

BADANIA METODĄ PAMIĘCI MAGNETYCZNEJ PRÓBEK STALOWYCH PODDANYCH NAPRĘŻENIOM ZEWNĘTRZNYM

W artykule przedstawiono wyniki badań Metodą Pamięci Magnetycznej Metalu rozciąganych próbek stalowych, poddanych uprzednio obróbkom cieplnym i chemicznym.

1. Wstęp

Metoda Magnetycznej Pamięci Metalu (MPM) może być wykorzystywana jako szybka, przeglądowa metoda badania naprężeń i odkształceń materiału, pozwalająca na diagnostykę stalowych elementów maszyn i instalacji. Opiera się na znanym zjawisku rozproszenia strumienia magnetycznego na obszarach materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej.

W procesie produkcji dowolnych ferromagnetycznych wyrobów, mechanizm pojawienia się realnej magnetycznej tekstury przebiega w warunkach jednoczesnego działania magnetycznego pola Ziemi i zmian naprężeń wewnętrznych. Podczas tego procesu oddzielne domeny w wyrobach z niejednorodną strukturą umiejscawiają się na defektach siatki krystalicznej.

Uszkodzenia eksploatacyjne dowolnej konstrukcji poprzedzone są zmianami własności metalu w wyniku procesów korozji, zmęczenia w strefach koncentracji naprężeń i deformacji. Wskazują na to pomiary zmian namagnesowania, ujawniające faktyczny stan naprężeń i deformacji konstrukcji.

MPM pozwala odróżnić obszar deformacji sprężystej od plastycznej, pozwala określić płaszczyzny poślizgu warstw metalu (źródła powstania pęknięć zmęczeniowych). Jeżeli pęknięcie już powstało, metoda pokazuje kierunek jego ewentualnego rozwoju.

Na podstawie stref koncentracji naprężeń, w których procesy korozji, zmęczenia i pełzania metalu rozwijają się najbardziej intensywnie, jest możliwe określenie wielkości i kierunku rozwoju przyszłego pęknięcia.

2. Wpływ naprężeń zewnętrznych

Dla większości materiałów ferromagnetycznych krzywe magnesowania ulegają dużym zmianom pod wpływem przyłożonego naprężenia zewnętrznego. Przy założeniu, że zaniedbuje się energię anizotropii krystalicznej względem energii magnetostrykcji i że magnetostrykcję można uznać za izotropową, istnieją dwie możliwości zależne od znaku $\lambda_s \sigma$.

Dla $\lambda_s \sigma > 0$, tj. w przypadku dodatniej magnetostrykcji i rozciągania lub ujemnej magnetostrykcji i ściskania, F_σ osiąga maksimum, gdy $\Theta = 0$ lub π . Zatem przy braku innych czynników, niektóre domeny będą leżały równolegle, a niektóre antyrównolegle do osi naprężenia. Gdy przyłożymy pole wzdłuż tej osi, wówczas próbka będzie dążyła do tego, by stać się próbką jednodomenową z kierunkiem namagnesowania leżącym wzdłuż kierunku pola.

Gdy $\sigma = 0$, wówczas do wytworzenia nasycenia wymagane jest przyłożenie pewnego pola magnetycznego. Gdy $\sigma \neq 0$, wówczas kierunek namagnesowania musi leżeć wzdłuż jednego z dwóch możliwych kierunków, przy czym rzeczywisty kierunek zdeterminowany jest przez natężenie przyłożonego pola.

Gdy $\sigma < 0$, wówczas F_σ osiąga minimum, gdy $\Theta = \pi/2$ lub $3\pi/2$, co oznacza, że domeny „starają” się ułożyć prostopadle do osi naprężenia.

Przedmiot badań

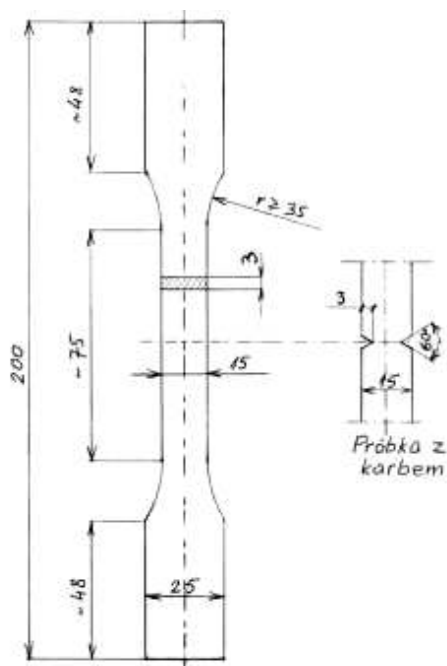
Do prób rozciągania przeznaczono 8 sztuk stalowych, płaskich próbek wyciętych z blachy o grubości 3mm.

Kształt i wymiary próbek przedstawiają Rys.1 i 2. Część badań wykonano na próbkach z karbem, który miał postać dwóch nacięć o kształcie litery V po obu stronach próbki, jak to pokazano na poniższych rysunkach.

Do prób rozciągania przygotowano próbki w następujący sposób:

- 4 próbki poddane uprzednio hartowaniu i odpuszczaniu (oznaczone numerami 7, 8, 9, 10), w tym 2 próbki z karbem (próbki 9 i 10),
- 4 próbki poddane uprzednio hartowaniu, odpuszczaniu i wodorowaniu (oznaczone numerami 11, 12, 13, 14), w tym 2 próbki z karbem (próbki 13 i 14).

Przeprowadzono pomiary wszystkich próbek, metodą pamięci magnetycznej, po obróbce cieplnej przed próbami rozciągania, w trakcie prób rozciągania przy różnych obciążeniach oraz po próbach rozciągania.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbek do rozciągania



Rys.2. Widok próbki bez karbu (po lewej stronie) i z karbem (po prawej stronie)

Wyniki analizy składu chemicznego materiału, z którego wykonano próbki do rozciągania, zamieszczone są w Tabeli 1. Analizę wykonano metodą optycznej spektrometrii emisyjnej (OES) przy użyciu emisyjnego spektrometru optycznego ARC-MET 930 SP firmy METOREX-Finlandia.

Tabela 1

Zawartość pierwiastka [% wag.]									
Pierwiastek	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	W	Ti
Próbki do rozciągania	0,15	1,00	1,07	1,10	0,11	0,28	0,056	0,049	0,019

Materiał, z którego zostały wykonane próbki do rozciągania jest najbardziej zbliżony do stali 20HGS wg PN, jednak zawiera on mniej węgla.

Obróbka cieplna próbek

Wszystkie próbki do rozciągania poddano hartowaniu i niskiemu odpuszczaniu,

- temperatura hartowania – 880°C, chłodzenie w wodzie;
- temperatura odpuszczania – 240°C, chłodzenie na powietrzu.

Wodorowanie próbek

W celu wprowadzenia defektów do rozciąganych próbek poddawano je elektrolitycznemu nawodorowaniu. Wodór wydzielany katodowo powoduje powstawanie w stali mikropęknięć i pęcherzy wodorowych, które w czasie próby rozciągania poszerzają się powodując osłabienie materiału.

Wodorowanie próbek do rozciągania przeprowadzono w 1N kwasie siarkowym z dodatkiem promotora wnikania wodoru. Próbki stanowiły katodę, anoda była wykonana z platyny. Gęstość prądu wynosiła 50 mA/cm². Czas wodorowania wynosił 90 min.

Pomiary twardości

Pomiary twardości próbek do rozciągania po hartowaniu i niskim odpuszczaniu oraz po hartowaniu, niskim odpuszczaniu i wodorowaniu, wykonano metodą Rockwella przy wykorzystaniu skali C (HRC). Wyniki pomiarów zamieszczone są w tabeli 2. W tablicy podano również przeliczone wartości twardości HRC na HB.

Tabela 2

Rodzaj próbki	HRC	HRC śr.	HB
Próbka Nr 7 hartowana i odpuszczana	44	44	420
	45		
	43,5		
Próbka Nr 11 hartowana, odpuszczana i wodorowana	38	39	363
	39		
	40		

Twardość próbki Nr 7 – hartowanej i nisko odpuszczonej – jest charakterystyczna dla stali o niższej zawartości węgla niż stal 20HGS .

Twardość próbki Nr 11 – hartowanej, nisko odpuszczonej i wodorowanej jest niższa niż próbki niewodorowanej.

Przeprowadzenie prób rozciągania

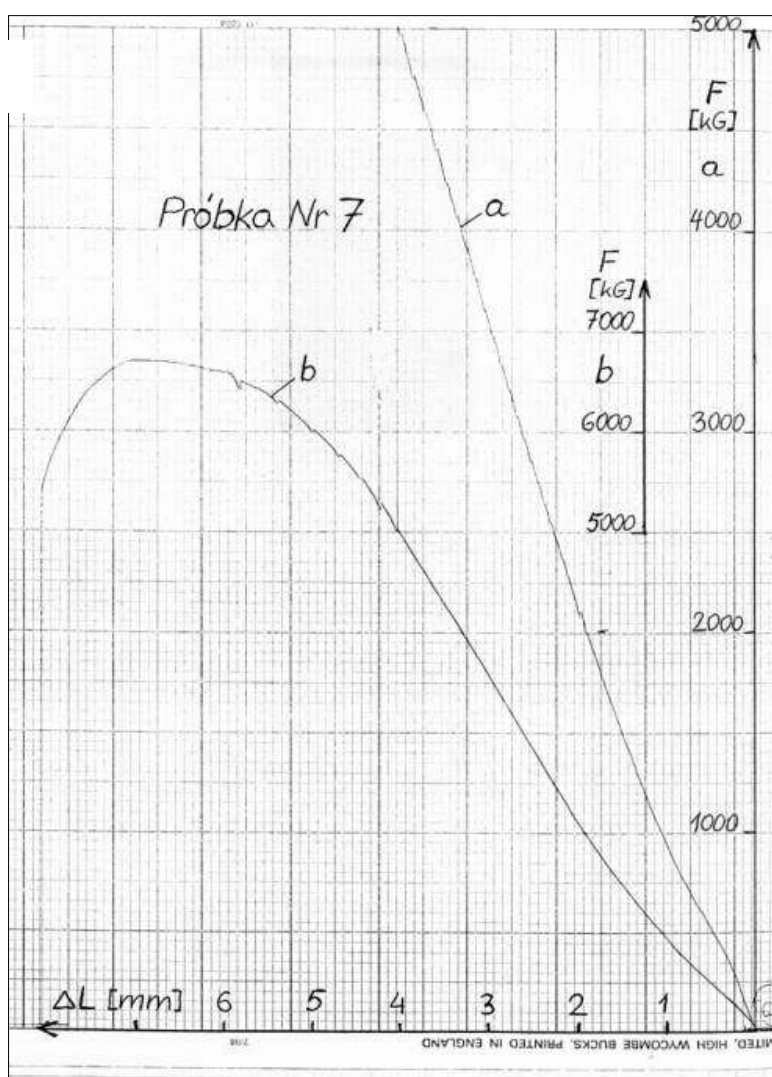
Próby rozciągania przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON o zakresie 100000 N, z napędem mechanicznym. Przebieg prób rozciągania rejestrowano na wykresach $F(\Delta L)$, gdzie:

F – zakres siły w kG

ΔL – wydłużenie (przemieszczenie trawersy) w mm.

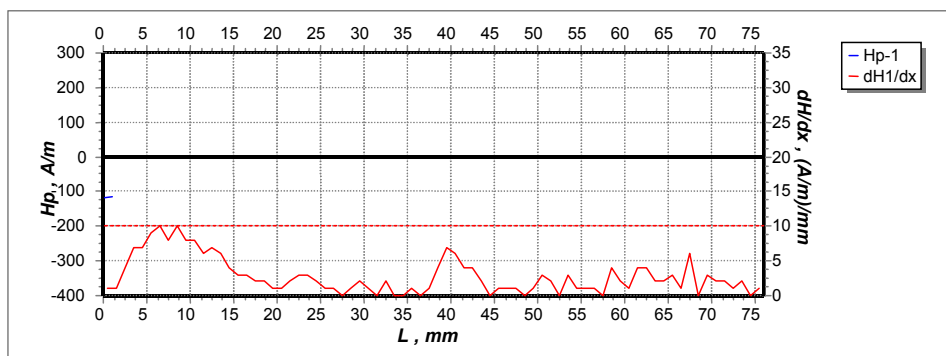
Próbki wodorowane (Nr 11, 12, 13) wykazują mniejszą wytrzymałość na rozciąganie, aniżeli próbki niewodorowane (Nr 7 i 9), zarówno w przypadku próbek bez karbu, jak i z karbem. Wykresy rozciągania badanych próbek podane są na Rys. 3, 6, 8, 12, 15 i 18.

Próbka nr 7



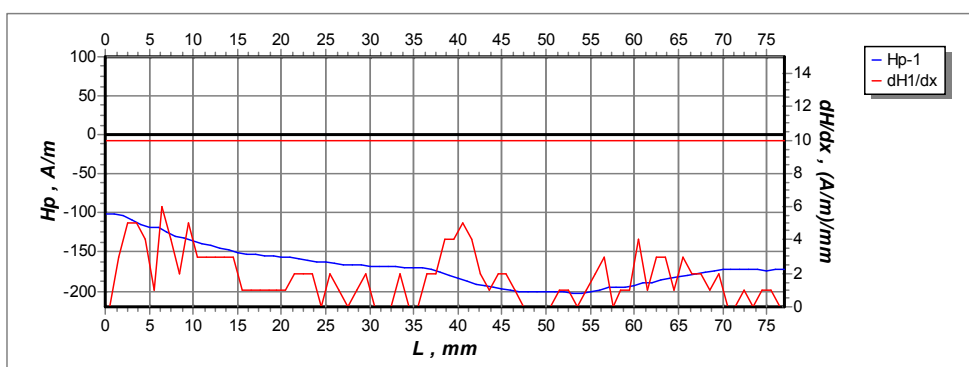
Rys. 3. Wykres rozciągania próbki Nr 7 – hartowanej i nisko odpuszczonej.

a – część wykresu rozciągania wykonana w zakresie do 5000kG,
b – wykres pełny; próbka była rozciągana aż do zerwania

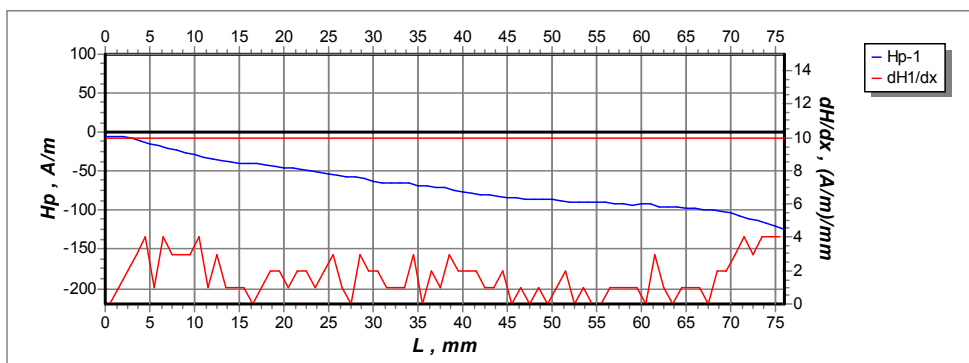


linia 3, w maszynie 0 kG

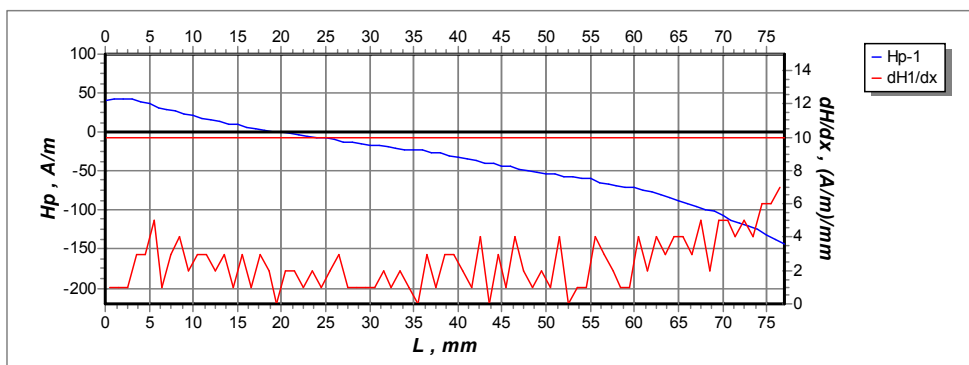
Rys.4. Próbkę 7 w stanie nieobciążonym.



linia 3, 2000 Kg



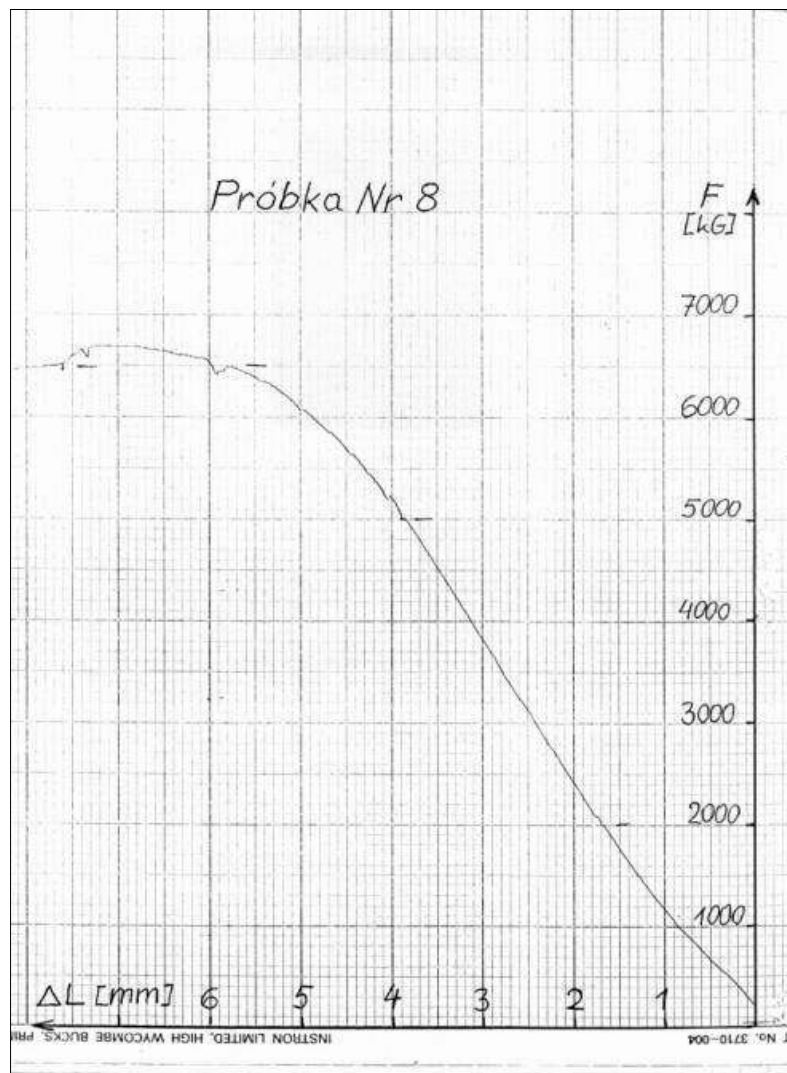
linia 3, 5000 Kg



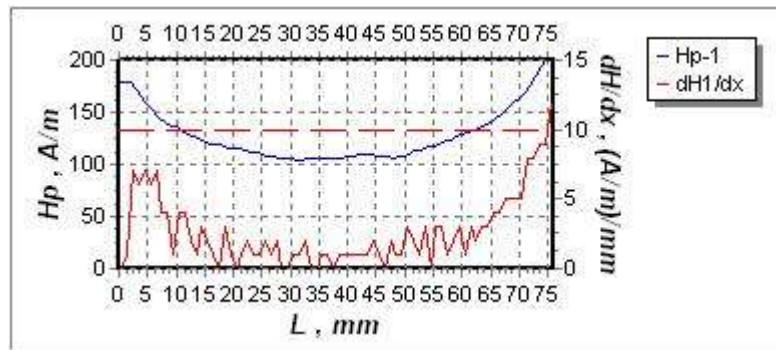
linia 3, 6500 Kg

Rys.5. Próbkę 7 w stanie obciążonym.

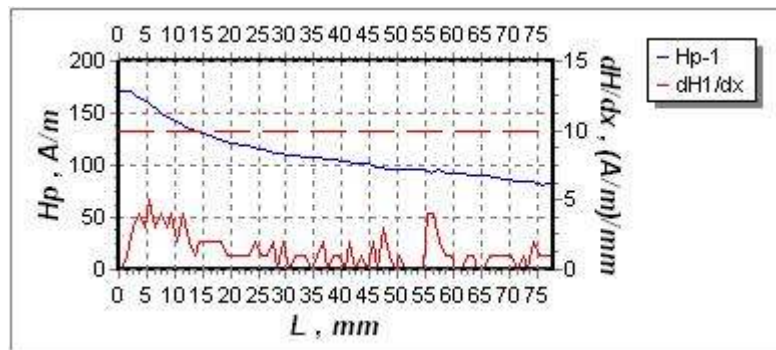
Próbka nr 8



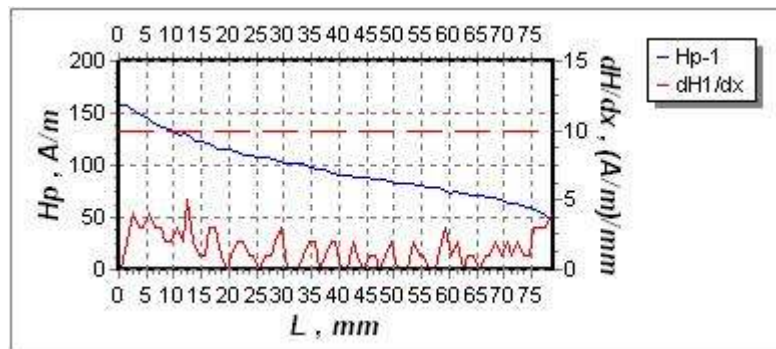
Rys.6. Wykres rozciągania próbki Nr 8 – hartowanej i nisko odpuszczanej. Próba rozciągania została przerwana w momencie tworzenia się szyjki.



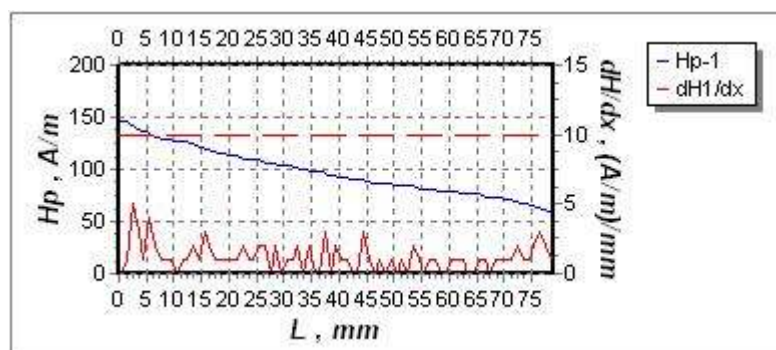
Linia 3, 0Kg



Linia 3, 2000Kg



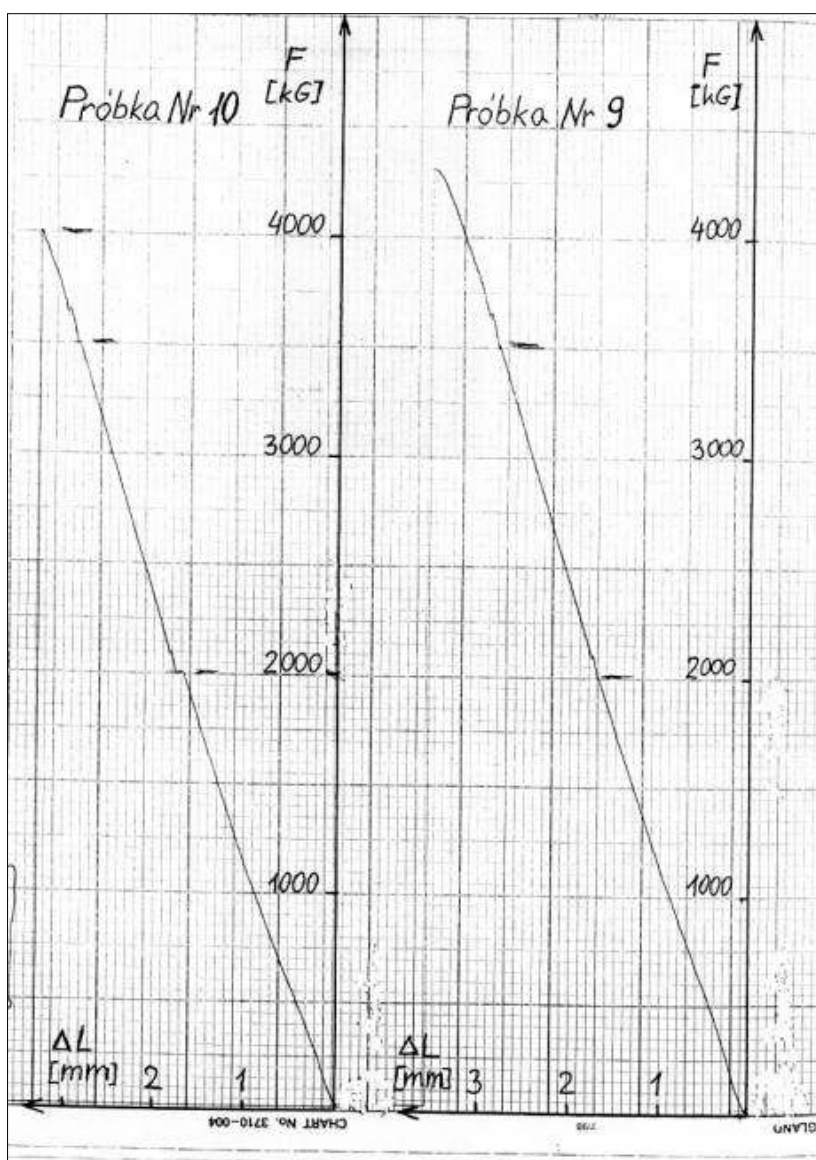
Linia 3, 5000Kg



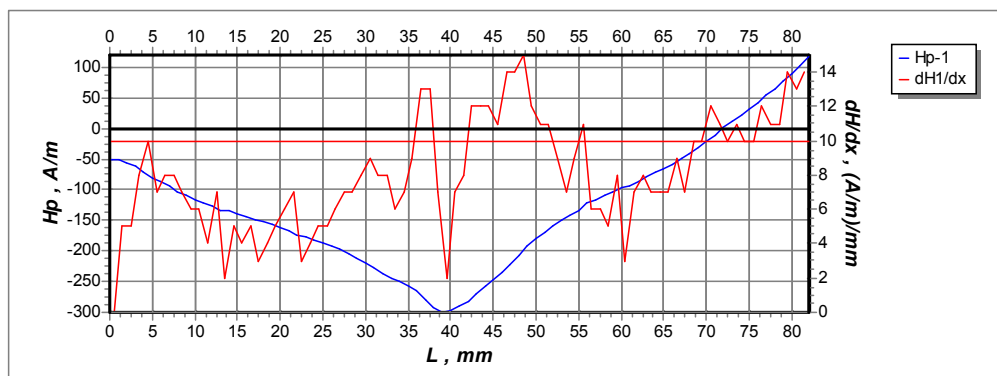
Linia 3, 6500Kg

Rys.7. Próbką 8, w stanie obciążanym.

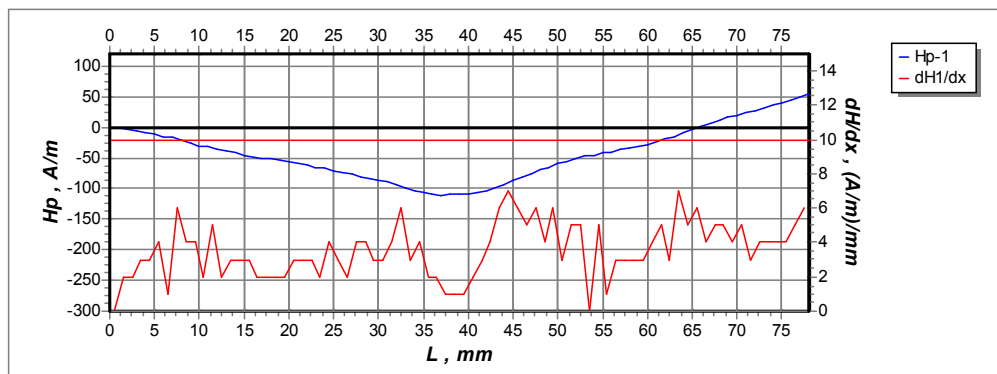
Próbka nr 9 i 10



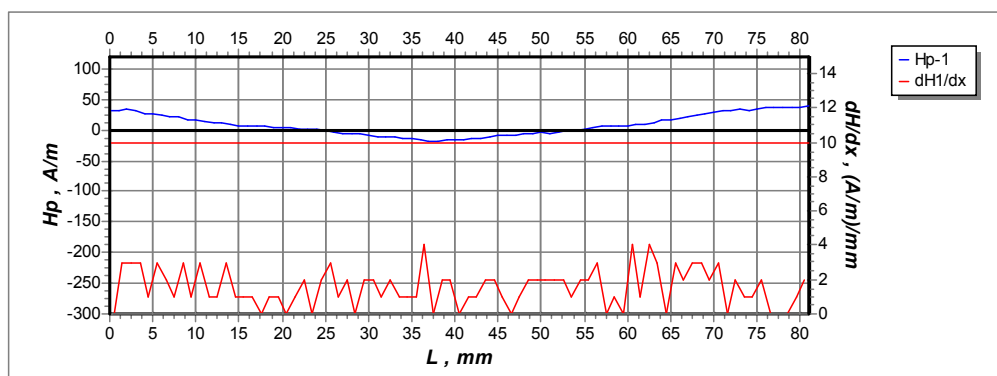
Rys.8. Wykresy rozciągania próbek z karbem Nr 9 i Nr 10 hartowanych i nisko odpuszczanych. Próbka Nr 9 była rozciągana aż do zerwania. Próbka Nr 10 była rozciągana tylko do uzyskania obciążenia 4000kg



linia 3, w maszynie 0 Kg

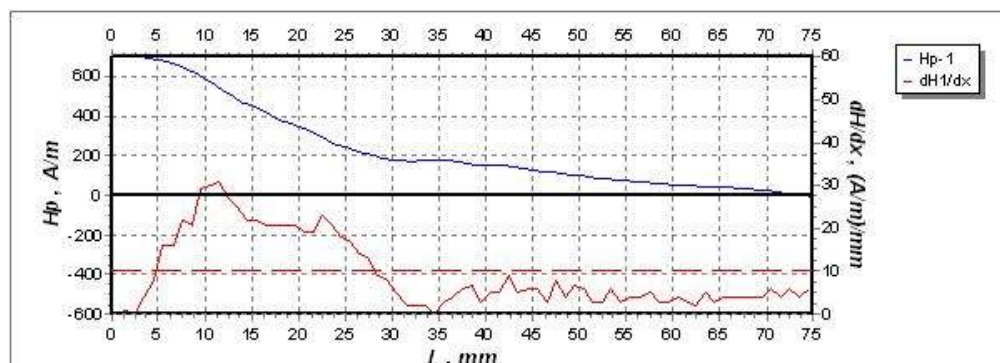


linia 3, 2000Kg



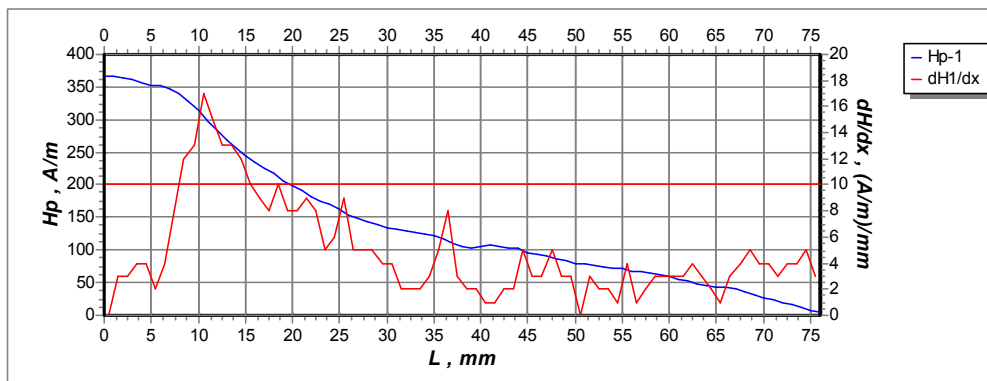
linia 3, 3500Kg

Rys.9. Próbkę 9 z karbem, pod obciążeniem.

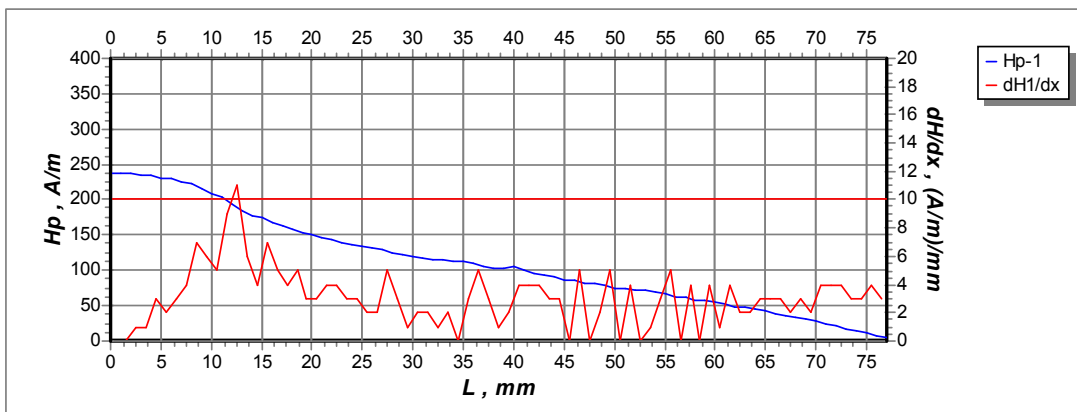


Linia 1, w maszynie, 0kG

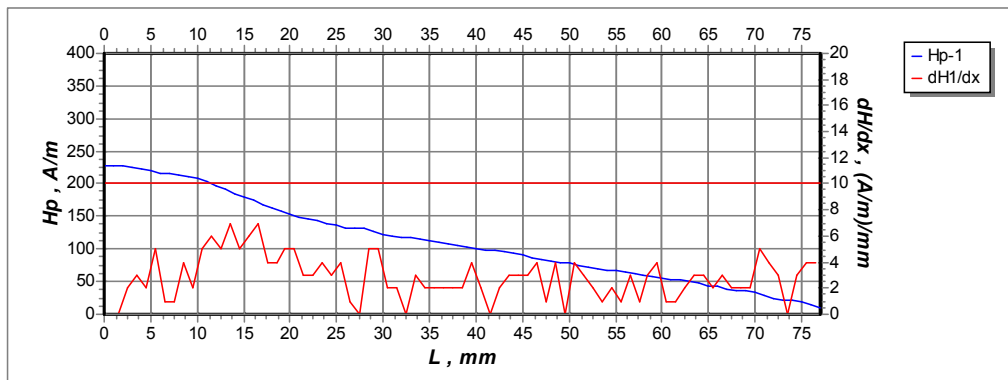
Rys.10. Próbkę 10 z karbem, w stanie nieobciążonym.



Linia 1, w maszynie 2000 kG



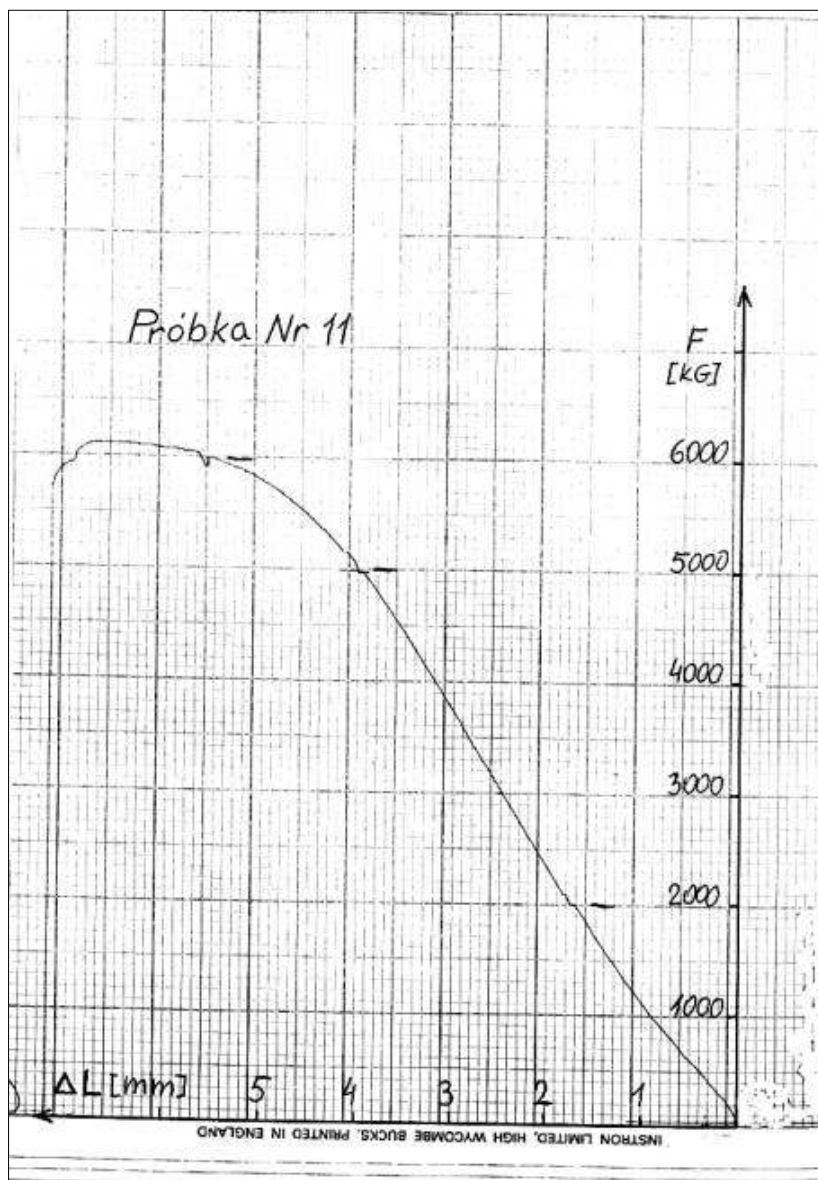
Linia 1, w maszynie 3500 kG.



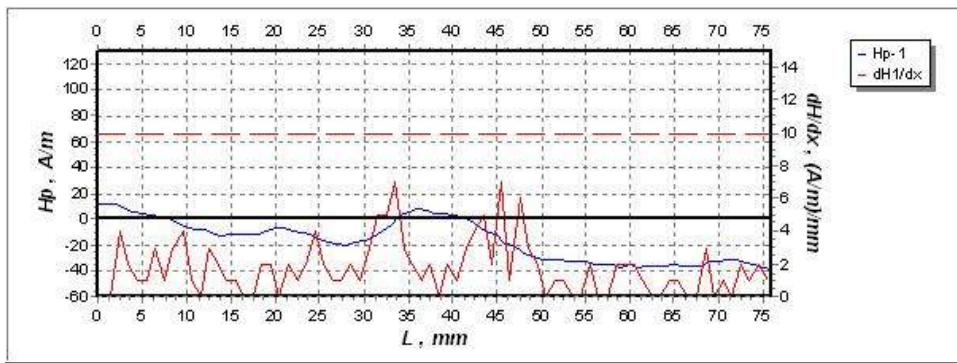
Linia 1, w maszynie 4000Kg

Rys.11. Próbkę 10 z korbem, w stanie obciążonym.

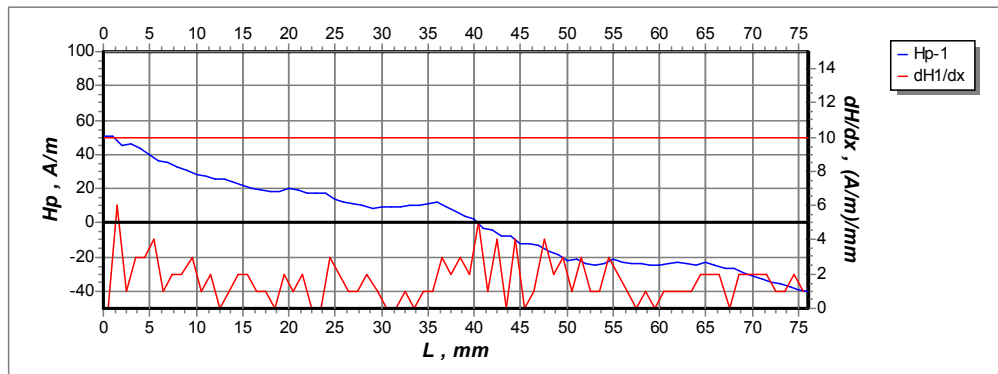
Próbka nr 11



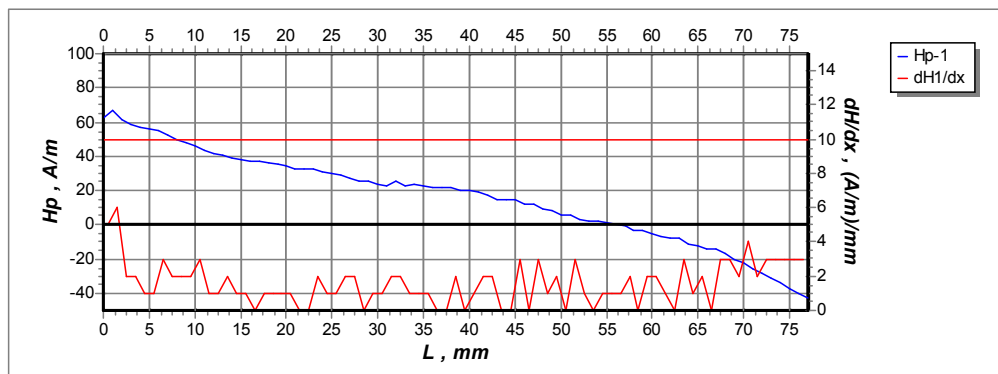
Rys.12. Wykres rozciągania próbki Nr 11 hartowanej, nisko odpuszczanej i wodorowanej. Próbka była rozciągana aż do zerwania



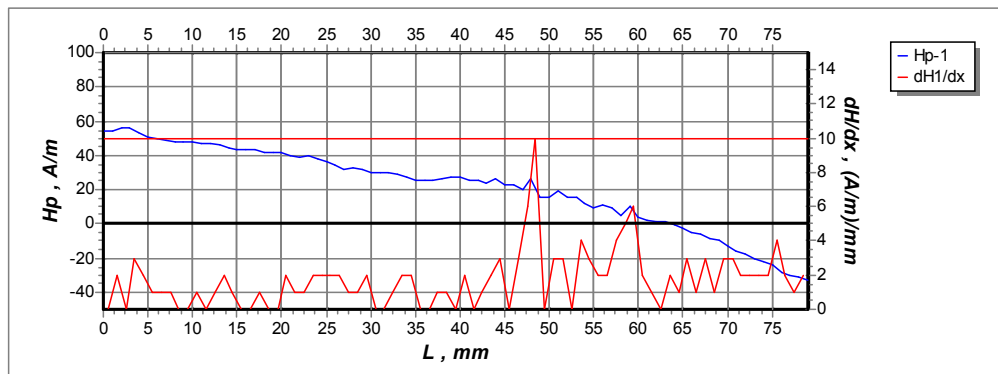
linia 3, w maszynie, 0kG
Rys.13. Próbką 11, bez obciążenia.



Linia 3, 2000Kg



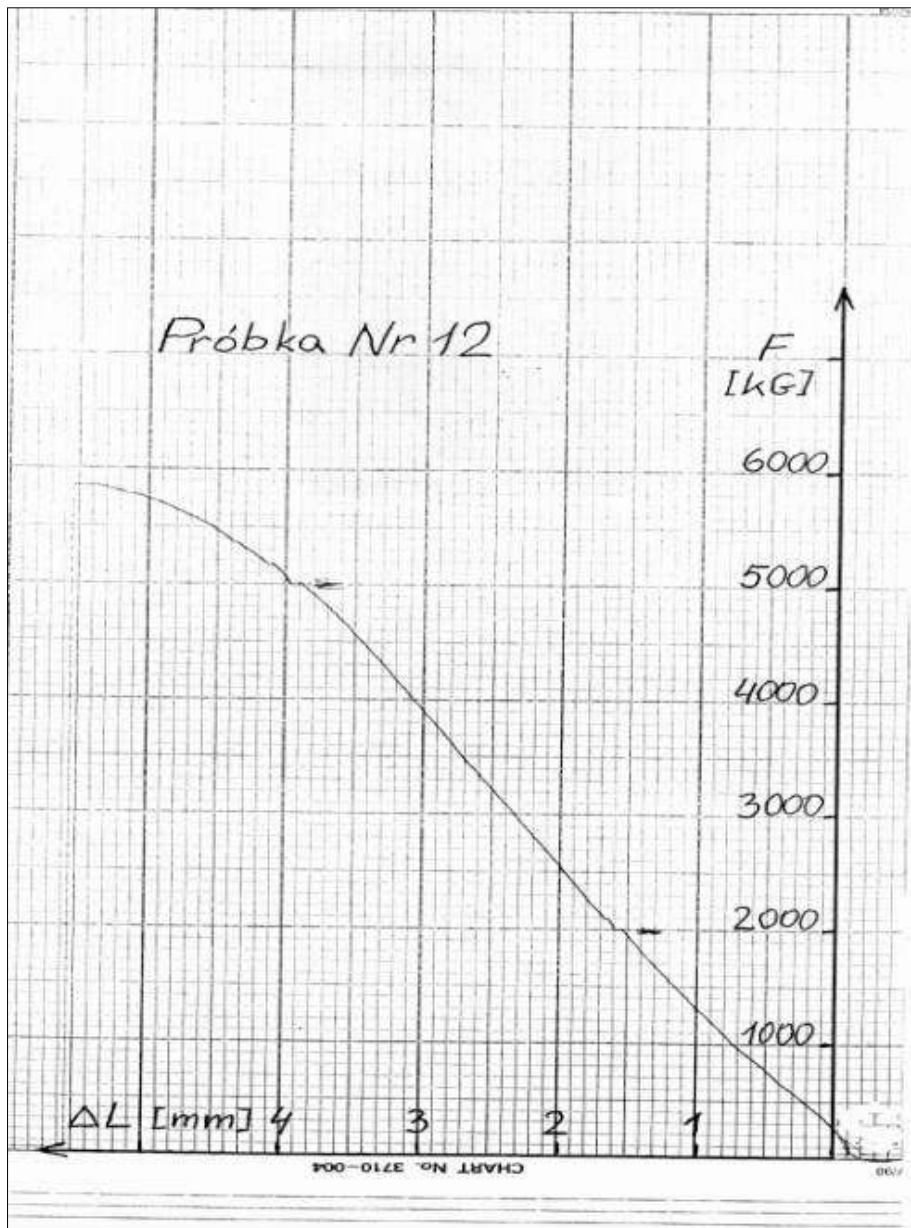
Linia 3, 5000kG



linia 3, 6000kG

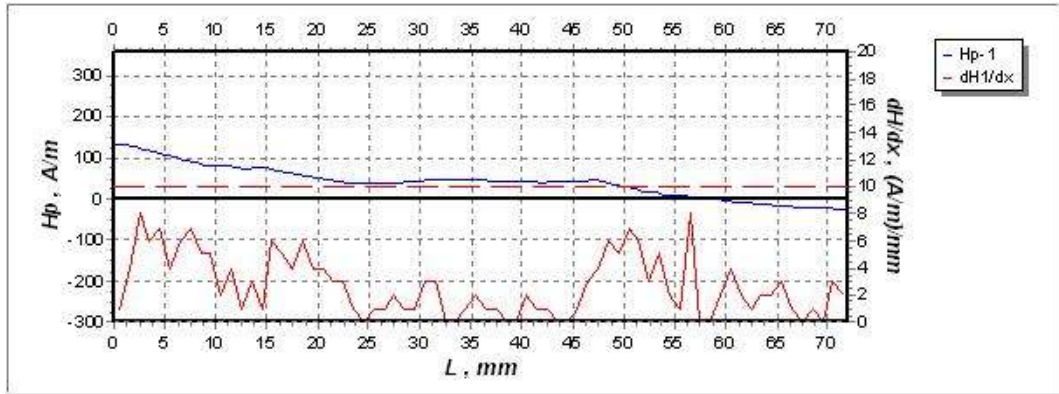
Rys.14. Próbką 11 w stanie obciążonym.

Próbka nr 12

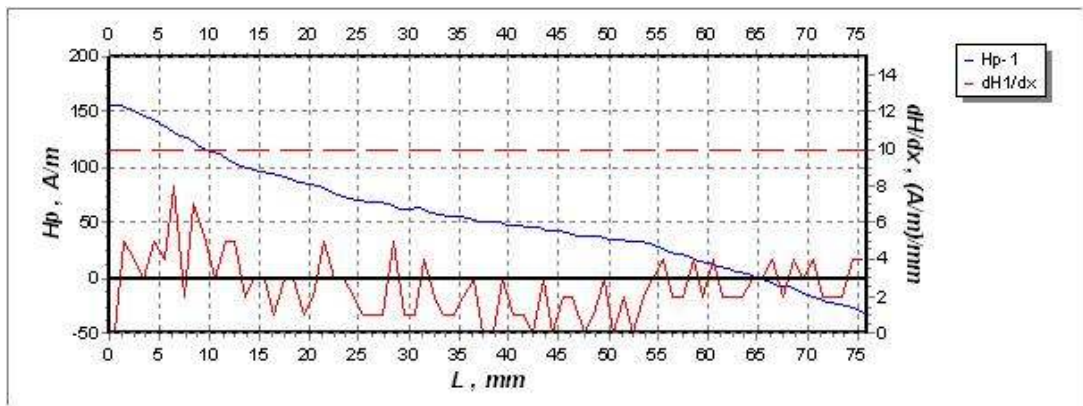


Rys. 15. Wykres rozciągania próbki Nr 12 hartowanej, nisko odpuszczanej i wodorowanej. Próbka była rozciągana aż do zerwania

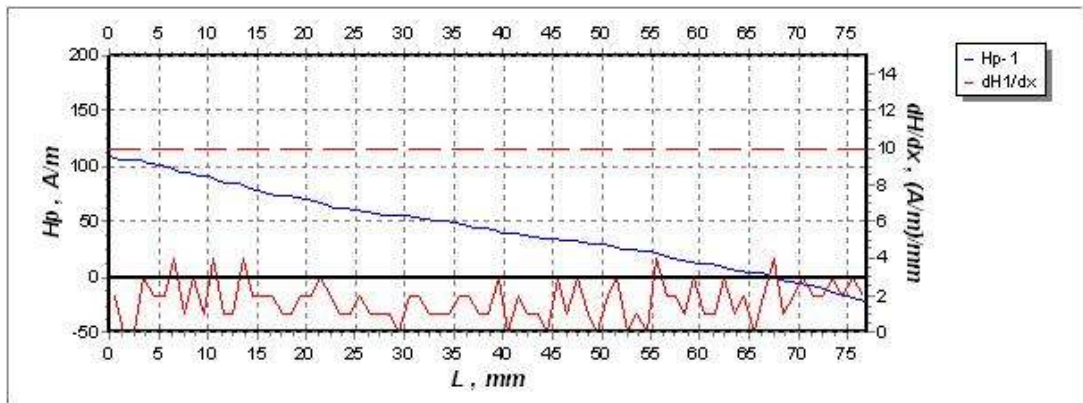
linia 3, w maszynie, 0kG



Rys.16. Próbką 12, nie obciążona.



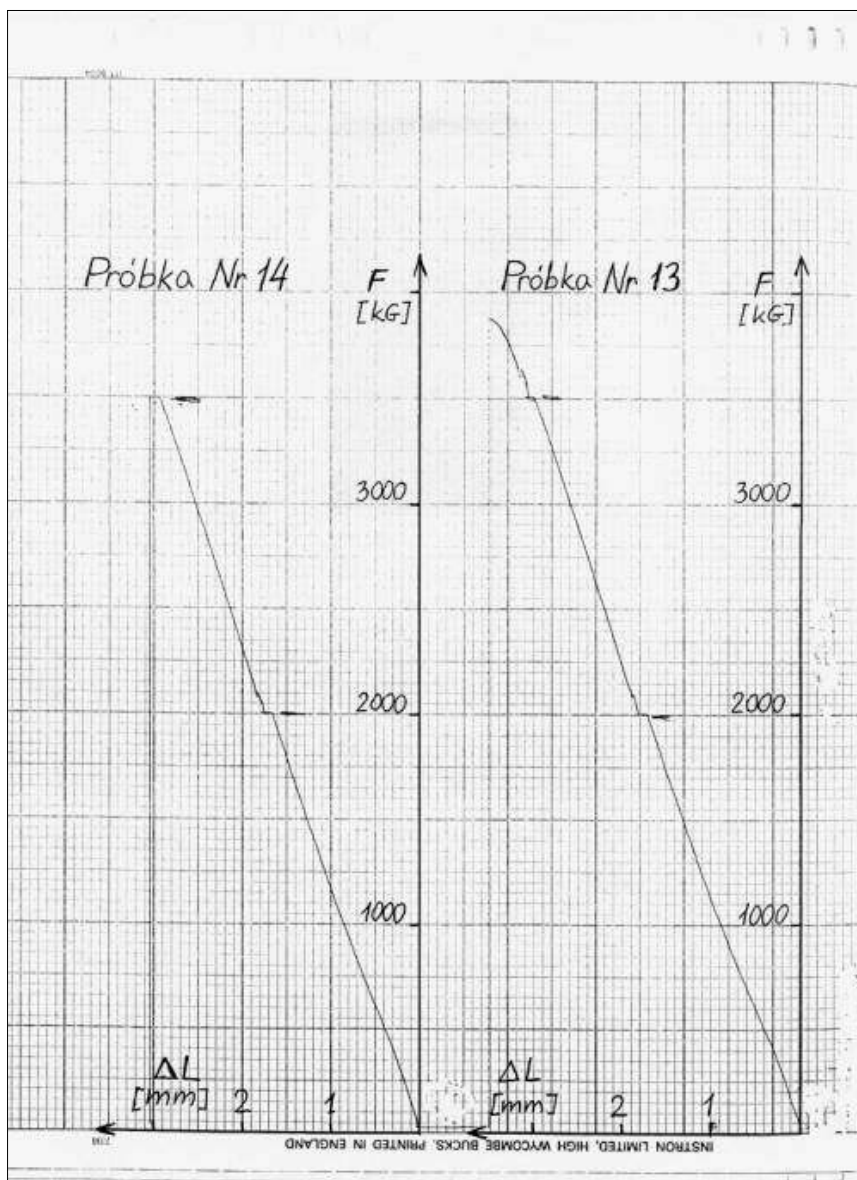
linia 3, 2000kG



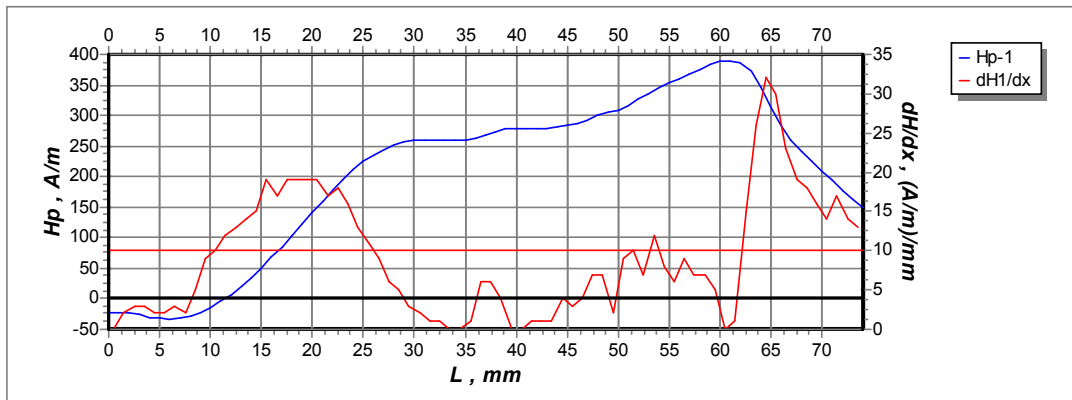
linia 3, 5000kG

Rys. 17. Próbką 12 pod obciążeniem.

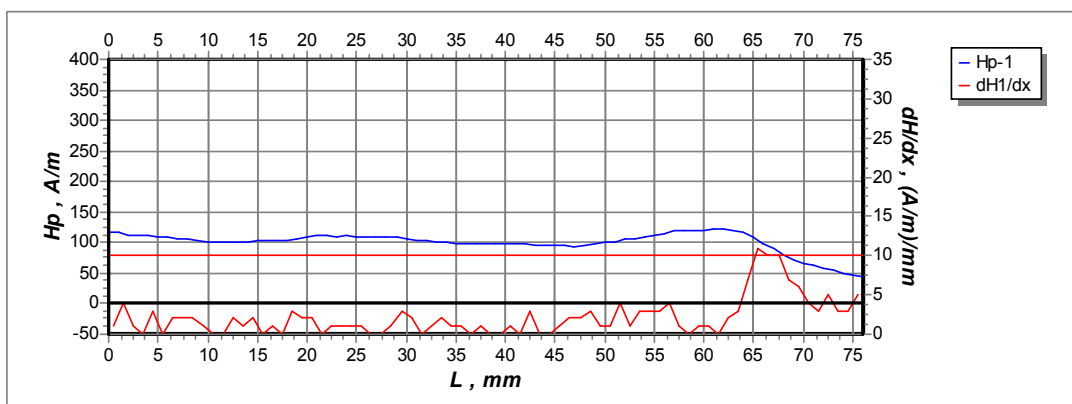
Próbka nr 13 i 14



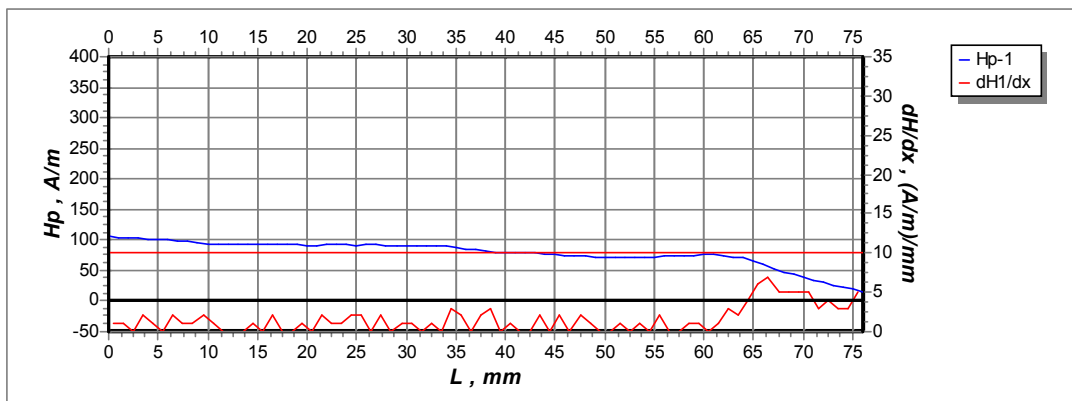
Rys. 18. Wykresy rozciągania próbek z karbem Nr 13 i 14, hartowanych, nisko odpuszczanych i wodorowanych. Próbka Nr 13 była rozciągana aż do zerwania. Próbka Nr 14 była rozciągana tylko do uzyskania obciążenia 3500kG



linia 3, w maszynie 0 kg

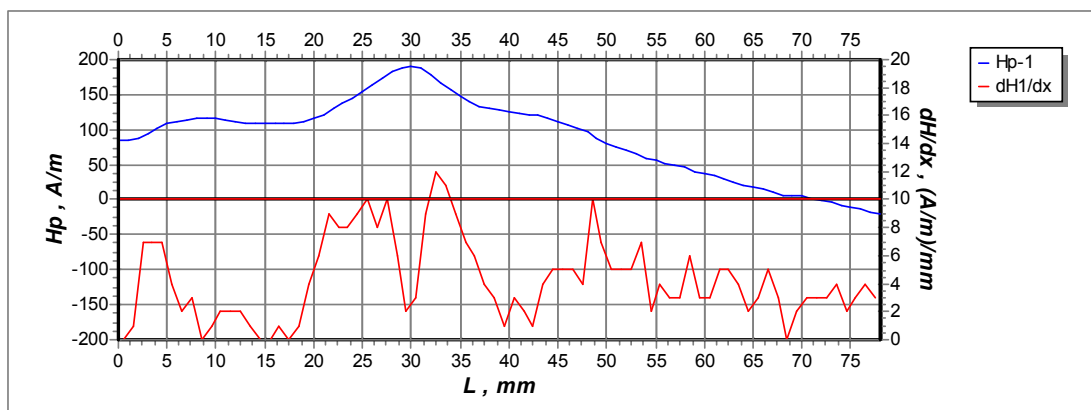


linia 3, 2000 Kg

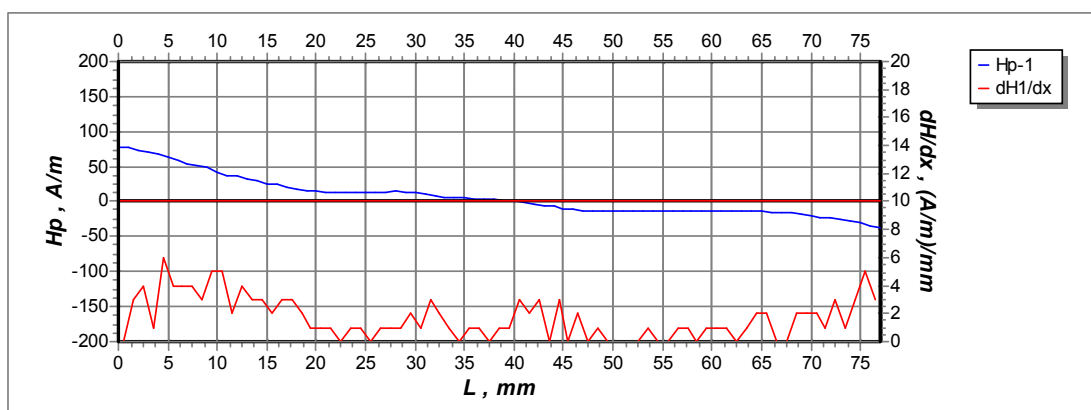


linia 3, 3500 Kg

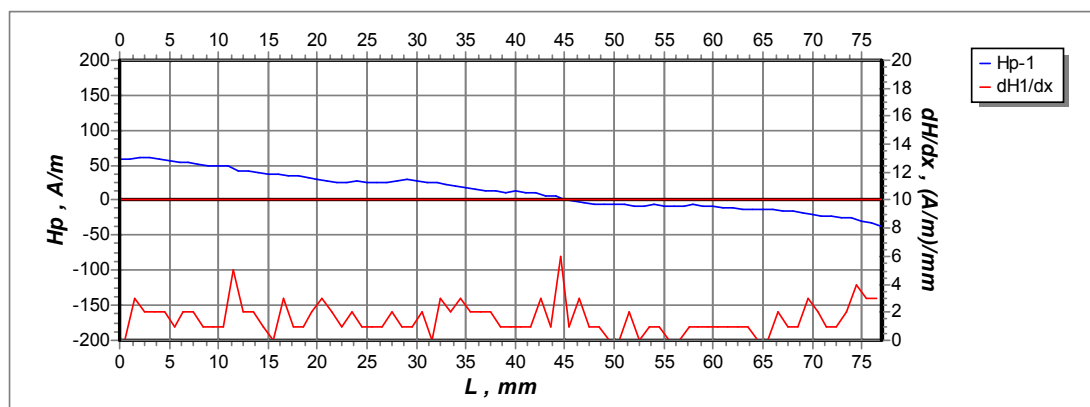
Rys.19. Próbką 13, pod obciążeniem.



linia 3, w maszynie 0 Kg



linia 3, 2000 Kg

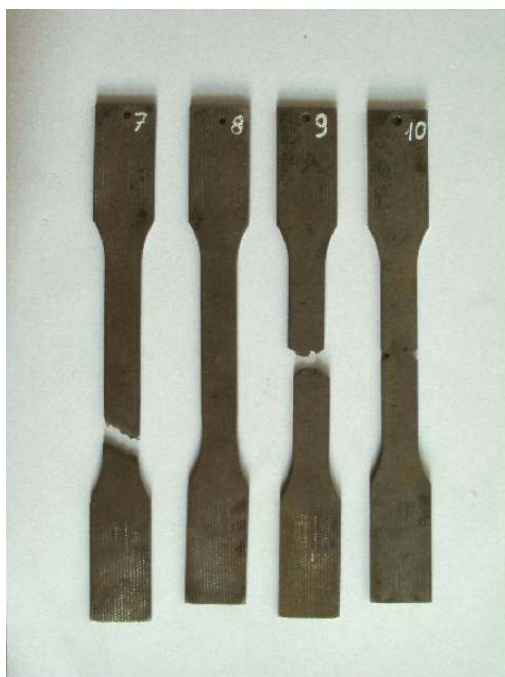


linia 3, 3500 Kg

Rys.20. Próbkę 14 w trakcie próby rozciągania.

3. Omówienie wyników i wnioski

Wygląd próbek nie wodorowanych po próbach rozciągania przedstawiony jest na Rys.21, a próbek wodorowanych – na Rys.22 .

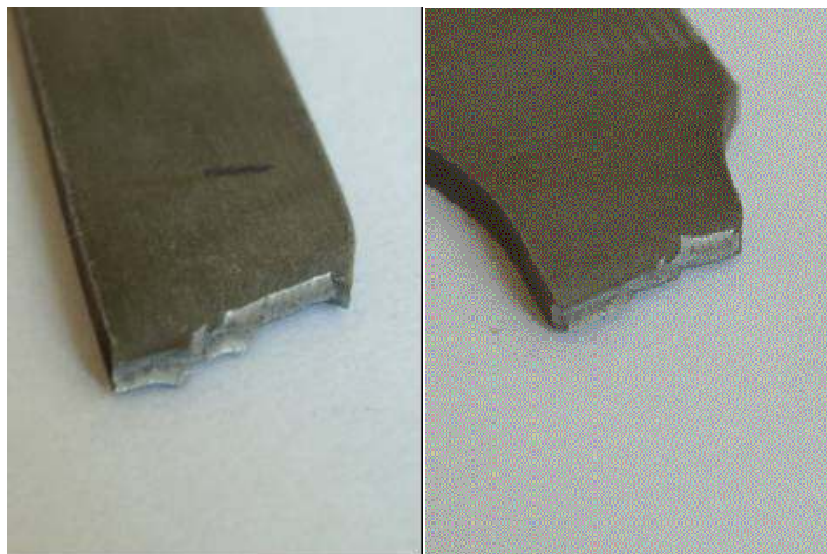


Rys.21. Wygląd próbek nie wodorowanych po próbach rozciągania.

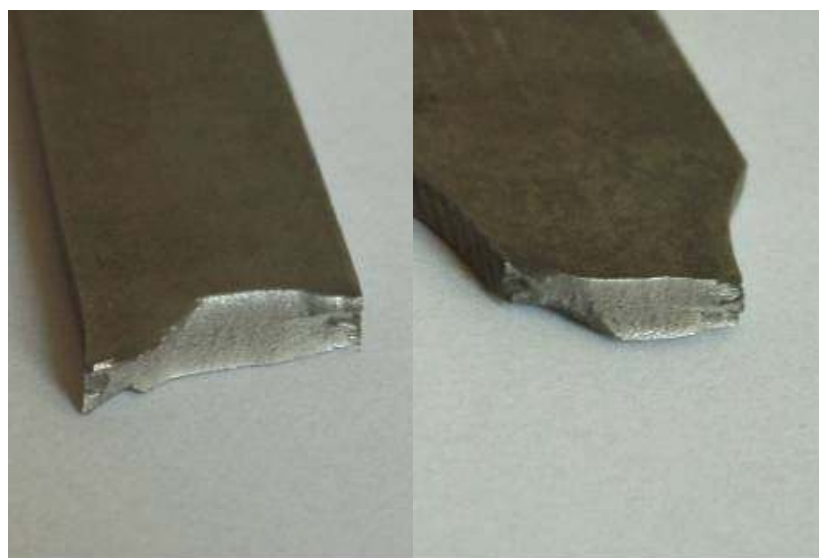


Rys.22. Wygląd próbek wodorowanych po próbach rozciągania.

Porównanie przełomów po próbie rozciągania próbek niewodorowanych (Rys.23) oraz wodorowanych (Rys.24) wykazuje istotne różnice pomiędzy nimi. W przypadku próbek wodorowanych na przełomie widoczne są defekty spowodowane nawodorowaniem w postaci mikropęknięć i szczelin, które są prawdopodobnie otwartymi pęcherzami wodorowymi.



Rys.23. Przełomy próbek niewodorowanych. Pow.3,3x



Rys.24. Przełomy próbek wodorowanych. Widoczne pęknięcia i szczeliny. Pow.3,5x.

Ponadto próbki wodorowane wykazują znacznie mniejsze przewężenie aniżeli niewodorowane. Widoczne jest to wyraźnie na Rys.25, na którym widoczne są obok siebie przełomy próbki wodorowanej (po prawej stronie) i niewodorowanej (po lewej stronie).



Rys.25. Porównanie wyglądu przełomu próbki nie wodorowanej (po lewej stronie) i wodorowanej (po prawej stronie). W próbce wodorowanej na przełomie widoczne są szczeliny i pęknięcia spowodowane nawodorowaniem. Próbka wodorowana wykazuje znacznie mniejsze przewężenie niż próbka nie wodorowana. Pow.4,0x

Badanie powyższych próbek Metodą Pamięci Magnetycznej Metalu w trakcie rozciągania wskazuje na znaczne różnice w ich namagnesowaniu wraz ze wzrostem obciążenia, w stosunku do próbek nie obciążonych: rys. 5 – próbka nr 7, rys. 7 – próbka nr 8, rys. 17 – próbka nr 12. przemieszczanie się miejsca zerowania parametru H_p wskazuje na lokalizację jej przyszłego pęknięcia, co zostało w pełni potwierdzone dla próbki nr 7.

Rozciąganie próbek z naciętym karbem wskazuje również na znaczne różnice w ich namagnesowaniu wraz ze wzrostem obciążenia: rys. 9 – próbka nr 9, rys. 10 – próbka nr 10, rys. 19 – próbka nr 13 i rys. 20 – próbka nr 14. Zerowanie się wartości H_p w środkowej części próbki (rys.19 i 20), w obszarze naciętego karbu, wskazuje na miejsce przyszłego pęknięcia.

Literatura

1. Dubov A.A. Diagnostyka wytrzymałości oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem Magnetycznej Pamięci Metalu; Dozór Techniczny 2, 2002, 14 – 18 i Dozór Techniczny 1, 2002, 37-40.
2. Deputat J. Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu; Dozór Techniczny 5, 2002, 97-105.
3. Łapiński Z., Łukaszewicz J. Badania metodą pamięci magnetycznej wodorowanych próbek stalowych; Problemy Techniki Uzbrojenia. 5, 2004.
4. Sprawozdanie z pracy nt. Badania materiałowe wycinków materiałów konstrukcyjnych oraz próby rozciągania próbek ze stali 30HGS, poddanych uprzednio obróbkom cieplnym; PW. Wydział Inżynierii Materiałowej. 2005.
5. Morrish A.H. Fizyczne podstawy magnetyzmu; Warszawa 1970, PWN.