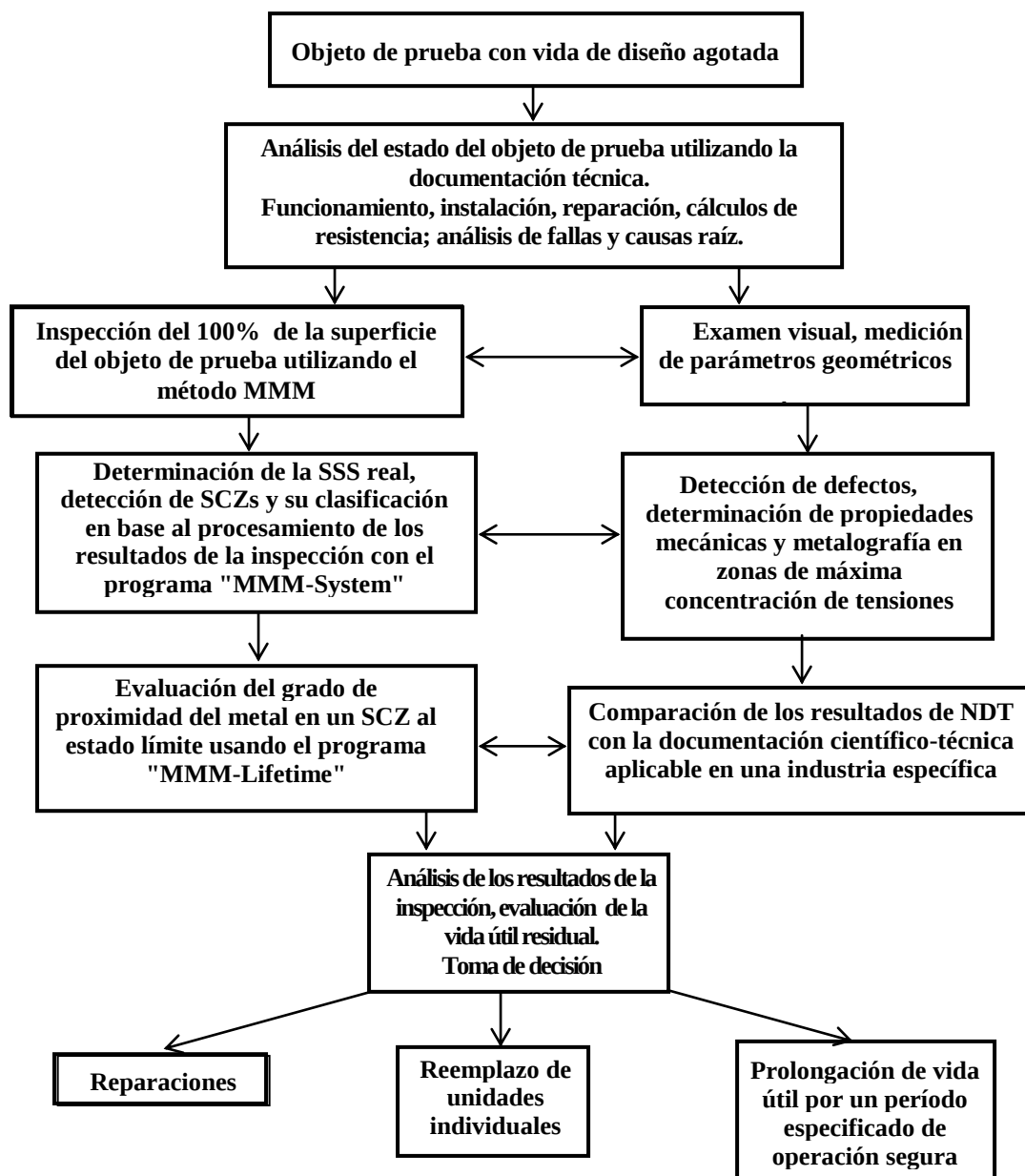


Fig.2. Diagrama de bloques de la determinación de la vida residual de los componentes metálicos utilizando el método MMM.

Los métodos ingenieriles de diagnóstico rápido incorporan métodos NDT pasivos, que utilizan la energía interna de las estructuras metal. Ellos son:

- el método de emisión acústica (AE);
- el método de memoria magnética metálica (MMM);
- control térmico (calor).

Estos métodos son hoy en día más difundidos en la práctica común para el diagnóstico temprano de los daños en componentes y estructuras metálicas.

Cabe señalar que el desarrollo de la AE y de los métodos térmicos con el uso de la relación de energía similar a la relación (3), obtenida por el método MMM, proporcionará la oportunidad de cambiar cualitativamente el estado de estos métodos bien conocidos transformándolos de métodos de detección de fallas hacia métodos de diagnóstico en base a estados de energía.

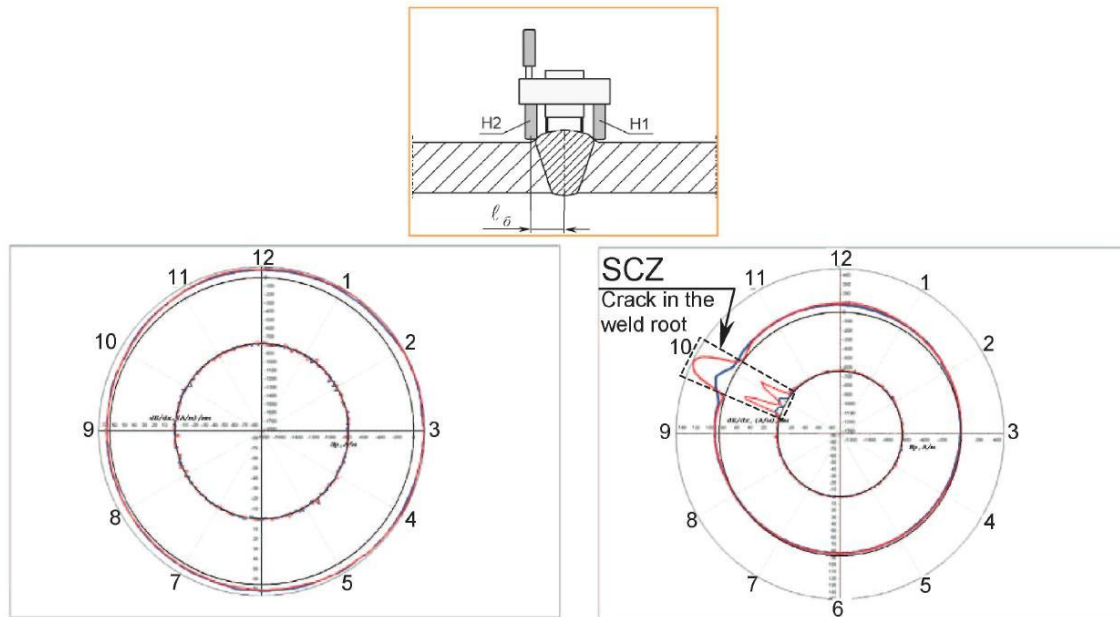
Un rasgo distintivo importante de la metodología actual respecto de la ofrecida en el documento guía GD 09-102-95 desarrollado anteriormente, es el siguiente:

- la determinación más clara del papel de los métodos ingenieriles modernos de diagnóstico
- inspección del 100% de la superficie metálica y detección de zonas de concentración de tensiones (SCZ), determinando la fiabilidad y la vida residual de los componentes y estructuras metálicas. Estas tareas se establecen en la nueva norma nacional rusa GOST R 52330-2005. [5];
- se sugiere utilizar las características energéticas actuales, que pueden ser determinadas por los métodos MMM, AE y térmicos, como criterios básicos para determinar la condición límite del metal;
- se tienen en cuenta los nuevos requisitos de Rostekhnadzor de RF (la Supervisión de Ingeniería Rusa) para la inspección por expertos de los componentes metálicos y los de la Ley Federal "Sobre el Reglamento Técnico";
- el diagrama de bloques de la determinación de la vida residual se corrige con la tensión en los modernos métodos rápidos de diagnóstico ingenieril;
- se sugiere desarrollar cálculos de resistencia de referencia con valoración de la vida residual de las SCZ, teniendo en cuenta que se han determinado durante la inspección las propiedades estructurales y mecánicas actuales del metal.

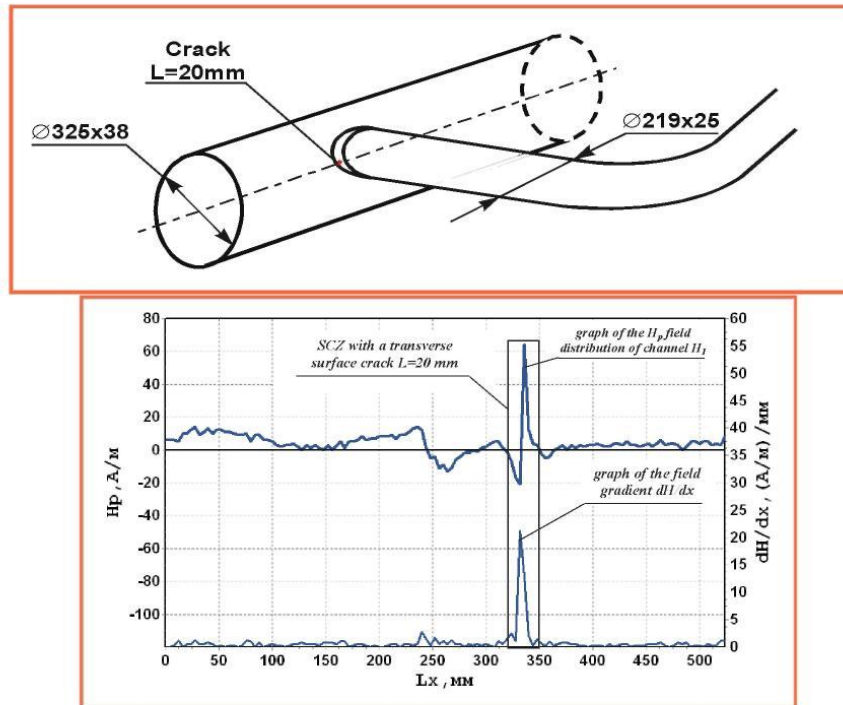
Cuando la guía práctica se lleva a la práctica, en la mayoría de los casos es posible efectuar una evaluación experta de la vida útil remanente sin realizar complicados cálculos basados en una inspección compleja de componentes metálicos (ver fig.2) y especificar un período de operación segura.

Basándose en la guía práctica establecida para componentes metálicos específicos, es posible desarrollar una técnica más precisa para la evaluación de la vida útil remanente, teniendo en cuenta las características y requisitos específicos aplicables en cada industria.

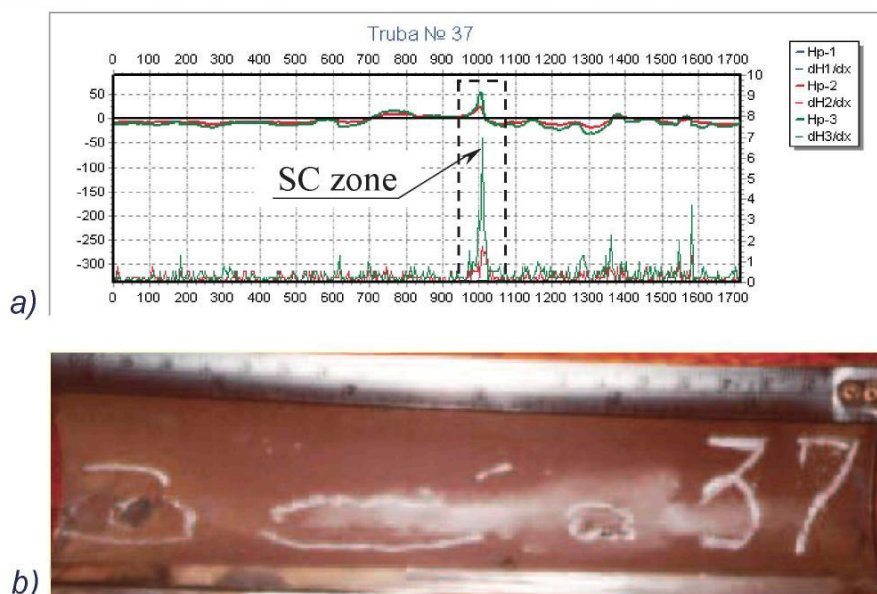
3. Ejemplos de uso del método de MMM



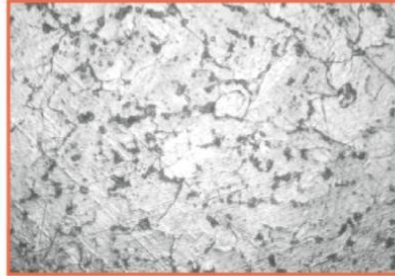
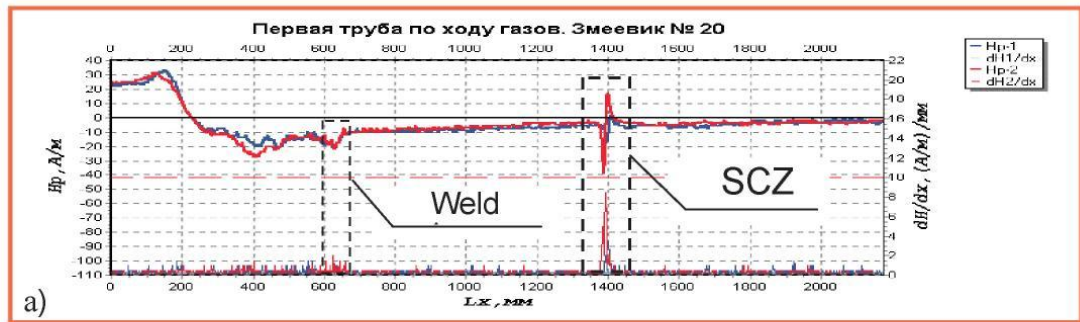
Resultado del análisis con el método MMM de una soldadura a tope (butt welded) de una cañería by pass de vapor de diámetro 219 mm, espesor 25 mm, de acero 12Cr1MoV



Resultado del análisis con el método MMM de una soldadura entre dos cañerías de acero, por las que circula vapor de diámetro 325 mm, espesor 38 mm y de diámetro 219 mm, espesor 25 mm.



Resultados de la inspección de la serpentina N° 20 ($\varnothing 32\text{mm} \times 4,5\text{mm}$, acero 316 ASTM) de un supercalentador

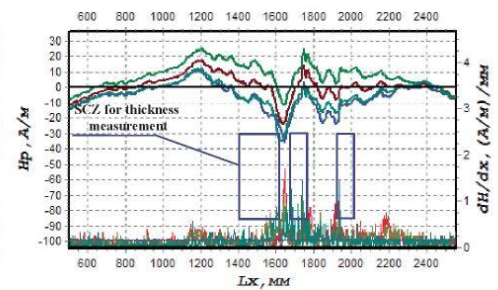
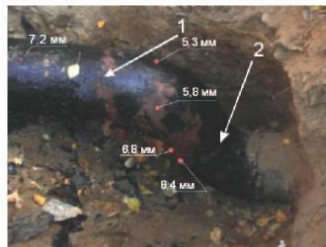
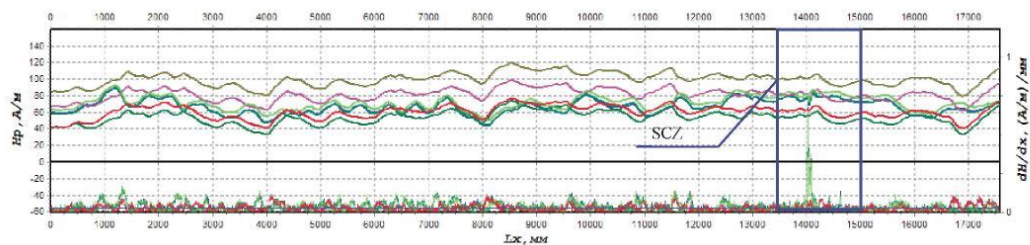


Corrosión intergranular detectada en una SCZ, caracterizada por una abrupta modificación de SMLF- H_p con un gradiente máximo dH/dx

b) Magnification $\times 500$.

Results of testing of superheater coil No.20 ($\varnothing 32 \times 4,5 \text{ mm}$, steel 316 (ASTM))

Ejemplo de mediciones iniciales sin contacto



Resultados de pruebas en gasoducto ($\varnothing 325 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$)

Resultados de pruebas con contacto una vez retirado el revestimiento

Calculo de Vida Remanente Formula

$$K_p = e^{1 - \frac{P_n}{P_{pa6}}}, \quad K_f = -2 \ln(\sqrt{1 - F}) \quad K_d = 10^{\frac{33}{\Delta T}}$$

Ejemplo

Presión por proyecto

40

Presión de trabajo

32

Tiempo en servicio = 2006-1959

47

	Anomalia № 3		Anomalia № 6		Anomalia № 46	
	F=	0,91376	F=	0,43141	F=	0,14179
		0,9				
Kp		0,779		0,779		0,779
Kf		2,303		0,565		0,153
Kd		7,021		7,021		7,021
Calculo por Excel		12,591		3,087		0,836
Calculo por software		12,553		3,078		0,834

Si F>0.9 to F=0.9

Si F<0.01 to F=0.01

Referencias:

1. Vlasov V.T., Dubov A.A. Physical bases of the metal magnetic memory method. Moscow: ZAO "Tisso", 2004. 424 p.
2. Dubov A.A. Power equipment lifetime assessment using the metal magnetic memory method // Energetik. 2006. No.11.
3. Vlasov V.T., Dubov A.A. Physical theory of the "Strain-failure" process. - Moscow: ZAO "Tisso", 2007. 517 p.
4. Dubov A.A., Dubov A.I., Kolokolnikov S.M. Metal magnetic memory method and inspection instruments. Training Handbook. Moscow: ZAO "Tisso", 2006. 332 p.
5. GOST R 52330-2005. Non-destructive testing. Stressed-strained state test on industrial objects and transport. General requirements.