

---

**XIV Seminarium**  
**NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW**  
**Zakopane, 4-7 marca 2008**

---

**OCENA POZIOMU NAPRĘŻEŃ W STREFACH ICH KONCENTRACJI (SKN)**  
**WEDŁUG METODY MAGNETYCZNEJ PAMIĘCI METALU (MPM)**

Własow W.T., Dubov A.A.  
Energodiagnostyka Sp z o.o.-Warszawa, Moskwa

1. Wykorzystuje się zależność między magnetyczną a mechaniczną energią (wynikającą z obciążeń), otrzymaną w wyniku eksperymentalnych[1] i teoretycznych badań[2]:

$$\boxed{m = \frac{K_{np}}{K_{cp}} \cong \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \right)^2} \quad \boxed{m = \frac{K_{gr}}{K_{sr}} \cong \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right)^2} \quad (1)$$

gdzie:  $K_{gr}$  – graniczna (maksymalna) wielkości gradientu pola magnetycznego ( $dH/dx$ ), zarejestrowana podczas kontroli metodą MPM w SKN bezpośrednio przed formowaniem się (w początkowym etapie rozwoju) mikropeknięcia, co odpowiada wielkości naprężeń dla umownej granicy wytrzymałości  $\sigma_m$  metalu, które rejestruje się podczas badań próbek:

$K_{sr}$  – średnia-wyważona wielkość gradientu pola magnetycznego ( $dH/dx$ ), otrzymana z obliczeń wyników uzyskanych z pomiarów wielu  $K_{in}=dH/dx$  w SKN zgodnie z metodyką zamieszczoną w [1]. W oparciu o metodykę  $K_{sr}$  odpowiada wielkości naprężeń dla umownej granicy plastyczności  $\sigma_e$  metalu, które rejestruje się podczas badań próbek.

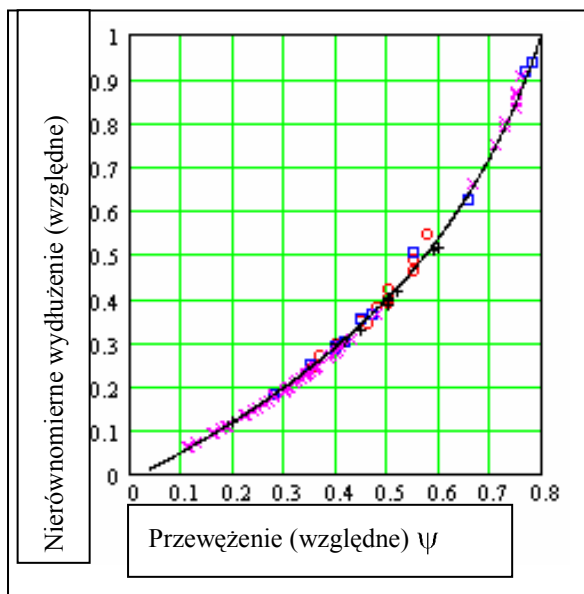
2. Na podstawie informacji pobranych z tablic - poradnika dotyczących gatunku stali badanego elementu lub oprzyrządowania, określa się względne przewężenie  $\psi$ , które odpowiada najmniejszemu przekrojowi podczas badań próbki (szyjki).

W tablicach nr nr 1,2,3 pokazano wielkości  $\psi$  i inne mechaniczne charakterystyczne własności dla węglowych, chromowych (Cr1) i chromo-niklowych (Cr2) gatunków stali.

3. Po określeniu wielkości  $\psi$ , wykorzystując diagram  $\varepsilon_{nrówn.}=f(\psi)$  ( patrz.rys.1), otrzymaną w wyniku metod obliczeniowych, określa się wielkości  $\varepsilon_{nrówn.}$ .

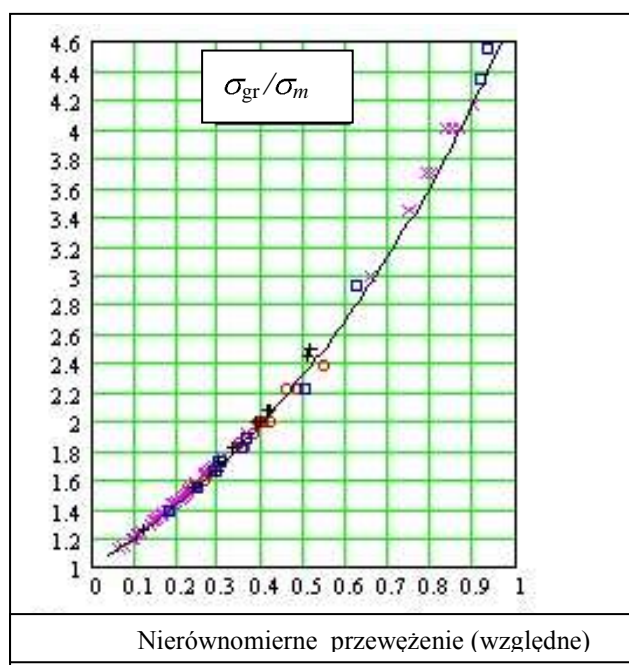
3. Po określeniu wielkości  $\psi$ , wykorzystując diagram  $\varepsilon_{nrówn.}=f(\psi)$  ( patrz.rys.1), otrzymaną w wyniku metod obliczeniowych [3], określa się wielkości względnego wydłużenia w obszarze nierównomiernego odkształcenia (w szyjce)  $\varepsilon_{nrówn.}$ .

Odształcenie  $\varepsilon_{nrówn}$  metalu otrzymane na drodze pomiarów i obliczeń na podstawie wykonanych badań na rozciąganie standartowych próbek, umownie odpowiada odkształceniu metalu, które ma miejsce w lokalnych SKN na rzeczywistym obiekcie kontroli (OK). Odształcenie próbki w obszarze równomiernym  $\varepsilon_{równ}$ , umownie odpowiada odkształceniu w podstawowym metalu obiektu kontroli (OK) poza SKN.



Rys.1 Związek średniego względnego wydłużenia w obszarze nierównomiernego odkształcenia ze względnym przewężeniem dla różnych materiałów i obrazująca je funkcja aproksymująca .

4. Wyznaczenie  $\epsilon_{nrówn}$  , wg. diagramu przedstawionego na rys.2 i otrzymanej z pracy [3], określa się zależność  $\sigma_{gr}/\sigma_m$  .



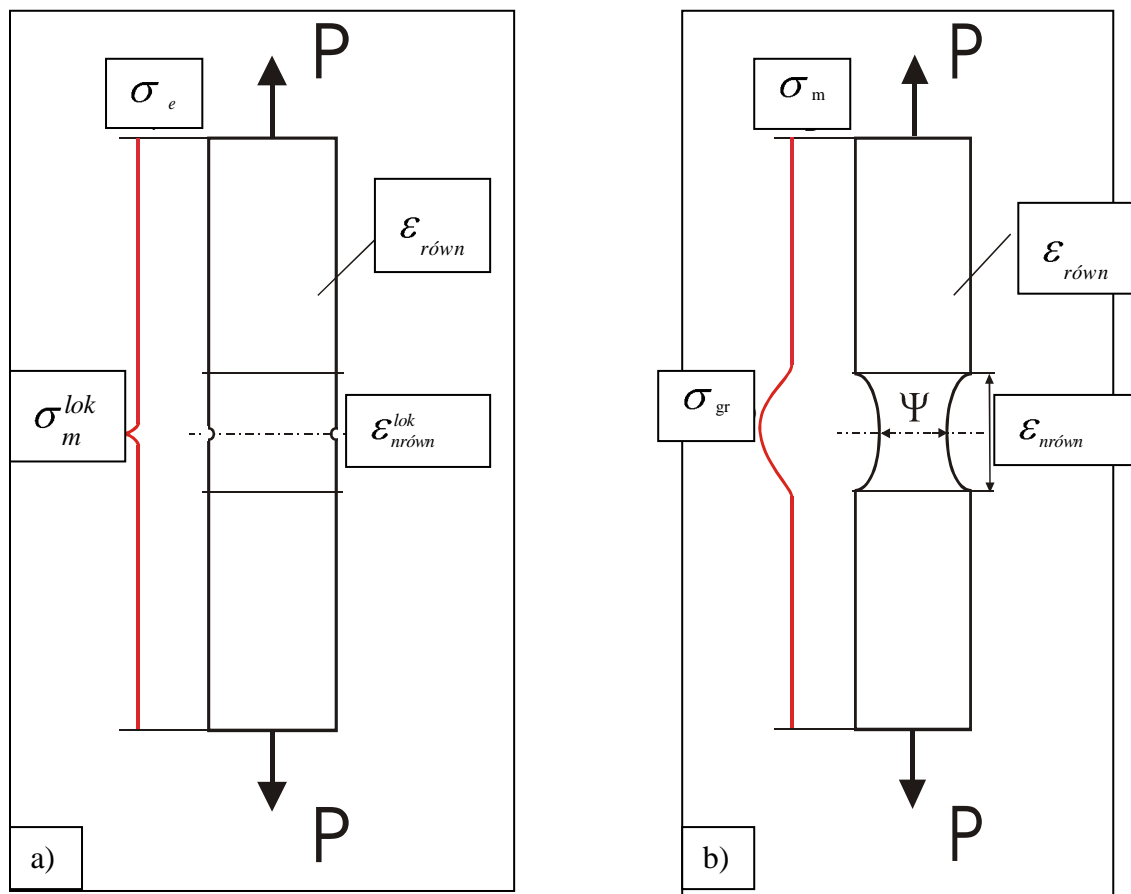
Rys.2. Związek zależności wielkości granicznej właściwego obciążenia dla czasowej granicy wytrzymałości ze średnią wielkością względnego przewężenia w obszarze nierównomiernego odkształcenia dla różnych materiałów i obrazująca je funkcja aproksymująca .

Gdzie;  $\sigma_{gr}$  – odpowiada granicznej wielkości naprężeń w miejscu przewężenia względnego (szyjki), to jest w obszarze nierównomiernego odkształcenia  $\varepsilon_{nrówn}$ . Obszar ten podczas kontroli oprzyrządowania metodą MPM odpowiada  $K_{gr}$ .

$\sigma_m$  – odpowiada umownej granicy plastyczności  $\sigma_e$  dla obszaru próbki z równomiernym odkształceniem i kiedy współzależność (1) dla obszarów równomiernego i nierównomiernego odkształcenia będzie miała następującą postać:

$$m = \frac{K_{np}}{K_{cp}} \cong \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \right)_{равн}^2 \cong \left( \frac{\sigma_{np}}{\sigma_B} \right)_{неравн}^2 \quad m = \frac{K_{gr}}{K_{sr}} \cong \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right)_{równ.}^2 \cong \left( \frac{\sigma_{gr}}{\sigma_m} \right)_{nrówn.}^2 \quad (3)$$

oznacza to, że zachodzi korelacja energetyczna  $\sigma_m / \sigma_e$  dla obszaru odkształcenia równomiernego  $\varepsilon_{równ}$  i  $\sigma_{gr} / \sigma_m$  dla obszaru odkształcenia nierównomiernego  $\varepsilon_{nrówn}$ , zależność tą wyjaśnia się gęstością dyslokacji odpowiednio w obszarach  $\varepsilon_{równ}$  i  $\varepsilon_{nrówn}$ . Wyjaśnimy tę współzależność na przykładzie badań próbki poddanej rozciąganiu.



**Rys.3** Rozmieszczenie obszarów odkształceń (deformacji): równomiernej ( $\varepsilon_{równ}$ ), nierównomiernej dla całej objętości szyjki ( $\varepsilon_{nrówn}$ ) i nierównomiernej w lokalnym mikronowym obszarze  $\varepsilon_{nrówn}^{lok}$ :

a) – początkowy etap tworzenia się szyjki w lokalnej (mikronowej)strefie próbki;

b) – końcowy etap rozwoju i utworzenie się szyjki przed zerwaniem próbki ;

$\psi$  - względne przewężenie próbki, odpowiadające minimalnemu przekroju w szyjce .

Z rys.3 widać, że wielkości  $\sigma_m$  otrzymane podczas badań na rozciąganie dla przeciętnej (średniej) całej długości i całego przekroju próbki, odpowiadają wielkością  $\sigma_e$  dla lokalnej (mikronowej) strefy ( $\varepsilon_{nrówn}^{lok}$ ) w początkowym momencie tworzenia się szyjki. Jest to moment przewyższenia szybkości odkształcenia (deformacji), zachodzącego poślizgu dyslokacji (odkształcenia plastycznego) nad szybkością zmian zachodzących podczas odkształceń sprężystych. Wielkości  $\sigma_{gr}$  otrzymane podczas osiągnięcia ( $\varepsilon_{nrówn}$ ) w końcowym etapie tworzenia się szyjki odpowiada  $\sigma_m^{lok}$  w początkowym etapie tworzenia się szyjki w lokalnej mikronowej strefie.

5. Tak więc znając  $K_{sr}$ , otrzymane podczas badań w strefie SKN, które odpowiada granica plastyczności  $\sigma_e$  w obszarze  $\varepsilon_{nrówn}$  (lub  $\sigma_m$  dla obszaru  $\varepsilon_{równ}$ ), i znając  $K_{gr}$ , dla strefy SKN, które odpowiada  $\sigma_m$  ( $\sigma_{gr}$ ) dla obszarów  $\varepsilon_{równ}$  można dokonać oceny poziomu koncentracji naprężeń  $\sigma_{gr}$  w strefie SKN, gdzie wielkość  $K$  osiągnęła  $K_{gr}$ , wykorzystując współzależność (3).

6. Przykłady oceny wielkości granicznej koncentracji naprężeń  $\sigma_{gr}$  w strefie SKN, ujawnioną w wyniku kontroli metodą MPM, przy granicznych wielkościach  $K_{gr}$ .

Podczas kontroli rurociągu gazowego  $\varnothing 219 \times 8 \text{ mm}$  ze stali w gatunku 20 ujawniono 37 odcinków z SKN. Obliczenia, przeprowadzone wg. Programu „MMP-System” dla wszystkich odcinków, pokazały średnie wielkości gradientu pola  $K=dH/dx$  ( $K=K_{sr}$ ) równe  $10,66 \times 10^3$  ( $\text{A/m}^2$ ). Maksymalne wielkości gradientu pola magnetycznego  $K_{max}$ , otrzymane podczas kontroli na jednym odcinku ze strefą SKN, okazało się równym  $\sim 30,0 \times 10^3$  ( $\text{A/m}^2$ ). Dla zmierzonej wielkości  $K_{max}$  przeprowadza się ocenę poziomu maksymalnych naprężeń w tej strefie SKN, wykorzystując obliczeniową współzależność (3):

$$\sigma_{max} \cong \sqrt{\frac{K_{max}}{K_{sr}}} \times \sigma_m \cong \sqrt{\frac{30,0}{10,6}} \times 44,1 \cong 74,2 \left( \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right) \cong 742 \text{ MPa},$$

gdzie  $\sigma_m = 44,1$  ( $\text{kg/mm}^2$ ) – granica wytrzymałości dla rurociągu gazowego, wykonanego ze stali 20.

Obliczanie wielkości granicznej naprężeń w SKN podczas przeprowadzania badań próbki.

W tabelicy 1 dla stali 20 wielkość  $\psi$  wynosi 0,58. Według diagramu na rys.1 dla  $\psi=0,58$  określamy wielkość  $\varepsilon_{nrówn}$ , które okazało się równe 0,5.

Według diagramu na rys.2 odpowiednio  $\varepsilon_{nrówn}=0,5$ , to wartość ilorazu  $\sigma_{gr}/\sigma_m=2,3$ . Wykorzystując współzależność (3) i znając zmierzoną wielkość  $K_{sr}$ , można określić  $K_{gr}$  i

$$\sigma_{gr} \cdot \frac{K_{np}}{K_{cp}} = \left( \frac{\sigma_{np}}{\sigma_b} \right)^2 = 2,3^2 = 5,29. \quad \frac{K_{gr}}{K_{sr}} = \left( \frac{\sigma_{gr}}{\sigma_m} \right)^2 = 2,3^2 = 5,29$$

Stąd  $K_{gr}=10,66 \times 5,29=56,4$ . Przy tym wielkość  $K_{gr}$ , wykorzystuje współzależność (3) i znając zmierzone wielkości  $K_{sr}$ , można określić  $\sigma_{gr}$ :

$$\frac{\sigma_{np}}{\sigma_b} = \sqrt{\frac{K_{np}}{K_{cp}}} = 2,3, \quad \frac{\sigma_{gr}}{\sigma_m} = \sqrt{\frac{K_{gr}}{K_{sr}}} = 2,3$$

czyli przy  $\sigma_m=44,1$  ( $\text{kg/mm}^2$ ) wielkość  $\sigma_{gr}=44,1 \times 2,3=101,43$  ( $\text{kg/mm}^2$ )  $\cong 1014,3 \text{ MPa}$ .

W wyniku przeprowadzonych badań MPM w celu określenia  $K_{sr}$ ,  $K_{max}$  i obliczeń, widać, że w lokalnej strefie SKN rzeczywisty poziom naprężeń wynosi 742 MPa, chociaż i przekracza przyjętą wielkość granicy wytrzymałości  $\sigma_m=441$ MPa, jednakże wielkość granicznej  $\sigma_{gr}=1014$  MPa, przy której tworzy się mikropęknięcie (graniczny stan metalu), nie osiągnięto.

Ocenę wielkości granicznej koncentracji naprężeń, wykorzystując współzależność (3), można przeprowadzić prostą drogą na podstawie zmierzonych magnetycznych parametrów  $K_{sr}$  i  $K_{max}$ .

Jeżeli stosunek  $\frac{K_{max}}{K_{sr}}$  okaże się równy (czy też w przybliżeniu równy)  $K_{gr}$ , wtedy to

znając  $\sigma_m$  z poradnika (z tablic) dla danego gatunku stali i współzależność  $\left(\frac{\sigma_{gr}}{\sigma_m}\right)^2$  dla znanej wielkości  $\varepsilon_{nrówn}$  (określa się wg. rys.2), ustala się  $\sigma_{gr}$  w SKN w wielkości  $K_{max} \approx K_{gr}$ .

Przedstawiona ocena koncentracji naprężeń w odniesieniu do pracy [3] odbywa się z „lokalnego” poziomu nierównomiernego odkształcenia  $\varepsilon_{nrówn}$  w obrębie „szyjki” próbki (patrz. rys. 3b). Poziom lokalności, osiągalny przy użyciu metody MPM podczas pomiarów pola magnetycznego  $H_p$  i jego gradientu  $dH/dx$  na rzeczywistym wyrobie (lub oprzyrządowaniu), stanowi na płaszczyźnie obszar  $2\div 3\text{mm}^2$ , to jest mniej niż płaszczyzna przekroju typowej próbki w miejscu względnego przewężenia. Jednakże wielkości tych płaszczyzn w przybliżeniu są jednakowego rzędu (rozmiaru) pod względem lokalności.

Należy zauważyć, że rzeczywista „lokalność” koncentracji naprężeń w miejscu powstania (narodzin) wady w SKN jest (o kilka rozmiarów) dwa – trzy miejsca po przecinku (0,00..) mniejsza niż powierzchnia mierzona i wynosi 1-2 mikrona (na długości) co jest możliwe do oceny przy zastosowaniu badań metodą replik metalograficznych. Taki poziom „lokalności” wielkości  $\sigma_{gr}$  w SKN może być jeszcze większy w porównaniu z obliczeniami współzależności (3).

## LITERATURA

1. Dubov A.A., Dubov A.A., Kołokolnikow S.M. Podręcznik do nauki. Metoda magnetycznej pamięci metalu i przyrządy kontroli. M.: ЗАО «Тиссо», 2003, 324с.
2. Własow W.T., Dubov A.A. Fizyczne podstawy metody magnetycznej pamięci metalu. M.: ЗАО «Тиссо», 2004, 424с.
3. Własow W.T., Dubov A.A. Teoria fizycznych procesów „odkształcenia-zniszczenia” M.: ЗАО «Тиссо», 2007, 517с.

**Tablica 1 Charakterystyki własności mechanicznych stali węglowych**

Lp	Gatunek stali	Charakterystyki własności mechanicznych					Uwagi
		$\psi$	$\sigma_m/\sigma_e$	$\sigma_m$ , kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_e$ , kg/mm <sup>2</sup>	$\varepsilon_m$	
1.	3	0,48	1,889	42,5	22,5	0,22	
2.	6	0,5	2,164	66	30,5	0,16	
3.	8	0,55	1,778	32	18	0,2	
4.	10	0,55	1,623	43	26,5	0,315	
5.	15	0,5	1,84	46	25	0,32	
6.	20	0,58	1,531	44,1	28,8	0,373	
7.	25	0,45	1,563	50	32	0,28	
8.	30	0,5	1,833	55	30	0,21	
9.	35	0,37	1,636	54	33	0,25	
10.	40	0,45	1,811	67	37	0,24	
11.	45	0,4	1,778	64	36	0,22	
12.	60	0,35	1,385	72	52	0,17	
13.	Fe	0,46	1,382	17	12,3	0,14	

**Tablica 2 Charakterystyki własności mechanicznych stali chromowych (Chr1)**

Lp	Gatunek stali	Charakterystyki własności mechanicznych					Uwagi
		$\psi$	$\sigma_m/\sigma_e$	$\sigma_m$ , kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_e$ , kg/mm <sup>2</sup>	$\varepsilon_m$	
1.	H13	0,659	1,237	88,6	71,6	0,192	
2.	20H	0,4	1,495	78,5	52,5	0,195	
3.	38HA	0,28	1,111	100	90	0,18	
4.	40H	0,42	1,188	95	80	0,13	
5.	30HM	0,47	1,237	74,2	60	0,195	
6.	34HMA	0,4	1,411	67	47,5	0,195	
7.	35HM	0,35	1,136	89,5	78,8	0,226	
8.	40HF	0,45	1,093	94	86	0,26	
9.	40HN	0,4	1,238	80,5	65	0,175	
10.	1H18N9T	0,55	1,747	55	20	0,4	
11.	12H1MF	0,78	1,465	47,9	32,7	0,308	
12.	15H1MF	0,77	1,557	52,3	33,6	0,324	

Tablica 3

**Charakterystyki własności mechanicznych stali chromowo-niklowych (Chr2)**

Lp	Gatunek stali	Charakterystyki własności mechanicznych					Uwagi
		$\psi$	$\sigma_m/\sigma_e$	$\sigma_m$ , kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_e$ , kg/mm <sup>2</sup>	$\varepsilon_m$	
1.	1H17N2	0,59	1,247	96	77	0,17	
2.	12HN3A	0,52	1,206	89	73,8	0,168	
3.	30HN3A	0,5	1,102	91,5	83	0,2	
4.	30HGSA	0,42	1,115	107	96	0,13	
5.	25H2GMTA	0,45	1,112	169	152	0,11	
6.	34HN3MA	0,35	1,114	97,5	87,5	0,187	
7.	40HN3MA	0,52	1,124	109	97	0,156	
8.	18H2N4MA	0,5	1,135	126	111	0,12	
9.	38H2MUA	0,5	1,126	98	87	0,19	
10.	50HFA	0,4	1,097	96	87,5	0,22	
11.	60S2	0,2	1,171	130	111	0,12	
12.	Fe	0,6	3,953	17	4,3	0,14	