

Dr hab. inż. Zbigniew ZIMNIAK, mgr inż. Sebastian HANKIEWICZ  
Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, Wrocław

# Badania magnetyczne procesów tłoczenia blach

## *Magnetic measurements of sheet metal forming processes*

### **Streszczenie**

W materiałach ferromagnetycznych występuje zjawisko odwrotnej magnetostrykcji zwane inaczej efektem Villariiego. Bazując na tym efekcie zaprezentowano metodę wyznaczania utraty stateczności materiału blachy. Zastosowano sensor pola magnetycznego do analizy momentu powstawania zlokalizowanej utraty stateczności dla procesów tłoczenia blach. Praca pokazuje szerokie eksperymentalne zastosowanie magnetorezystora jako sensora do określania różnych zjawisk, występujących w operacjach tłoczenia blachy.

### **Abstract**

*For ferromagnetic materials the inverse magnetostriction effect is commonly known as Villari effect. Based on this effect, the method of determination localized necking is presented. Sensor of magnetic field was used in the analysis of moment localized necking for deep drawing. This work demonstrated the wide experimental possibilities of the magnetoresistor sensor as a tool for investigation of different mechanical properties for stamping operations.*

**Słowa kluczowe:** tłoczenie blach, badania magnetyczne, utrata stateczności blachy

**Key words:** deep drawing, magnetic research, sheet stability loss

## **1. WSTĘP**

Tłoczenie blach jest metodą wytwarzania wyrobów typu powłokowego, której znaczenie przemysłowe jest bardzo duże. Obecnie wzrastają wymagania dotyczące złożoności kształtów wyrobów, zawężonych tolerancji wykonania oraz dużej trwałości narzędzi do tłoczenia. Prowadzi to niekiedy do przeprowadzenia wielu zmian w konstrukcji narzędzi prowadzących w efekcie do uzyskania wyrobu bez wad. W procesach tłoczenia wielkość odkształcenia, jakiego może doznać blacha jest ograniczona. Wymuszenie dużych odkształceń plastycznych dla cienkościennych materiałów powoduje niebezpieczeństwo powstawania bruzd na skutek utraty stateczności materiału, pękanie materiału lub jego fałdowanie.

W artykule opisano nowy sposób określania momentu utraty stateczności blachy, oparty na badaniach własności magnetycznych blachy. We wcześniejszych badaniach tego zjawiska analizowano tylko występowanie momentu

utraty stateczności dla próby jednoosiowego rozciągania [1]. W ramach wykonanej pracy, moment utraty stateczności wyznaczany był dla złożonych stanów odkształcenia takich, jakie występują w przemysłowych procesach głębokiego tłoczenia blach. W badaniach wykorzystany został efekt magnetomechaniczny (efekt Villariiego) [2-3] występujący podczas odkształcania blachy. Mierząc precyzyjnie wektor natężenia pola magnetycznego, można wyznaczyć bardzo dokładnie moment utraty stateczności blachy. Przeprowadzono pomiary bardzo małych pól magnetycznych (porównywalnych z ziemskim) występujących w czasie procesu tłoczenia wokół wytłoczki wykonanej z materiału ferromagnetycznego.

## 2. MAGNETYCZNE METODY OCENY WŁASNOŚCI MATERIAŁÓW I STANU ICH OBCIĄŻENIA

Przez metody magnetyczne rozumie się te wszystkie sposoby i metody badań, w których w celu zbadania obiektu wykrywa się lub mierzy pole magnetyczne albo jego oddziaływanie magnetyczne. Fundamentem metod magnetycznych są zjawiska Villariego [4] i Barkhausena, ale różni je rodzaj stosowanych sensorów i sposób ich interpretacji. Metody magnetyczne należą do grupy badań nieniszczących (NDE) [5] i nie wymagają szczególnych zabiegów związanych z przygotowaniem kontrolowanego materiału do testów. Za pomocą metod magnetycznych można zweryfikować zachowanie się elementów w czasie pracy. Stąd metody magnetyczne stosuje się najczęściej w zastosowaniach przemysłowych do szybkich pomiarów jakościowych.

Metody NDE [6] znajdują zastosowanie w badaniach właściwości materiałów tj. określania wielkości ziarna, wielkości naprężeń wewnętrznych, przewodności cieplnej, twardości oraz wykrywania różnorodnych defektów w elementach wykonanych z materiałów magnetycznych. Do najczęściej stosowanych magnetycznych metod wykorzystywanych w badaniach materiałów zaliczymy:

- metodę szumów Barkhausena (MBE) [7-8],
- magneto-akustyczną emisję (MAE),
- metodę opartą na analizie magnetycznej krzywej histerezy,
- metodę wykorzystującą efekt Villariego.

## 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Celem badań doświadczalnych było określenia momentu utraty stateczności dla procesów głębokiego tłoczenia blach. W badaniach doświadczalnych zastosowano metodę realizacji złożonych stanów odkształcenia, która powszechnie stosowana jest do wyznaczania wykresów odkształceń granicznych (WOG) [9-11]. Próbkę do tłoczenia posiadały boczne kołowe wycięcia, a stempel zakończony był płaskim dnem. Wykorzystano sposób odkształcania blachy opracowany przez Z. Marciniaka [12], polegający na jednoczesnym tłoczeniu krążka z blachy wraz z pierścieniową podkład-

ką, utwierdzoną na obrzeżu. Zastosowany przyrząd do tłoczenia widoczny jest na rys. 1.



Rys. 1. Maszyna MTS 810 oraz zastosowany przyrząd do tłoczenia

*Fig. 1. MTS 810 machine and implemented device to sheet forming*

Dzięki zastosowaniu podkładki wyeliminowane zostało niekorzystne oddziaływanie tarcia blachy o czołową powierzchnię stempla, co umożliwiło ukierunkowanie pęknięć na środkowe obszary dna wytłoczki. Średnicę otworu w podkładkach wykonanych z aluminium dobrano w sposób eksperymentalny.

W celu wyznaczenia odpowiedniej składowej wektora natężenia pola magnetycznego zastosowano pomiar punktowy z zastosowaniem układu pomiarowego z magnetorezystorem KMZ 51 firmy Philips. Zastosowany magnetorezystor charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami pomiarowymi, ma także możliwość redukcji pola tła (pole ziemskie i pole otaczających sensor obiektów metalowych).

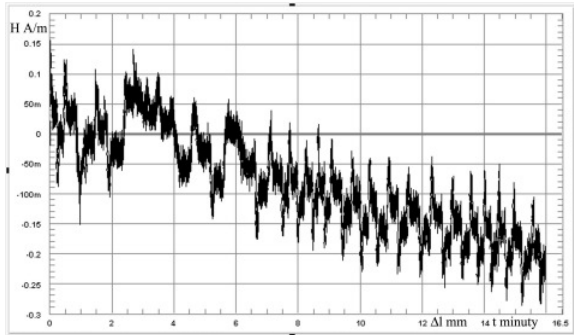
W niewielkiej odległości od próbki, umieszczono sensor pola magnetycznego w środkowej części dna stempla (rys. 2).



Rys. 2. Miejsce usytuowania magnetorezystora w dnie stempla

*Fig. 2. Place of setting the magnetoresistor at the bottom of a stamp*

Przed pomiarami określono pole magnetyczne tła i pole zakłóceń, a ich wielkość pokazano na rys. 3. Z analizy pola tła wynika, że było ono niewielkie (0.3 A/m) i nie zakłócało istotnie prowadzonych badań.



Rys. 3. Wielkość pola magnetycznego tła i pola zakłóceń

*Fig. 3. Size of the magnetic field's background and interference's field*

Podczas pomiarów rejestrowano za pomocą systemu akwizycji danych sygnały następujących wielkości: siły  $P$ , przemieszczenia  $\Delta l$  oraz natężenia pola magnetycznego  $H$ . Badania wstępne wykazały dużą zależność zmian pola magnetycznego od kierunku walcowania blachy. Z tego powodu w doświadczeniach stosowano próbki wycięte pod kątami, odpowiednio  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$  w stosunku do kierunku walcowania blachy (KW) z materiału IF o grubości 0.55 mm.

### Wyniki badań doświadczalnych

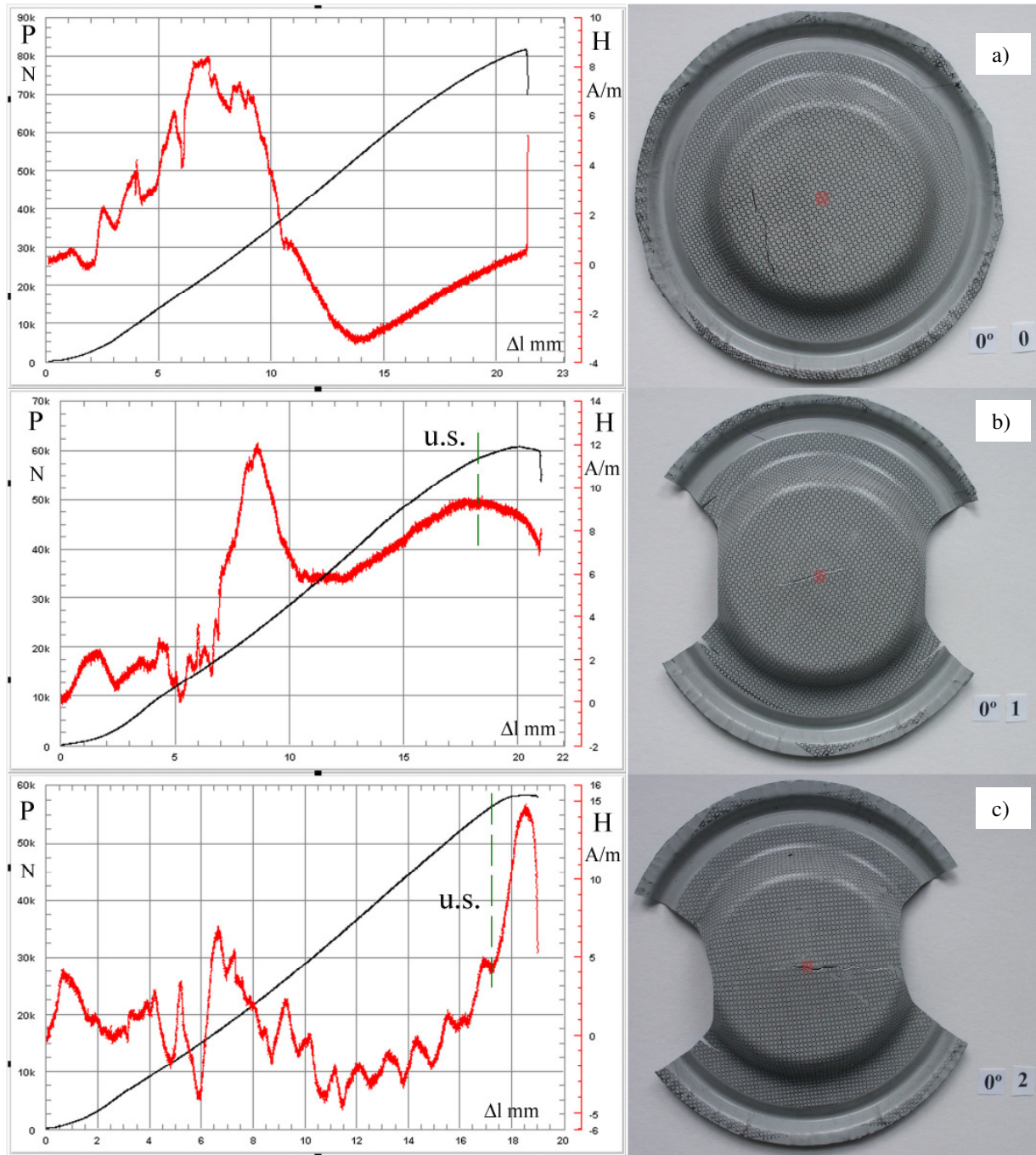
W badaniach zastosowano sześć rodzajów próbek z bocznymi kołowymi wycięciami o numeracji: od 0 - dla próbki bez wycięć do 5 - dla próbki najbardziej wyciętej. Na rysunku 4 pokazano wyniki siły i natężenie pola magnetycznego  $H$  w funkcji przemieszczenia stempla, otrzymane z próby tłoczenia (proces przerywany w chwili pęknięcia próbki).

Na podstawie przedstawionego na rys. 4a wykresu zmian natężenia pola magnetycznego dla próbki numer 0, nie można określić momentu utraty stateczności dla tej wytloczki. Sygnał magnetyczny z miejsca pęknięcia był za słaby by wychwycić to zjawisko. Wynikało to dużej odległości magnetorezystora od miejsca pęknięcia próbki.

Dla pozostałych próbek numer 1 i 2 (rys. 4b,c) wykresy natężenia pola magnetycznego uwidaczniają dokładnie moment utraty stateczności próbek. Na podstawie samego wykresu siły tłoczenia, zjawisko to jest raczej trudne do analizy. Pomiary magnetyczne mogą więc być z powodzeniem zastosowane do monitorowania procesów tłoczenia lub do wyznaczania wykresów odkształceń granicznych.

Na rysunku 5a pokazano wyniki zmian natężenia pola magnetycznego dla próbki numer 3, gdzie widać wyraźnie moment utraty stateczności. Na podstawie wykresu siły tłoczenia nie można wnioskować o wystąpieniu tego zjawiska. Dla próbki numer 4 i 5, możliwe jest również określenie momentu utraty stateczności (rys. 5b,c), lecz nie jest to już tak dobrze widoczne jak dla próbki numer 3.

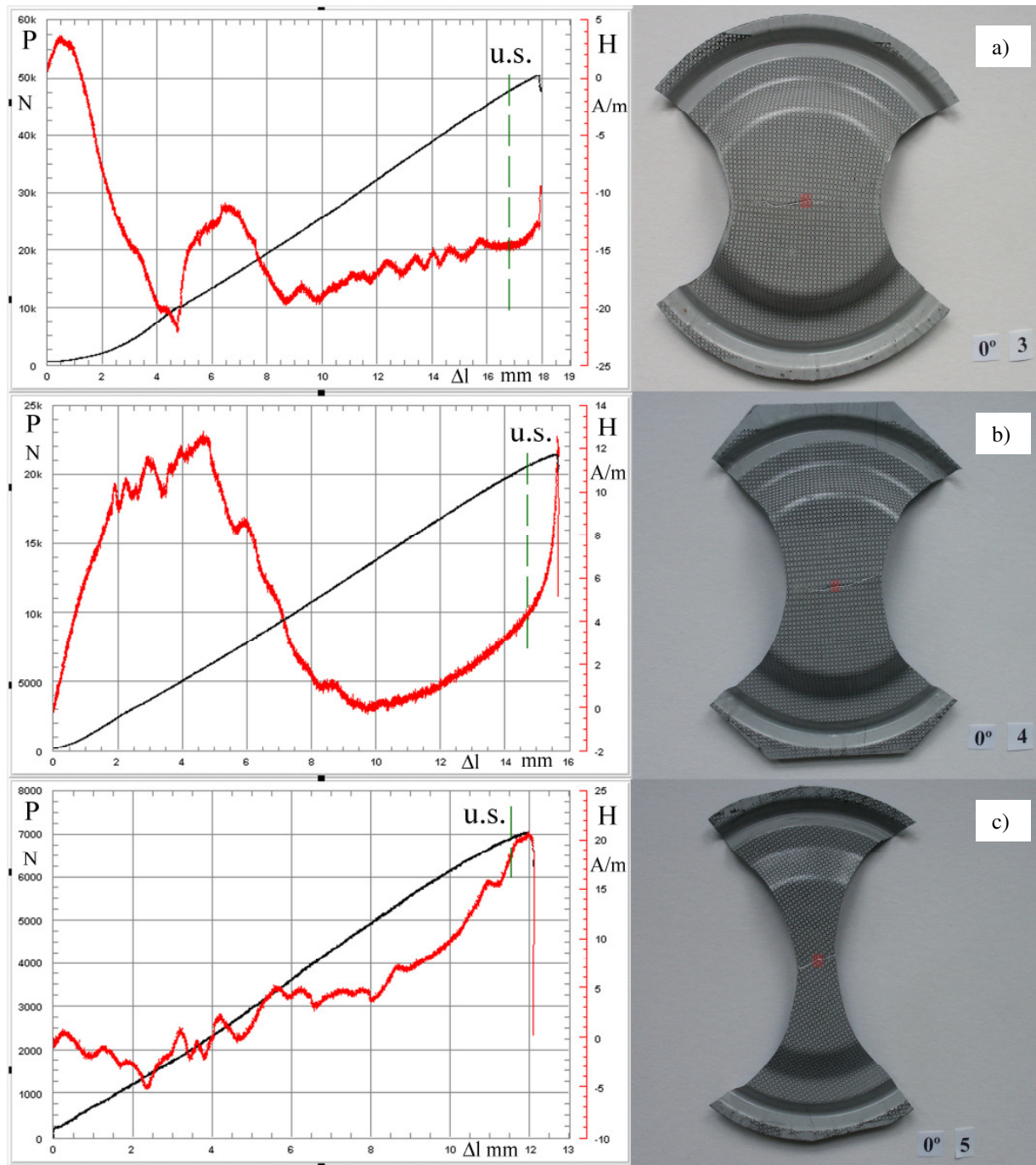
Porównując otrzymane wyniki z próbą jednoosiowego rozciągania [1], stwierdzić można, że kształty wykresów natężenia pola magnetycznego są zupełnie inne (rys. 6). W próbie rozciągania sygnał magnetyczny posiadał długi odcinek prawie prostoliniowy, kończący się zakrzywieniem odpowiadającym momentowi utraty stateczności. Dla próbek, w których występują złożone stany odkształcenia nie obserwujemy już takiego prostego odcinka, jedynie dla próbki numer 5 zależność sygnału magnetycznego jest podobna do próby jednoosiowego rozciągania. Ustabilizowanie się sygnału magnetycznego odpowiada, więc stanowi jednorodnego odkształcenia. Im bardziej pofalowany jest sygnał magnetyczny tym bardziej złożony jest stan odkształcenia próbki. Analiza sygnału magnetycznego dla złożonych stanów odkształcenia jest trudniejsza niż dla procesu jednoosiowego rozciągania. Należy, więc szukać metody prostej interpretacji wyników, jednoznacznie określającej moment utraty stateczności wytloczek.



Rys. 4. Wyniki pomiarów siły  $P$  i natężenia pola magnetycznego  $H$  w funkcji przemieszczenia stempla  $\Delta l$  oraz widoczne miejsca pęknięcia poszczególnych wytlóczek (numer 0, 1 i 2) dla  $0^\circ$  KW

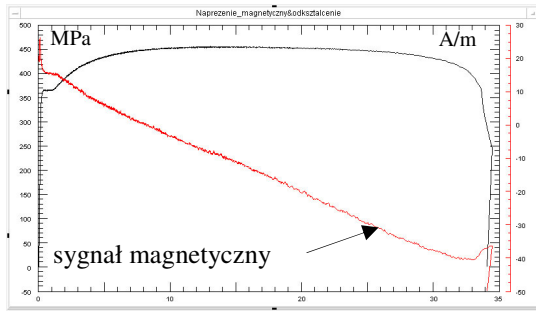
Fig. 4. Result's of force  $P$  and magnetic field strength  $H$  versus displacement of the stamp  $\Delta l$  and visible places of cracking individual drawpiece (number 0, 1 and 2) for  $0^\circ$  RD





Rys. 5. Wyniki pomiarów siły  $P$  i natężenia pola magnetycznego  $H$  w funkcji przemieszczenia stempla  $\Delta l$  oraz widoczne miejsca pęknięcia poszczególnych wytlóczek (numer 3, 4 i 5) dla  $0^\circ$  KW

Fig. 5. Result's of force  $P$  and magnetic field strength  $H$  versus displacement of the stamp  $\Delta l$  and visible places  $\Delta l$  of cracking individual drawpiece (number 3, 4 and 5) for  $0^\circ$  RD



Rys. 6. Zależność naprężenia i natężenia pola magnetycznego od wartości odkształcenia

Fig. 6. Volume and strength of the magnetic field versus deformation value

Jedną z możliwych takich metod jest analiza wyników zmian natężenia pola magnetycznego prowadzona za pomocą przyrostów tej wielkości. Biorąc pod uwagę określone przyrosty  $\Delta H$ , wybrane ze wszystkich otrzymanych wyników pomiarów, można lepiej interpretować zjawiska zachodzące w tłoczzonej próbce. Przyrosty te zapisujemy w postaci:

$$\Delta H = H(n) - H(n-k) \quad (1)$$

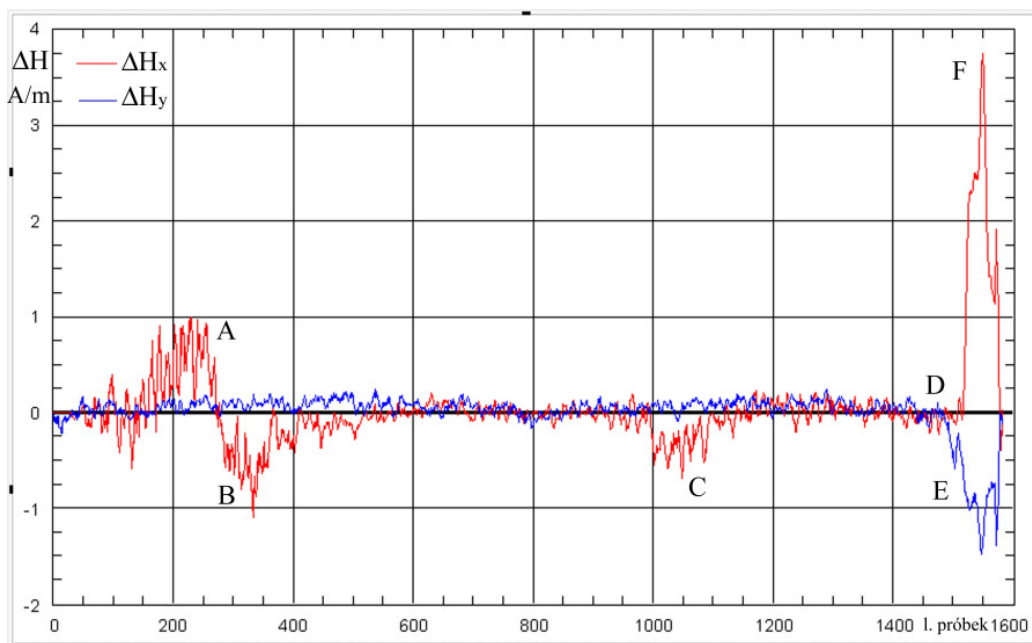
gdzie:  $n$  jest numerem kolejnych wyników pomiaru pola magnetycznego  $H_x$  lub  $H_y$ ,  $k$  jest liczbą dobraną eksperymentalnie w zależności od kształtu zależności  $H$  (np.  $k = 5$ ).

Za pomocą przedstawionej powyżej analizy wyników, wyróżnić możemy charakterystyczne zmiany przyrostów  $\Delta H$ , odpowiadające określonym zachowaniom materiału wytłoczki w trakcie procesu tłoczenia.

Rysunek 7 przedstawia analizę przyrostów  $\Delta H$  w funkcji czasu, przeprowadzoną dla próbki numer 5. Punkty A i B na tym wykresie odpowiadają fazie gięcia wytłoczki, następnie następuje faza ciągnięcia materiału wytłoczki. Punkt C odpowiada lokalnej utracie stateczności w postaci bruzdy, leżącej poza późniejszym miejscem pęknięcia wytłoczki.

Punkty D i E, są początkiem utraty stateczności w miejscu pęknięcia wytłoczki. Moment pęknięcia wytłoczki widoczny jest w punkcie F wykresu zmian  $\Delta H$ .

Proponowana powyżej metoda analizy z wykorzystaniem przyrostów natężenia pola magnetycznego  $\Delta H$ , może być wykorzystana do automatycznego diagnozowania produkcyjnych procesów tłoczenia blach.



Rys. 7. Analiza wyników tłoczenia za pomocą metody określania przyrostów  $\Delta H_x$  i  $\Delta H_y$

Fig. 7. Expression result's analysis by the method of defining increases  $\Delta H_x$  i  $\Delta H_y$

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszym artykule przedstawiono nowy sposób określania momentu utraty stateczności blachy, oparty na badaniach własności magnetycznych blachy w trakcie procesu tłoczenia. Moment utraty stateczności wyznaczony był doświadczalnie dla złożonych stanów odkształcenia z wykorzystaniem próbek z bocznymi wycięciami.

Zastosowanie bardzo czułej aparatury badawczej, mierzącej składowe natężenia pola magnetycznego  $H$ , pozwoliło na określenie momentu utraty stateczności blachy w formie bruzdy.

Przeprowadzone badania pozwalają na następujące stwierdzenia:

- bardzo ważne okazało się położenie magnetorezystora, zbytnie jego oddalenie od miejsca pęknięcia wytłoczki uniemożliwia obserwację momentu utraty stateczności,
- dla niektórych stanów odkształcenia trudne jest określenie miejsca utraty stateczności i potrzebne są specjalne metody analizy wyników pomiarowych,
- proponowana metoda analizy wyników doświadczalnych, pozwala wyróżnić charakterystyczne zmiany przyrostów  $\Delta H$ , odpowiadające określonym zachowaniom materiału wytłoczki w trakcie procesu tłoczenia,
- opisana w artykule metoda określania zjawisk występujących w trakcie tłoczenia, wykorzystująca efekt Villariego, może być zastosowana do monitorowania w trybie „real time” przemysłowych procesów głębokiego tłoczenia blach.

Następnym etapem badań może być określenie przydatności metody wyznaczania momentu utraty stateczności blachy do badań blach z innych gatunków stali wielofazowych typu BH, DP i TRIP przewidzianych do stosowania w budowie karoserii samochodowych.

Innym istotnym zagadnieniem jest również optymalizacja i sposób umiejscowienia czujników magnetycznych na powierzchni materiału wyjściowego wytłoczek karoseryjnych o złożonym kształcie.

#### LITERATURA

- [1] *Zimniak Z.*: Nowa metoda wyznaczania utraty stateczności blachy oraz naprężeń szczątkowych, Mat. Konf. Forming 2002, Luhacowice, 333-338.
- [2] *Kaleta. J., Żebracki J.*: Application of the Villari effect in a fatigue examination of nickel, Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 19, 1996, 1435-1443.
- [3] *Planschutz W.*: Inverse magnetostrictive effect and electromagnetic nondestructive testing methods, 19, NDT Intern. , 1986, 249-258.
- [4] *Davis F. H., Plumbridge W. J.*: Magnetostriction effect in crack length measurements, Fatigue Fracture and Engng. Mater. Struct., 11, 1988, 241-245.
- [5] *Sablik M.J.*: Modelling stress dependence of magnetic properties for NDE of steels. Nondestr. Test. Eval, 5, 1989, 49-65.
- [6] *Jiles D.C.*: Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman & Hall, 1999.
- [7] *Rautioah R., Karjalainen P., Moilanen M.*: Stressresponse of Barkhausen Noise in a tempered C-Mn steel., J. of Magnetism and Magnetic Materials, 68, 1987, 314-320.
- [8] *Schroder K.*: Magnetic Barkhausen effect and its application. Nondestr. Test. Eval. Iss., 1, 1989, 3-8.
- [9] *Gronostajski J., Zimniak Z.*: Prediction of forming limit diagrams with experimentally determined heterogeneity of anisotropic sheets, J. of Mat. Proc. Techn., 32, 1992, 263-270.
- [10] *Gronostajski J., Zimniak Z.*: The effect of changing of heterogeneity with strain on the forming limit diagram, J. of Mat. Proc. Techn., 34, 1992, 457-464.
- [11] *Gronostajski J., Zimniak Z.*: A few methods of analytical calculation of forming-limit curves, J. of Mat. Proc. Techn., 55, 1996, 213-217.
- [12] *Marcinak Z., Kuczyński K.*: Limit strains in the processes of stretch – forming sheet metal, Int. J. Mech. Sc. 9, 1967, 56-64.