

BADANIA METODĄ PAMIĘCI MAGNETYCZNEJ PRÓBEK STAŁOWYCH PODDANYCH RÓŻNORODNYM OBRÓBKOM CIEPLNYM

W artykule przedstawiono Metodę Magnetycznej Pamięci Metalu w zastosowaniu do wykrywania wad materiałowych, wytworzonych metodą wodorowania, mogących mieć negatywny wpływ na przydatność eksploatacyjną urządzeń oraz wyniki badań próbek stalowych poddanych różnorodnym obróbkom cieplnym.

Wstęp

Metoda Magnetycznej Pamięci Metalu 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 w obszarach materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej.

Przy jej stosowaniu, badanych elementów nie namagnesuje się w sposób sztuczny. Poprzestaje się na ich naturalnym namagnesowaniu w magnetycznym polu Ziemi. Sondy przemieszczające się po powierzchni badanego elementu rejestrują natężenie składowej prostopadłej rozproszonego pola magnetycznego H_r^y . Zmiany znaku i wartości H_r^y są wskazaniem, na podstawie których dokonywana jest ocena naprężenia i odkształcenia w materiale badanego elementu. Związek między rejestrowanymi wskazaniem H_r^y i naprężeniem materiału opiera się na zależności między naprężeniem i własnościami magnetycznymi ferromagnetyków znanej jako zjawisko magnetosprężyste. Zarejestrowane wskazania H_r^y można wykorzystać zarówno do badania pól odkształceń i naprężeń, jak też do wykrywania nieciągłości i wad mikrostruktury.

Jeżeli w namagnesowanym jednorodnie elemencie wystąpią zakłócenia, np. w postaci:

- pęknięcia otwartego na powierzchni lub wewnątrz materiału;
- wtrąceń materiału o innych własnościach magnetycznych;
- lokalnej zmiany grubości, a ponadto:
- obszarów koncentracji naprężeń;
- odkształceń plastycznych;
- zmęczeniowych zmian struktury,

to na skutek zmiany przenikalności magnetycznej powstaną lokalne anomalie stopnia namagnesowania materiału, pozostającego w magnetycznym polu Ziemi:

$$B = \mu H$$

Działanie roboczych naprężeń zmieniając wartość indukcji magnetycznej, nie tylko wzmacnia sygnał pochodzący z obszarów z defektami, tym samym zwiększając prawdopodobieństwo ich ujawnienia, ale niejako przy okazji ujawniają się obszary koncentracji naprężeń, gdzie procesy korozji, zmęczenia i pełzania rozwijają się bardziej intensywnie.

Magnetyczne pole rozproszenia badanego elementu stanowi zatem tło dla lokalnych anomalii jego namagnesowania.

Pole magnetyczne powstałe w wyniku istnienia w w niejednorodności ma podobne własności do pola wytworzonego przez magnes sztabkowy. Przy warunku jednorodnego namagnesowania materiału można go z wystarczającą dokładnością opisać polem dipolu punktowego:

$$H_r^y = m \left\{ \frac{r}{[(x+l)^2 + r^2]^{3/2}} - \frac{r}{[(x-l)^2 + r^2]^{3/2}} \right\}$$

Technika badania polega na przemieszczaniu po powierzchni badanego elementu sond pomiarowych, które rejestrują natężenie składowej prostopadłej magnetycznego pola rozproszenia.

Naprężenia wewnętrzne

Podczas każdej obróbki cieplnej metalu lub stopu, powstają w nim pewne, mniejsze lub większe naprężenia, najczęściej na skutek nierównomiernego ogrzewania lub chłodzenia, które może mieć różne przyczyny, jak:

- duża masa obrabianych przedmiotów;
- duży ich przekrój;
- nieprawidłowe ułożenie w piecu;
- wady samych pieców itp.

Najważniejszą jednak przyczyną wywołującą naprężenia jest szybkość grzania, a szczególnie chłodzenia, która w porównaniu do grzania jest przy niektórych obróbkach szczególnie duża.

Naprężenia wewnętrzne powstają w materiale również na skutek jego obróbki plastycznej na zimno, kiedy zachodzą w nim duże odkształcenia trwałe, lub wskutek obróbki cieplnej dzięki nierównoczesności przemian i rozszerzania cieplnego. Zazwyczaj powstają one równocześnie w siatce krystalicznej, ziarnie krystalicznym lub całym przekroju.

Naprężenia powstałe w siatce elementarnej lub ziarnie krystalicznym, tzn. naprężenia pierwszego lub drugiego rodzaju prowadzą tylko do zmiany własności mechanicznych materiału, lecz nie doprowadzają do jego zniszczenia. Natomiast naprężenia w przekroju przedmiotu, tzn. naprężenia trzeciego rodzaju prowadzą do pacyenia się przedmiotu, a nawet jego zniszczenia, kiedy przekroczą nie tylko granicę plastyczności, lecz również wartość naprężenia rozrywającego.

Naprężenia wewnętrzne mogą być spowodowane zmianami cieplnymi, fazowymi lub cieplnymi i fazowymi.

A: naprężenia cieplne.

Powstają one na skutek zmian cieplnych wtedy, kiedy przekrój przedmiotu jest nierównomiernie ogrzewany lub ochładzany. Zazwyczaj są one większe podczas schładzania, ponieważ przeprowadza się je zwykle znacznie szybciej niż ogrzewanie. Jeżeli przedmiot o znacznym przekroju poddać ochładzaniu, to powierzchnia przedmiotu ochładzać się będzie znacznie szybciej niż jego rdzeń. Różnica temperatur początkowo wzrasta, osiąga maksimum i następnie maleje do zera. Im ta różnica większa, tym większe naprężenia wewnętrzne w materiale i tym większe niebezpieczeństwo pękania się materiału i powstania mikroszczelin prowadzących do jego zniszczenia. W miarę zwiększania szybkości chłodzenia wzrasta różnica temperatur między rdzeniem i powierzchnią, co prowadzi do jeszcze większego niebezpieczeństwa powstania dużych naprężeń i zniszczenia materiału. Maksimum różnicy temperatur odpowiada najbardziej niebezpiecznemu momentowi ochładzania, szczególnie, gdy temperatura materiału jest stosunkowo niska i jest on mało plastyczny. W przeciwnym wypadku, gdy temperatura jest jeszcze wysoka i materiał jest plastyczny, niebezpieczeństwa nie ma, ponieważ nastąpi wtedy odkształcenie plastyczne, które z jednej strony prowadzi do zmniejszenia naprężeń, a z drugiej do zwiększenia wytrzymałości plastycznie odkształconej struktury.

Z powyższego wynika, że niebezpieczeństwo powodowane dużą różnicą temperatur istnieje tylko wtedy, gdy temperatura przedmiotu jest niska i materiał mało plastyczny. Dla metali bardzo plastycznych, jak: miedź, glin i ich stopy, żelazo i niektóre stale niskowęglowe, niebezpieczeństwa takiego nie ma. Natomiast przy gwałtownym ochładzaniu metali mało plastycznych znaczna różnica temperatur rdzenia i powierzchni wywołuje duże naprężenia wewnętrzne, które nie mogą być usunięte lub przynajmniej zmniejszone przez plastyczne odkształcenia, przekraczające wytrzymałość doraźną materiału i prowadzące do jego zniszczenia. Pomimo, że po skończonym ochładzaniu temperatura powierzchni i rdzenia przedmiotu ulega wyrównaniu, to jednak naprężenia w nim powstałe niekoniecznie muszą ustąpić. Tłumaczy się to tym, że w czasie stygnięcia, kiedy powierzchnia jest ochładzana, a temperatura rdzenia jeszcze wysoka, objętość właściwa rdzenia jest większa niż powierzchni i to powoduje rozciąganie warstw powierzchniowych. Jeżeli pod wpływem występujących wtedy na powierzchni naprężeń rozciągających warstwy powierzchniowe ulegną trwałemu odkształceniu plastycznemu, to po oziębieniu rdzenia sytuacja się zmieni i one staną się źródłem naprężeń wywołujących rozciąganie rdzenia. Te naprężenia, które powstają w przedmiocie po całkowitym jego ochłodzeniu, noszą nazwę naprężeń szczytkowych.

B: naprężenia strukturalne.

Jeżeli materiał podczas ogrzewania lub ochładzania nie podlega żadnym przemianom fazowym lub strukturalnym, to powstające naprężenia będą tylko naprężeniami cieplnymi. Jeżeli natomiast materiał podczas ogrzewania lub chłodzenia podlega przemianom fazowym lub tylko strukturalnym, to oprócz naprężeń cieplnych mogą w nim występować jeszcze naprężenia fazowe lub strukturalne, które dodając się lub odejmując od nich, dają naprężenia całkowite.

Naprężenia strukturalne powstają, podobnie jak cieplne, w różnych punktach przekroju na skutek nie równomierności ochładzania, lecz mogą powstać również przy równoczesnym ochładzaniu, gdy w różnych punktach przekroju nastąpią dwie różne przemiany fazowe, chociażby na skutek niejednorodności składu materiału. Niech, np. w pewnym punkcie przekroju stalowego materiału nastąpi przemiana przechłodzonego austenitu w troostyt, a w innym (sąsiednim) w martenzyt, to

ponieważ te dwa składniki różnią się objętością właściwą, więc powstaną w materiale znaczne naprężenia strukturalne, które mogą spowodować nawet jego zniszczenie. Po skończonej przemianie fazowej występują tylko naprężenia cieplne, w rdzeniu nadal jednak ściskające, w strefie pośredniej rozciągające, a na powierzchni słabo ściskające, co jest spowodowane nieznacznymi odkształceniami trwałymi, jakie zaszły na powierzchni w czasie ochładzania.

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.

Badaniom Metodą Pamięci Magnetycznej Metalu poddano próbki stalowe: normalizowane, hartowane i nisko odpuszczane oraz wodorowane.

Materiał badanych próbek jest najbardziej zbliżony do stali 20HGS wg PN, zawiera jednak mniej węgla.

Próbki normalizowane

Próbki wygrzewano w piecu muflowym w temperaturze 900°C, a następnie studzono w spokojnym powietrzu.

Normalizowanie polega na nagrzaniu stali powyżej temperatury A_{C3} (w przypadku stali podeutektoidalnych), wygrzaniu w tej temperaturze i studzeniu w spokojnym powietrzu w celu uzyskania drobnego ziarna i równomiernego rozłożenia składników strukturalnych. Stosunkowo krótkie czasy wygrzewania i dość szybkie chłodzenie w spokojnym powietrzu sprzyjają uzyskaniu korzystnej mikrostruktury drobnoziarnistej. Normalizowanie polepsza własności wytrzymałościowe stali w porównaniu ze stanem surowym.

Po obróbce cieplnej powierzchnię próbek oczyszczano z zendry metodą trawienia w roztworze HCl z dodatkiem urotropiny.

W rezultacie normalizowania uzyskano następujące twardości próbek;

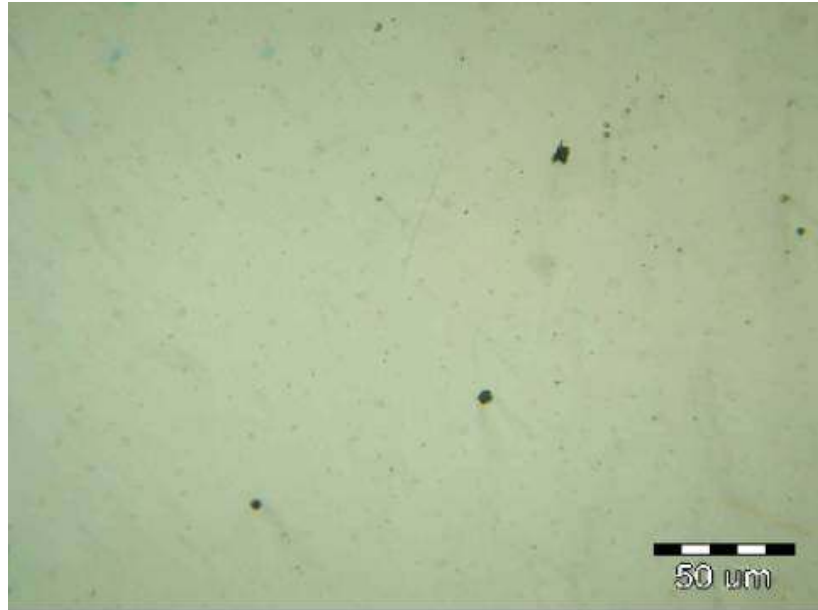
- Próbka nr 4: 151 HV30 śr.;
- Próbka nr 5: 147 HV30 śr.;
- Próbka nr 6: 148 HV30 śr.

Przy obciążeniu 294N.

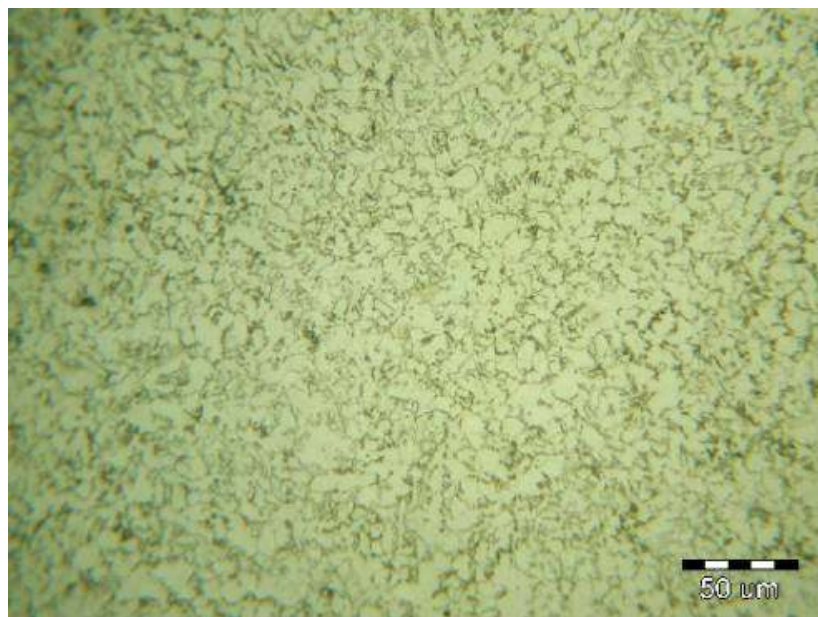
Twardość materiału próbek po normalizowaniu odpowiada stali niskowęglowej.

Badania metalograficzne próbek po normalizowaniu

Badania mikrostruktury próbek normalizowanych przeprowadzono na szlifach nietrawionych i trawionych nitaliem. Na Rys. 1 widoczne są wtrącenia niemetaliczne na szlifie nietrawionym próbki pobranej z płytki nr 4 (po normalizowaniu). Wtrącenia te są analogiczne jak w przypadku próbek surowych. Mikrostrukturę materiału normalizowanych próbek po trawieniu nitaliem, składającą się z jasnych ziaren ferrytu i niewielkiej ilości ciemnego perlitu, przedstawia Rys. 2. Jest to typowa mikrostruktura niskowęglowej, niskostopowej, stali konstrukcyjnej.



Rys.1. Płytką Nr 4 po normalizowaniu. Szlif nie trawiony, styczny do powierzchni płytki. Widoczne są różnej wielkości wtrącenia niemetaliczne w postaci ciemnych punktów. Pow. 430x

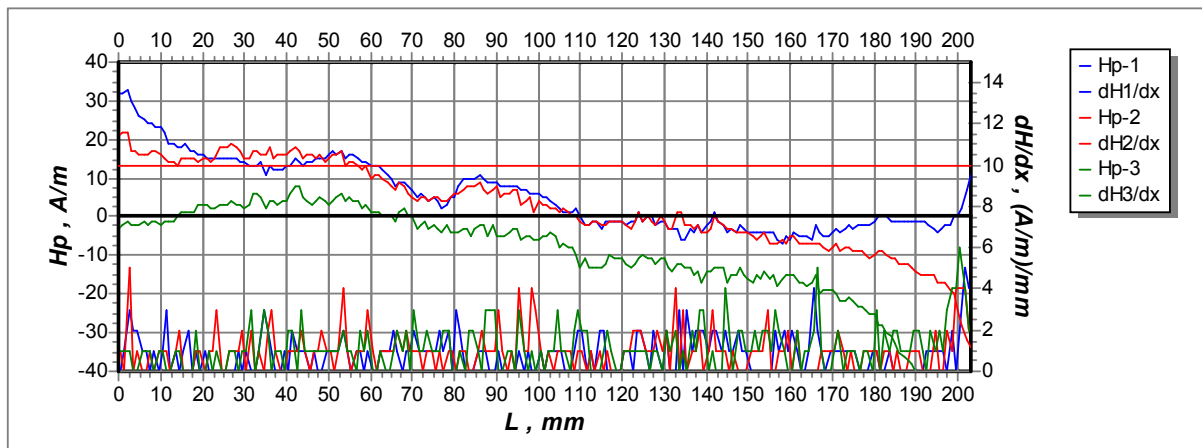


Rys.2. Mikrostruktura materiału płytki Nr 4 po normalizowaniu. Próbką trawiona nitałem. Widoczne są jasne ziarna ferrytu z niewielką ilością perlitu (ciemne miejsca). Pow. 365x

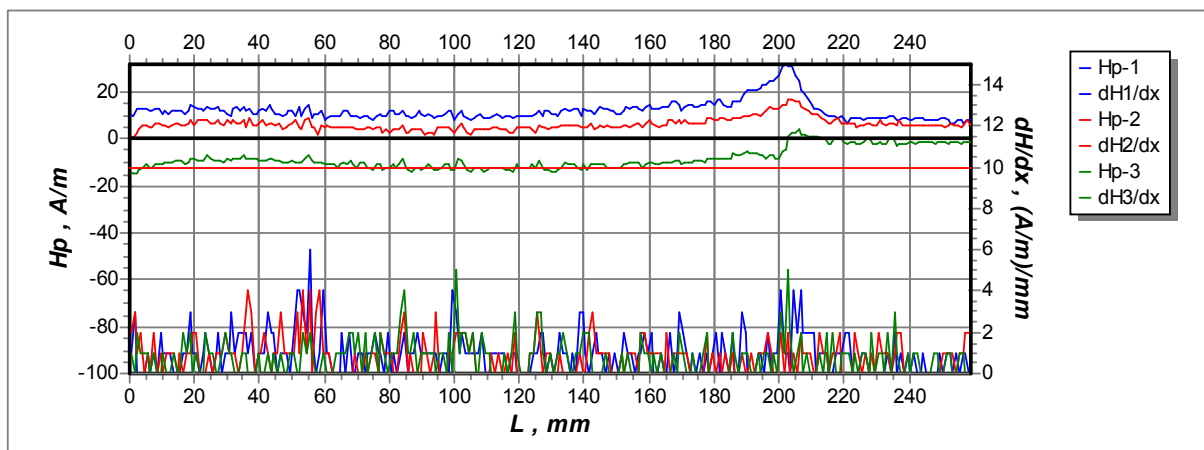
Badanie ww próbek metodą pamięci magnetycznej

Badaniom poddano próbki nr 4 i 6.

Pomiary przeprowadzono przemieszczając czujniki wzdłuż środka próbek (linia 3) i przy ich krawędziach (linia nr 1 i 2).

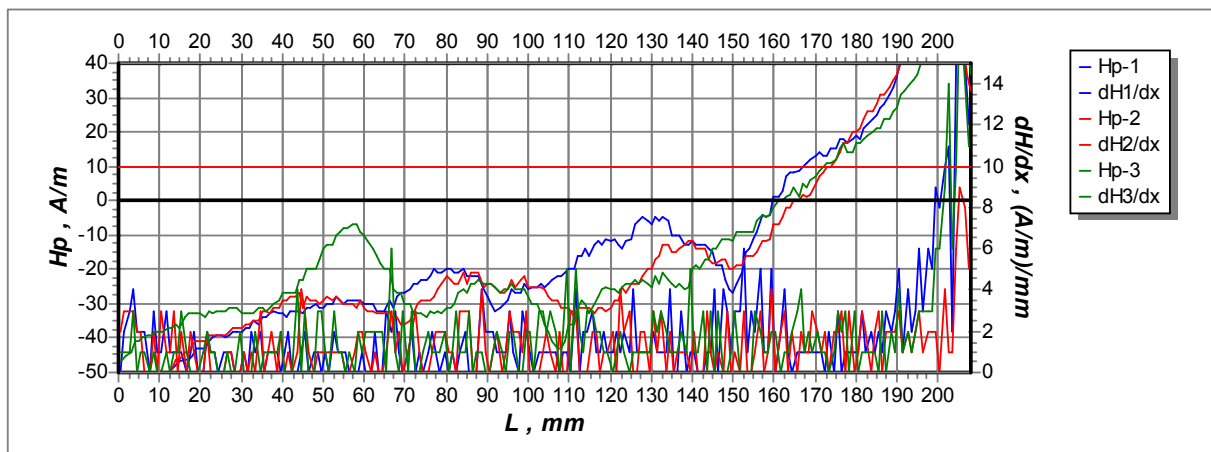


wycięta

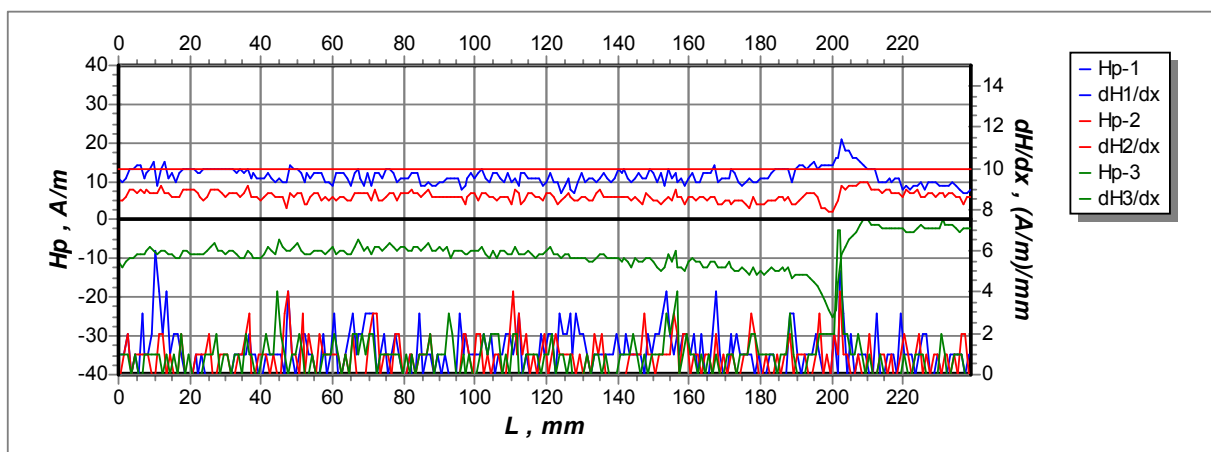


po normalizacji

Rys. 3. Próbkę nr 4



wycięta



normalizowana

Rys.4. Próbkę nr 6.

Próbki hartowane i nisko odpuszczane

Płytki oznaczone numerami 1, 2 i 3 poddano hartowaniu i niskiemu odpuszczaniu. Płytki Nr 2 i 3 były hartowane w całości, natomiast próbka Nr 1 została zahartowana tylko do połowy. Nagrzewanie prowadzono w piecu muflowym. Temperatura hartowania wynosiła 880°C, chłodzenie przeprowadzono w wodzie. Hartowanie próbki Nr 1 do połowy zrealizowano w ten sposób, że została ona nagrzana do temperatury hartowania w całości, natomiast w czasie chłodzenia w wodzie została zanurzona tylko do połowy swojej długości i tylko ta połowa uległa zahartowaniu. Druga połowa próbki, od strony wygrawerowanego numeru, stygła na powietrzu, w rezultacie czego uległa tylko normalizacji.

Po hartowaniu próbki były poddawane niskiemu odpuszczaniu. Temperatura odpuszczania wynosiła 240°C. Po odpuszczaniu próbki były chłodzone na powietrzu.

Po obróbce cieplnej, w celu oczyszczenia powierzchni z zendry, płytki wytrawiano w roztworze HCl z dodatkiem urotropiny.

W rezultacie normalizowania uzyskano następujące twardości próbek;

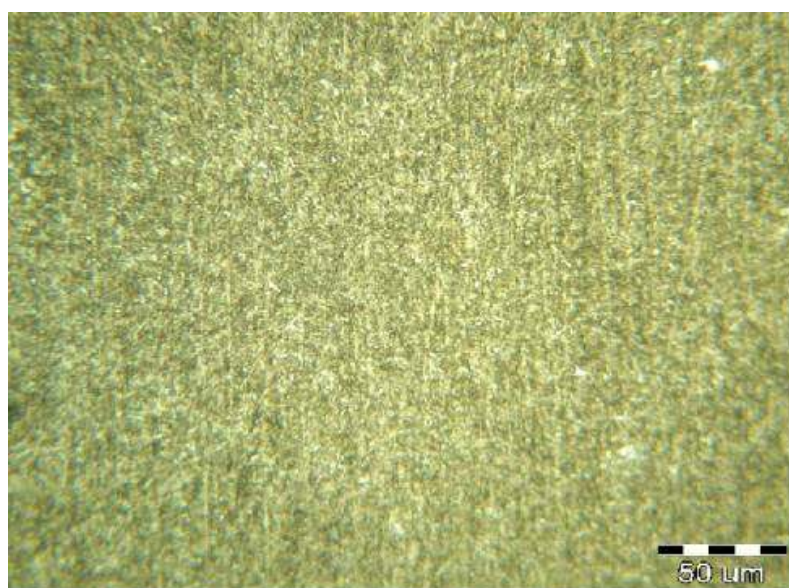
- Próbkę nr 1: część hartowana: 202 HV30 śr.;
część normalizowana: 148 HV30 śr.;

- Próbka nr 2: 201 HV30 śr.;
- Próbka nr 3: 200 HV30 śr.
Przy obciążeniu 294N.

Twardość materiału próbek po normalizowaniu odpowiada stali niskowęglowej.

Badania metalograficzne próbek hartowanych i nisko odpuszczanych

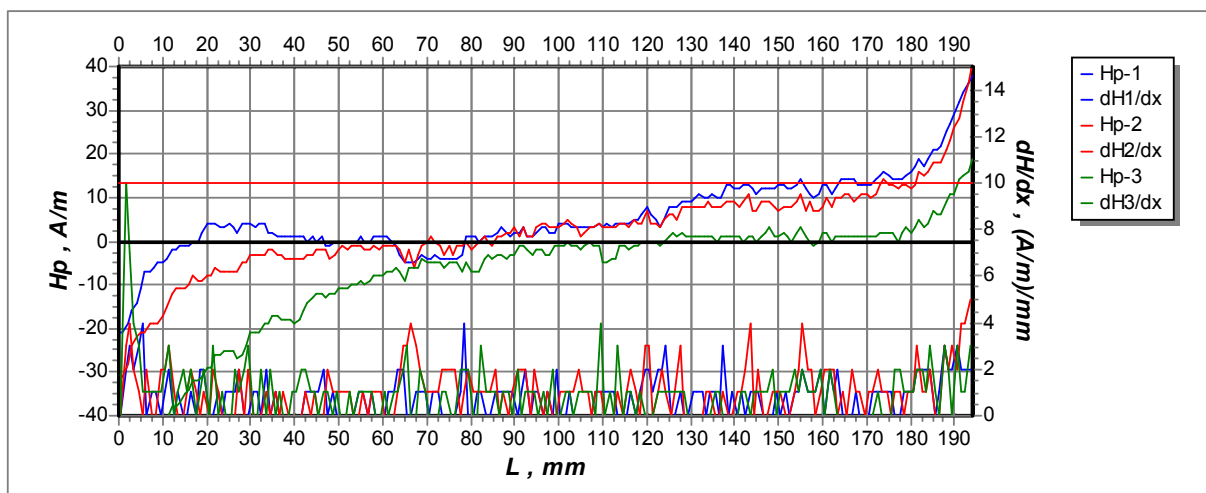
W celu ujawnienia mikrostruktury materiału próbek po obróbce cieplnej polegającej na hartowaniu i niskim odpuszczaniu przeprowadzono obserwacje mikroskopowe na szlifach stycznych do powierzchni płytek trawionych nitałem. Rys. 5 przedstawia mikrostrukturę zahartowanej części płytki nr 1. Widoczny na zdjęciach „niskowęglowy” odpuszczony martenzyt stanowi potwierdzenie przemian fazowych, które zaszły w czasie hartowania.



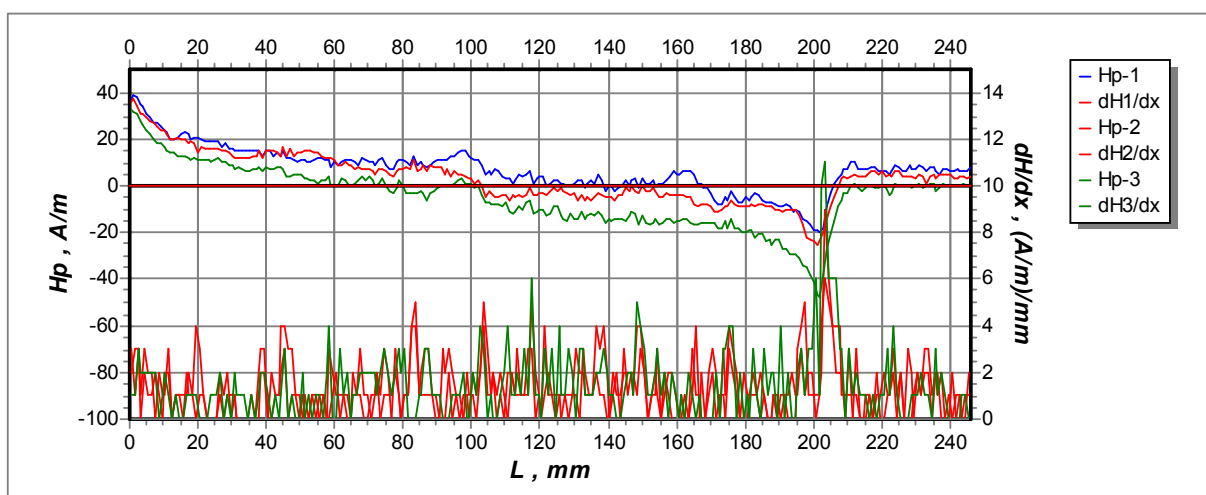
Rys.5. Płytko Nr 1, hartowana i nisko odpuszczana. Widoczna jest mikrostruktura odpuszczonego martenzytu. Próbka trawiona nitałem. Pow. 400x

Badania próbek hartowanych i nisko odpuszczanych metodą pamięci magnetycznej

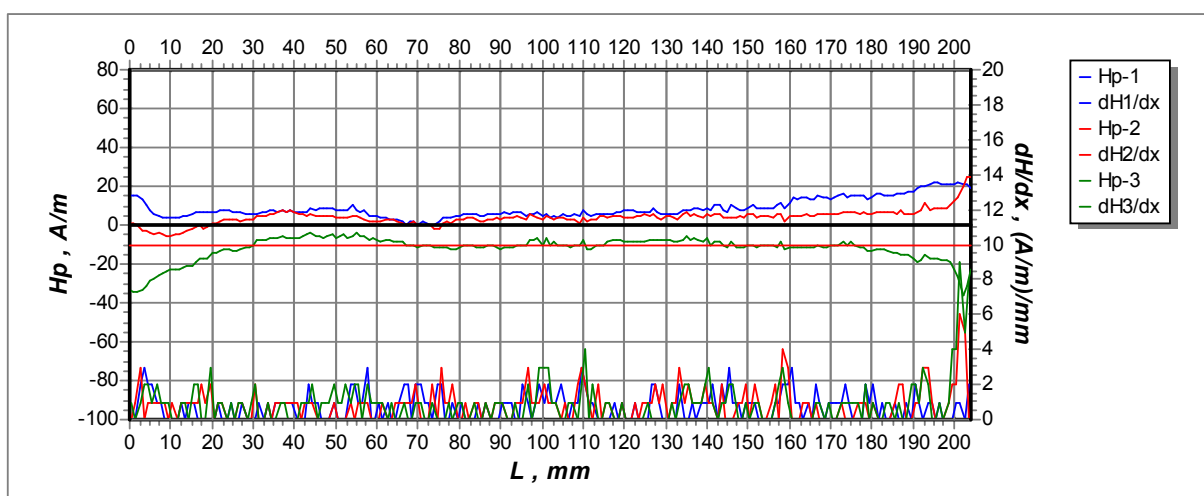
Poniżej przedstawiono wyniki badań metodą magnetycznej pamięci metalu dla próbek nr 1 i 3.



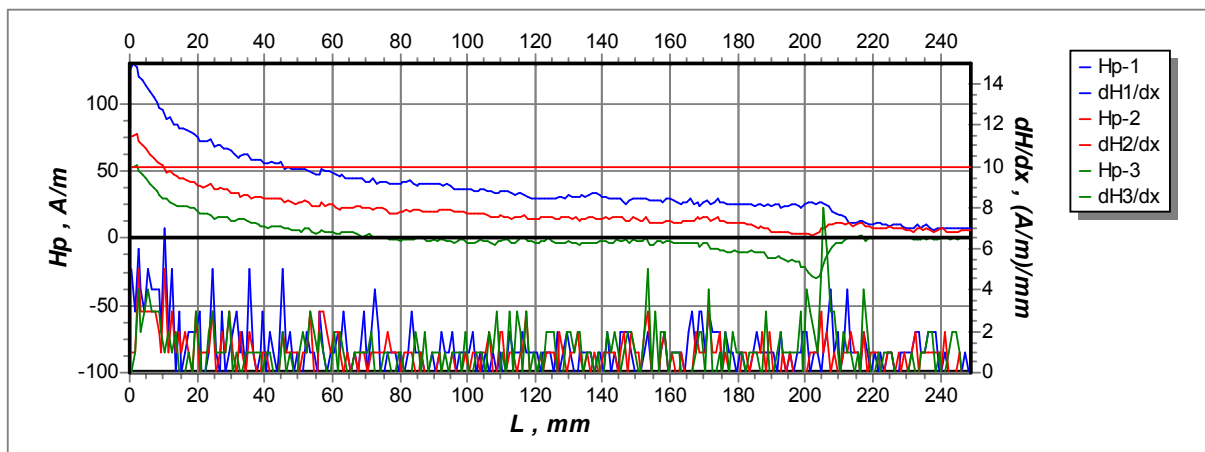
Wycięta, linia 3
Rys.6. Próbkę nr 1 do obróbki cieplnej



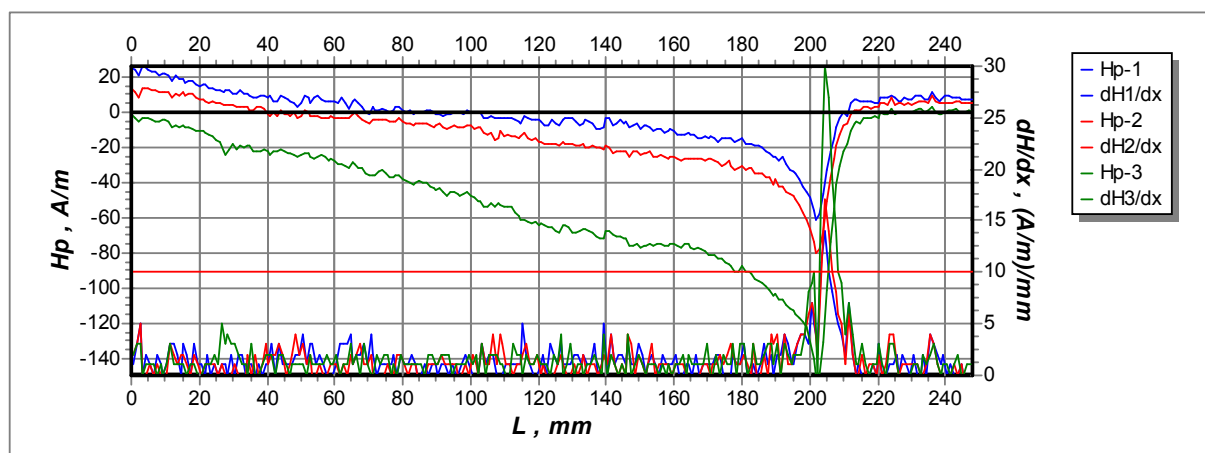
Linia 3
Rys.7. Próbkę nr 1



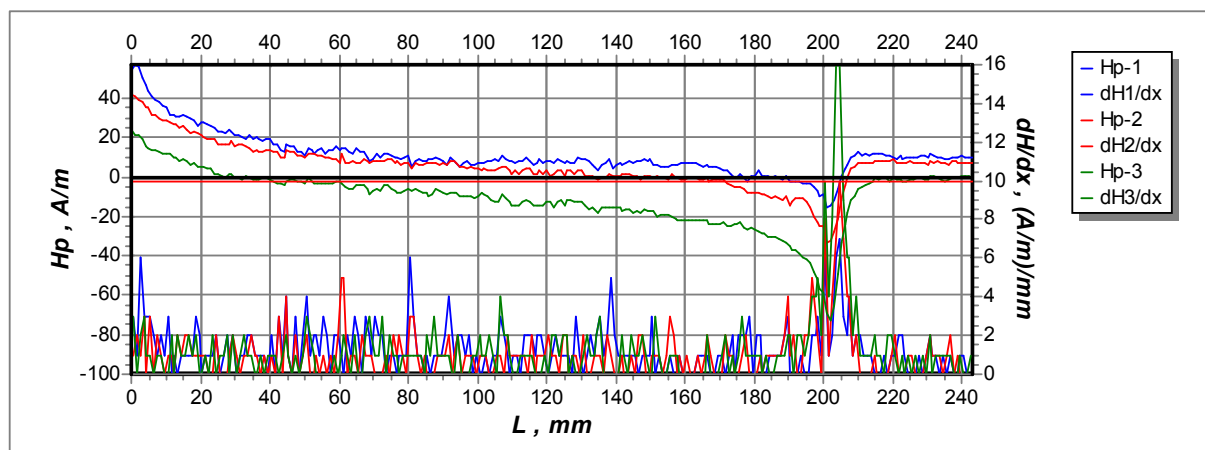
linia skanowania 3
Rys.8. Próbkę nr 3 po cięciu, do obróbki cieplnej.



Linia nr 1.



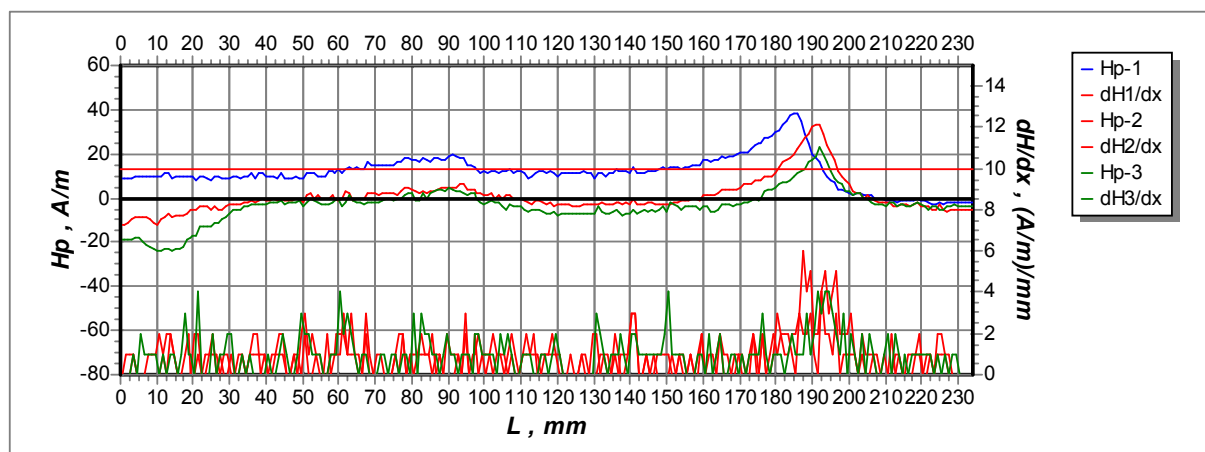
Linia nr 2.



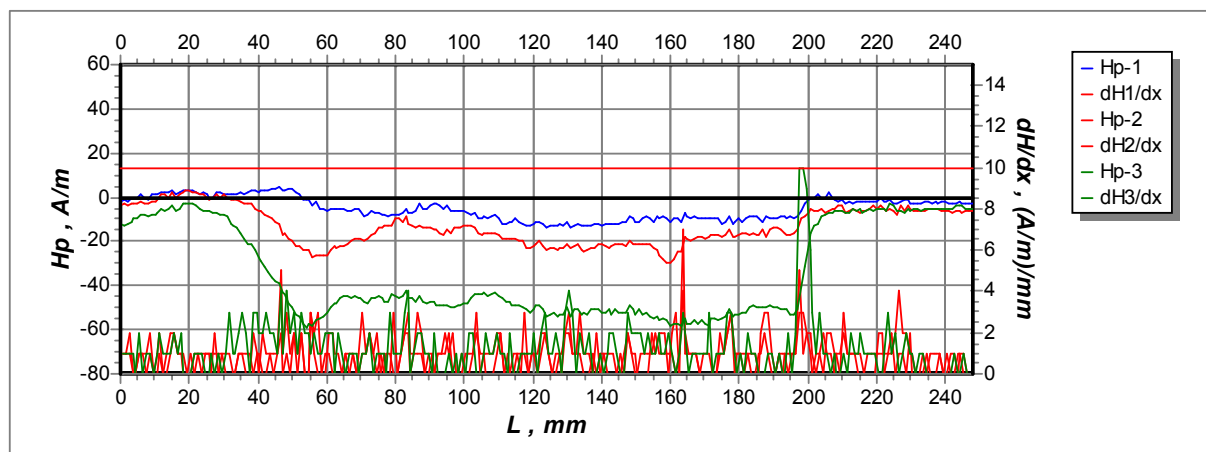
Linia nr 3.

Rys. 9. Próbką nr 3, po hartowaniu.

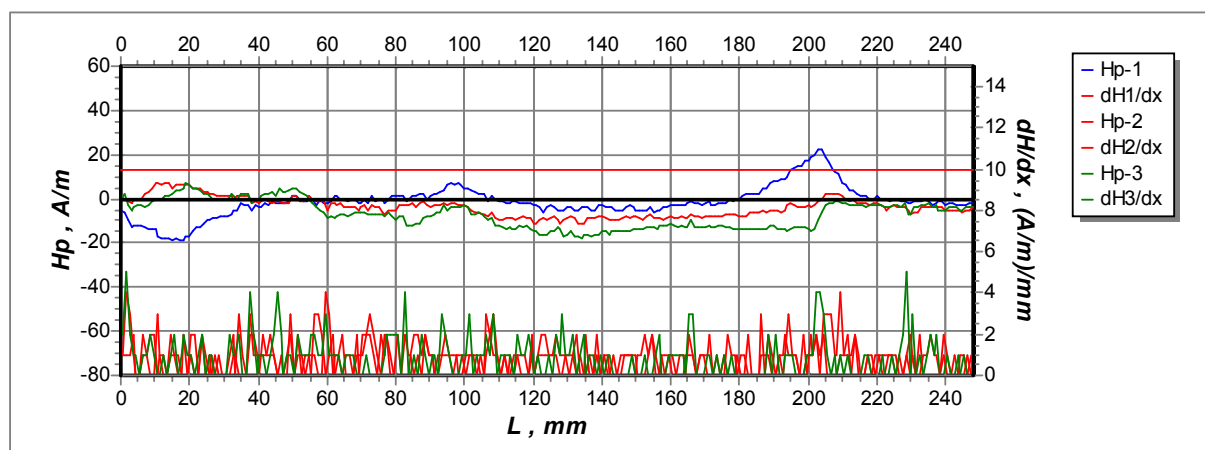
Badania próbek hartowanych po niskim odpuszczaniu metodą pamięci magnetycznej metalu.



linia 1

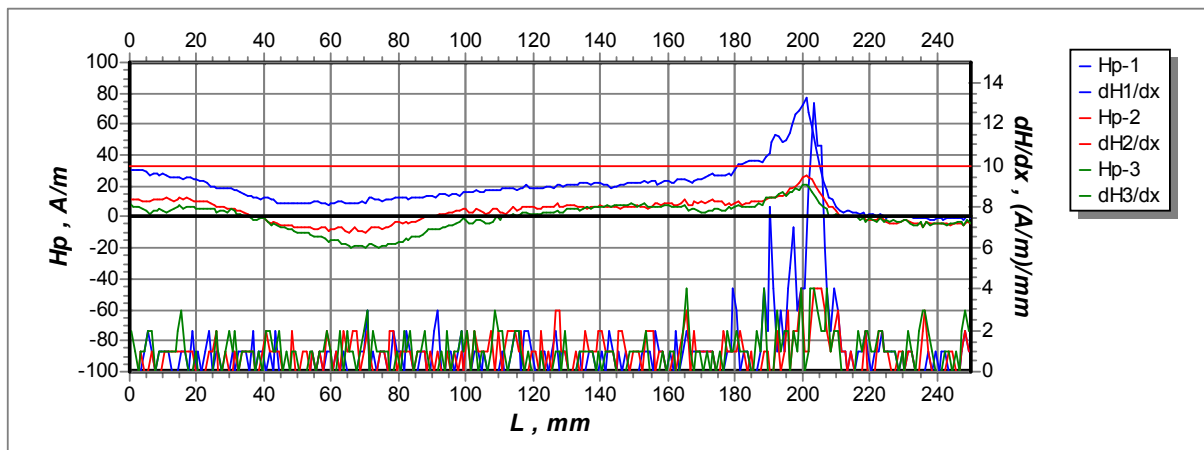


linia 2

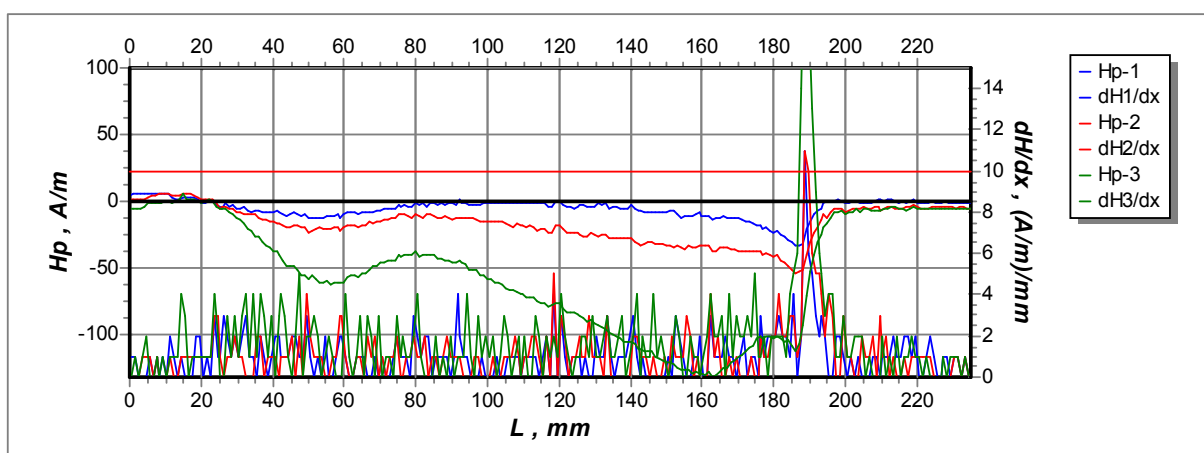


linia 3

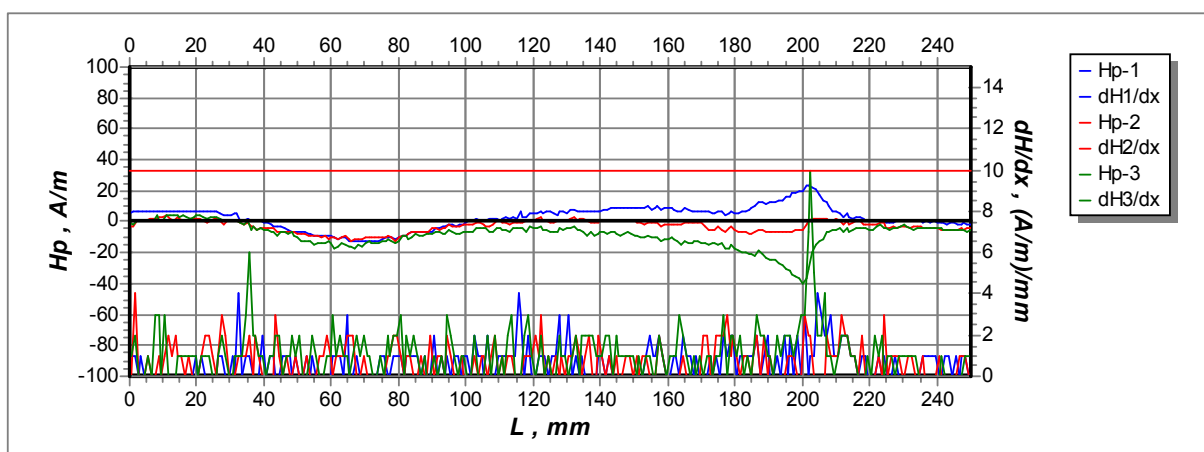
Rys.10. Próbkę 1 po hartowaniu i odpuszczaniu.



linia 1



linia 2



linia 3

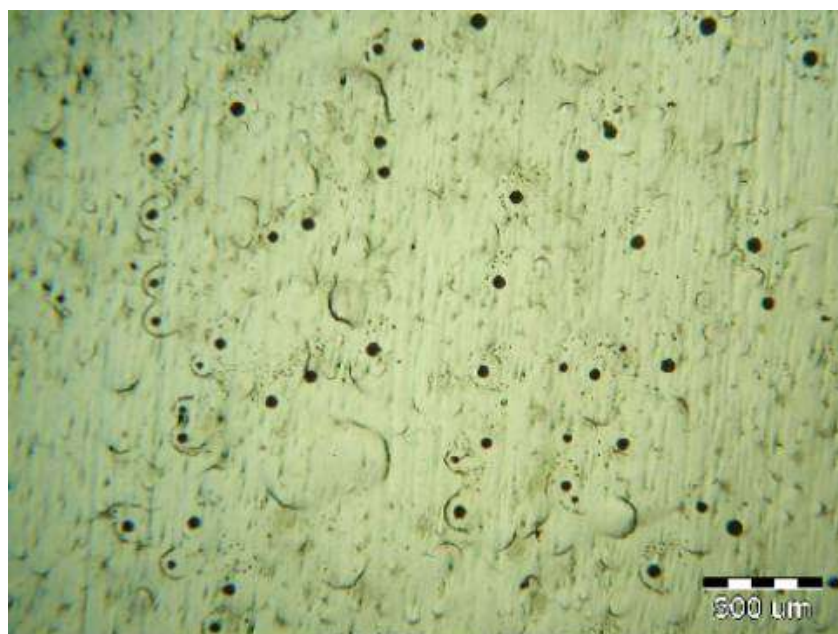
Rys.11. Próbką 3 po hartowaniu i odpuszczaniu.

Wodorowanie próbek hartowanych i nisko odpuszczanych

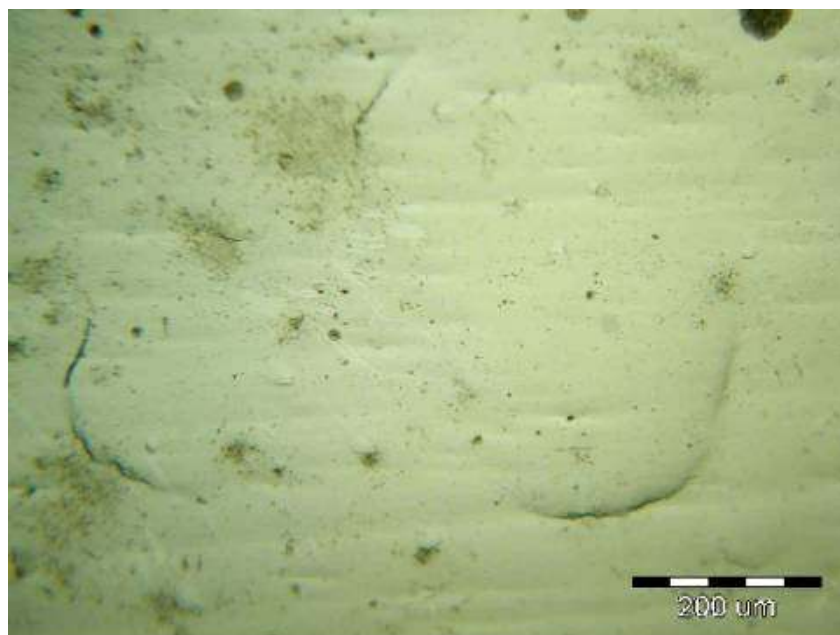
W celu symulacji wad materiałowych elementów metalowych poddanych długotrwałej i intensywnej eksploatacji, na nw próbkach przeprowadzono próby ich nawodorowania.

Płytki nr 1, 2 i 3, które były hartowane i nisko odpuszczane, poddane zostały wodorowaniu w 0,5M H_2SO_4 z dodatkiem promotora wnikania wodoru, w temperaturze otoczenia, przy gęstości prądu 10 mA/cm^2 , w ciągu 3,5 godzin. Płytki stanowiły katodę, anoda była wykonana z platyny. W celu określenia zmian mikrostruktury materiału płytek spowodowanych wodorowaniem przeprowadzono badania metalograficzne na wypolerowanej próbce kontrolnej wyciętej z części hartowanej płytki Nr 1.

Na Rys.12 widoczna jest, pod małym powiększeniem, mikrostruktura powierzchni wodorowanej próbki, pobranej z hartowanej płytki Nr 1. Widoczne są liczne, płaskie pęcherze wodorowe z mikropęknięciami. Rys. 13 i 14 przedstawiają fragmenty mikrostruktury wodorowanej próbki pod większym powiększeniem.



Rys.12. Płytką Nr 1 hartowaną, nisko odpuszczaną i wodorowaną katodowo. Szlif nie trawiony. Widoczne liczne, płaskie pęcherze wodorowe z mikropęknięciami.
Pow. 36x

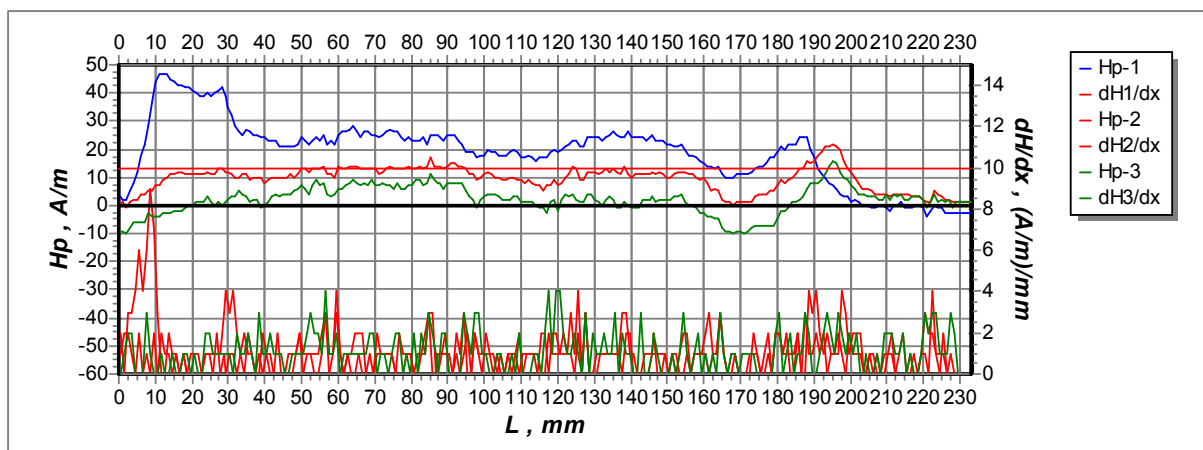


Rys.13. Jak na Rys.12 – większe powiększenie. Widoczne mikropęknięcia spowodowane tworzeniem się pęcherzy wodorowych. Pow. 140x

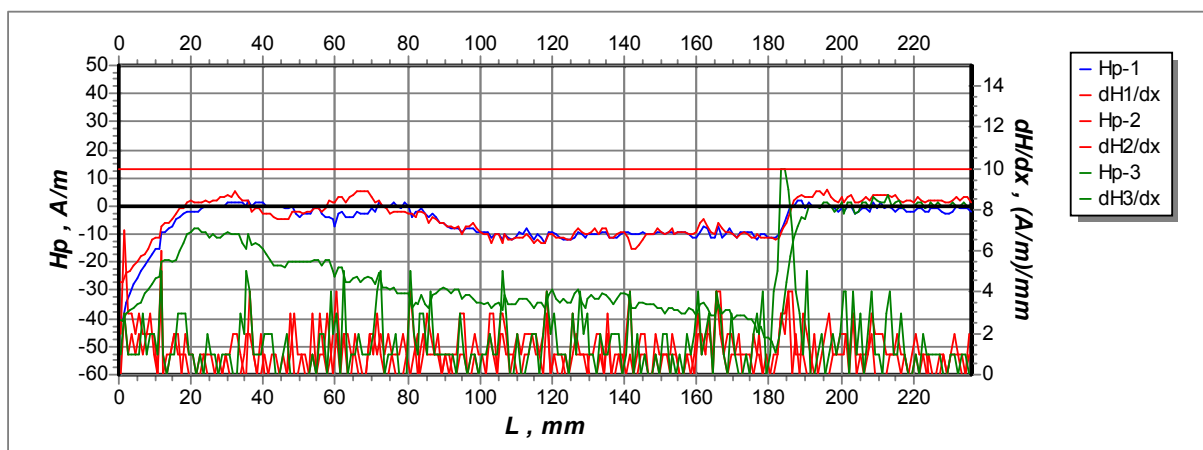


Rys.14. Jak na Rys.12 – większe powiększenie. Widoczne pojedyncze mikropęknięcia na brzegu pęcherza wodorowego. Pow. 365x

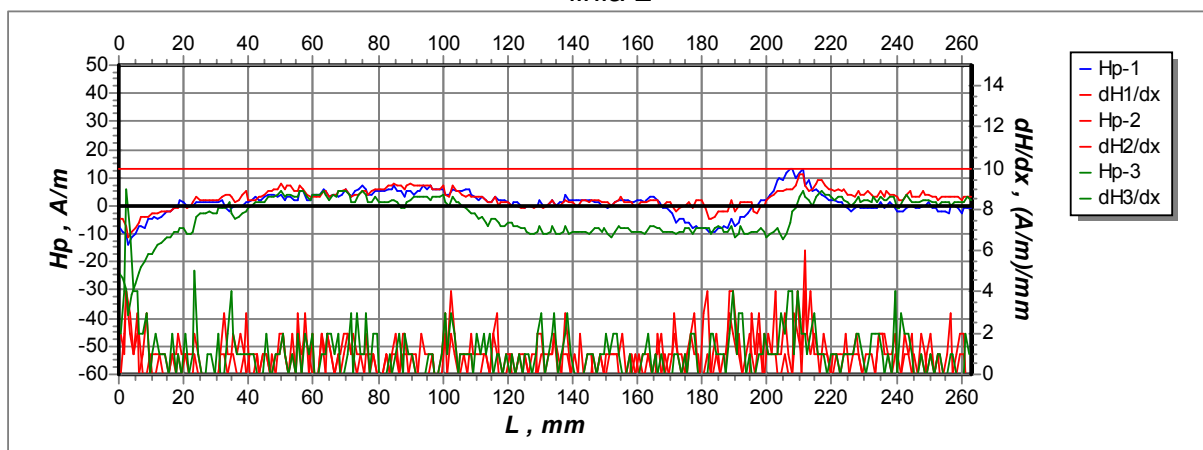
Badania próbek wodorowanych Metodą Pamięci Magnetycznej Metalu.



linia 1

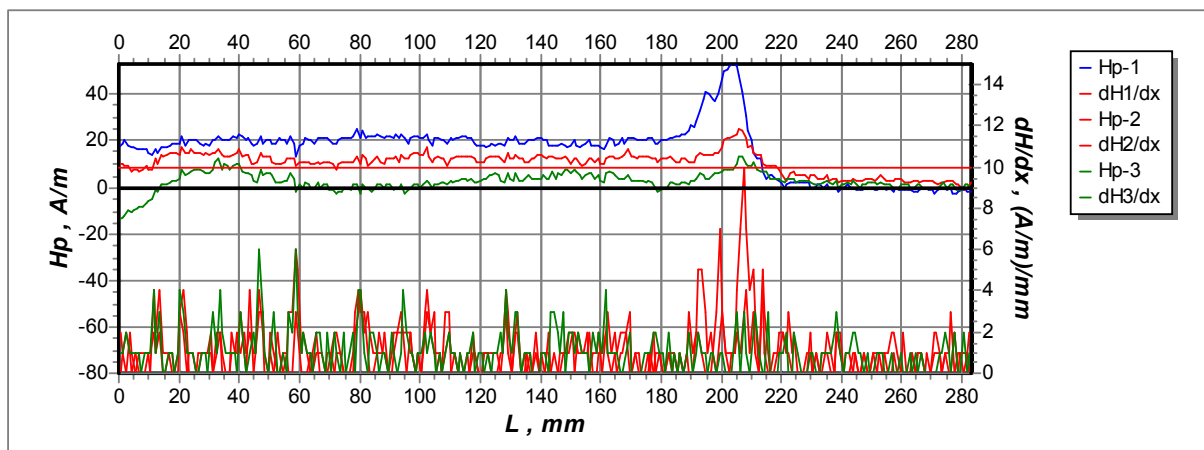


linia 2

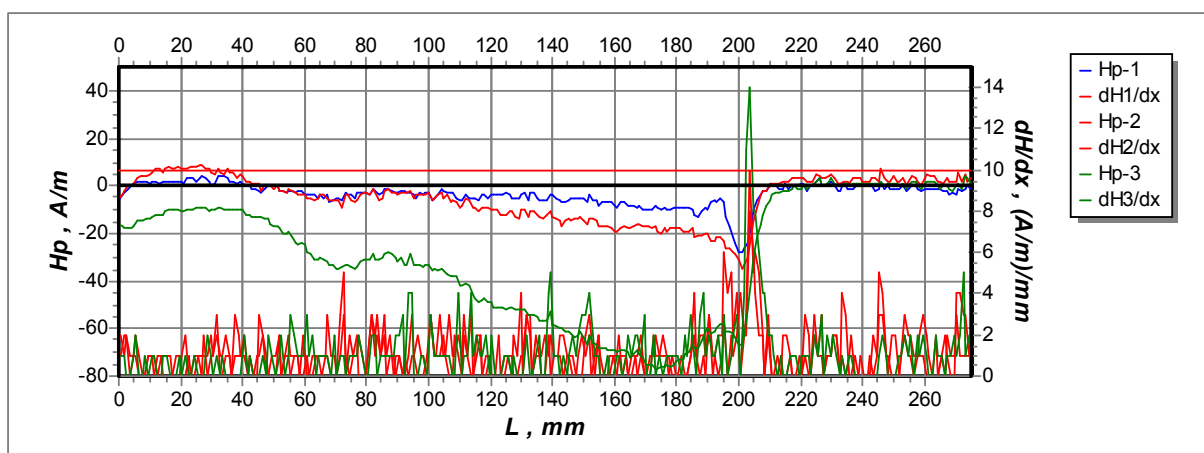


linia 3

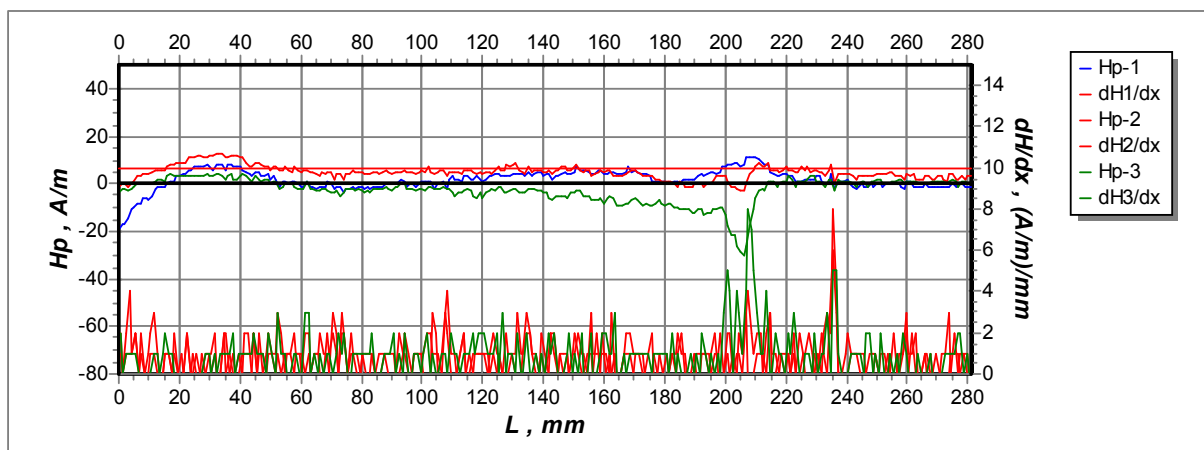
Rys. 15. Próbkę nr 1 po wodorowaniu.



linia 1



linia 2

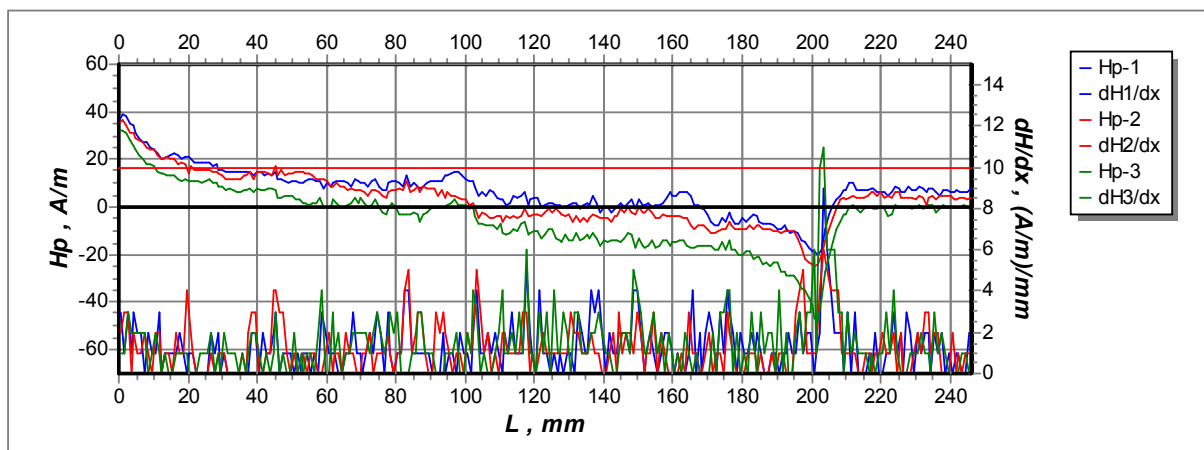


linia 3

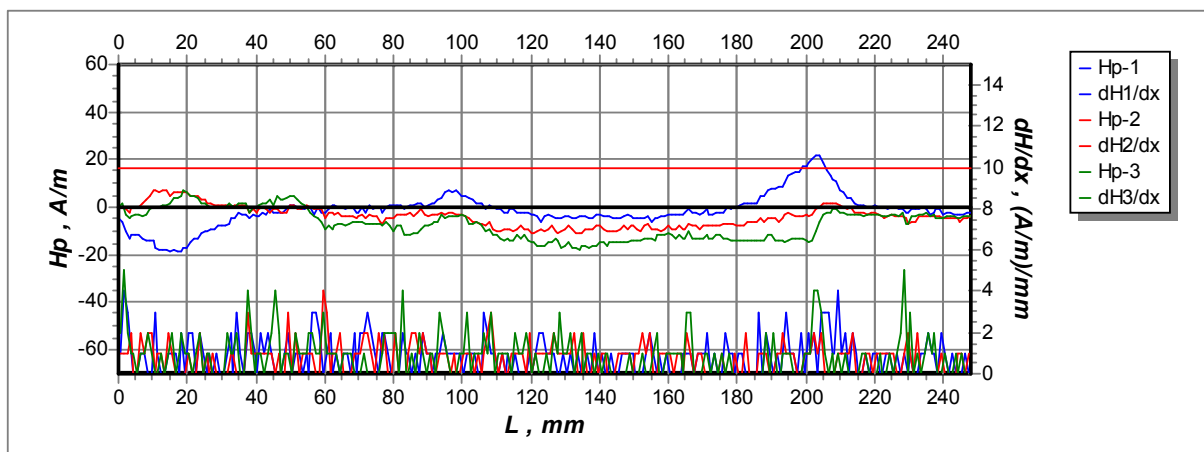
Rys. 16. Próbkę nr 3 po wodorowaniu.

Podsumowanie badań i wnioski

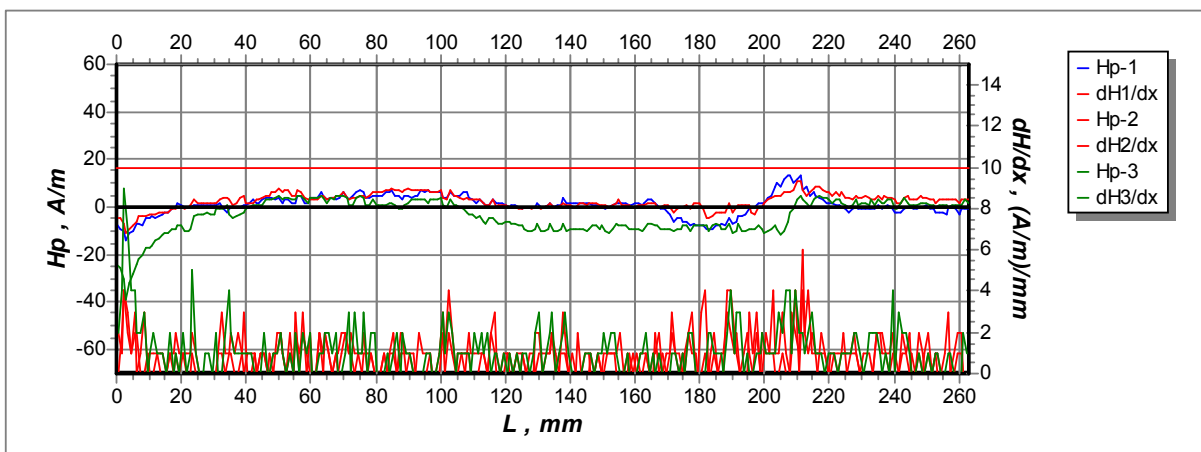
Zbiorcze wyniki badań



próbka hartowana, linia 3.

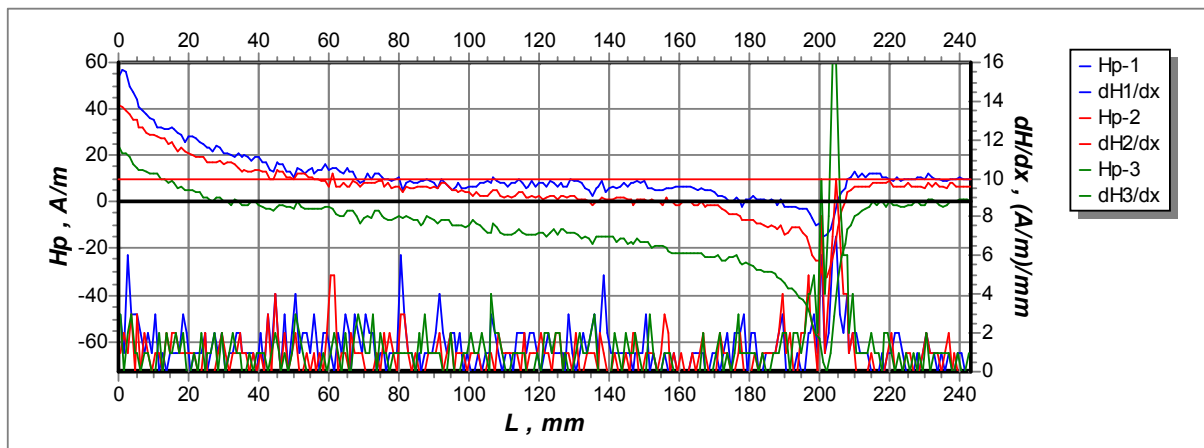


próbka odpuszczana, linia 3.

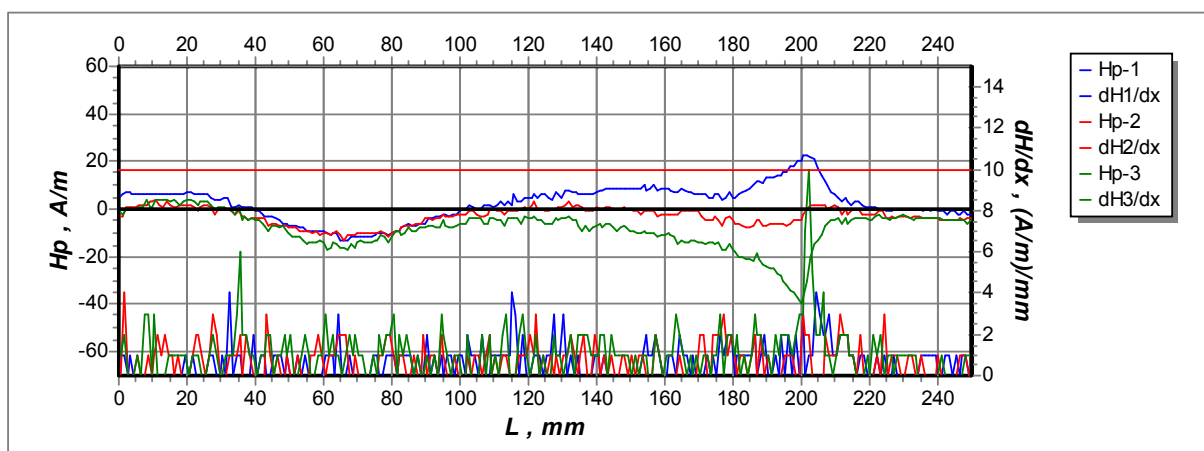


próbka wodorowana, linia 3.

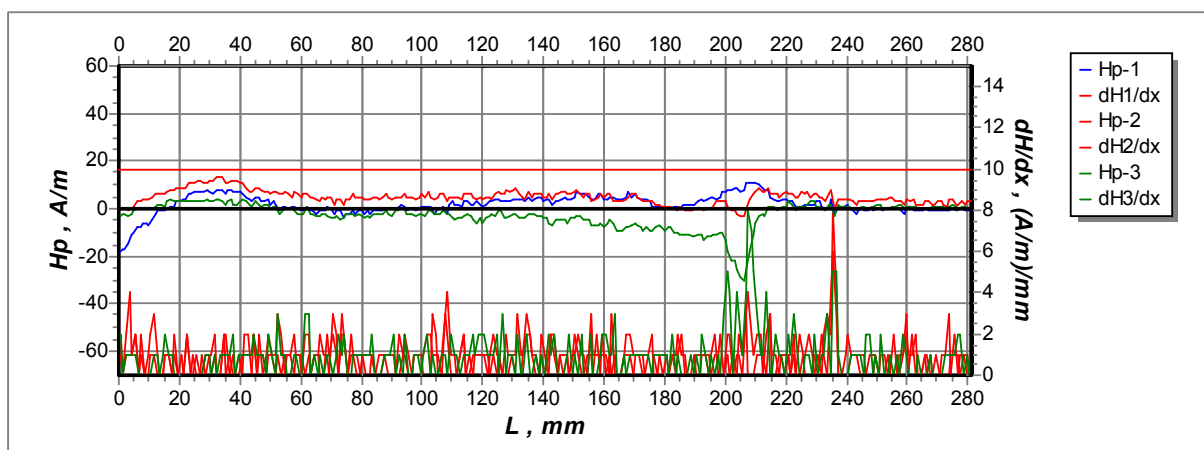
Rys.17 Próbka nr 1.



hartowana, linia 3.



odpuszczana, linia 3



wodorowana, linia 3

Rys. 18. Próbkę nr 3.

Wnioski

Próbki normalizowane

Badaniom poddano próbki nr 4 i 6. Skanowanie próbek rozrysowanych na arkuszu blachy wskazuje na ich mały stopień namagnesowania, wartości H_P nie przekraczają 20A/m. Po ich wycięciu obserwuje się wzrost namagnesowania do ok. 40÷50A/m. Wartości $d H_P/dx$ nie przekraczają 6(A/m)/mm. Wyniki badań ww. próbek po ich normalizacji wskazują wyraźnie na „wygładzenie” przebiegów $H_P(x)$ i nieznaczne zmniejszenie ich namagnesowania. Wyniki pomiarów są porównywalne dla obu próbek. Skanowanie wzdłuż krawędzi próbek (linie: 1 i 2) wskazuje na różnicę mierzonych wartości dla czujników skrajnych, przemieszczających się najbliżej krawędzi cięcia.

Próbki hartowane, nisko odpuszczane i wodorowane

Badaniom poddano próbki nr 1 i 3. Ich badanie po rozrysowaniu na arkuszu blachy i po wycięciu są analogiczne jak dla próbek przeznaczonych do rozciągania i normalizowania. Wyniki pomiarów próbki nr 1, hartowanej od połowy, wskazują na różnicę wartości H_P dla tej próbki poczynając od ok. 80mm. Dla obu próbek obserwuje się znaczny gradient zmian wartości H_P wzdłuż szerokości próbek (różne wartości H_P zmierzone przez poszczególne czujniki). Próbki po odpuszczeniu charakteryzują się znacznym wygładzeniem przebiegów H_P , zmniejszeniem gradientu jego zmian wzdłuż szerokości próbki i znacznym zmniejszeniem ich namagnesowania. Inne od pozostałych wskazania czujnika przemieszczającego się najbliżej krawędzi cięcia, wskazuje na różnice w procesie odpuszczania próbek w tym obszarze. Wodorowanie próbek nie wniosło istotnych zmian w przebiegu wartości H_P po odpuszczaniu.

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.