

Anna Arasimowicz <sup>1)</sup>, Robert Piekarski <sup>2)</sup>

## POMIAR NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH METODĄ USUWANIA WARSTW W TECHNOLOGICZNYCH WARSTWACH WIERZCHNICH

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki pomiaru naprężeń własnych w technologicznych warstwach wierzchnich (TWW) za pomocą metody usuwania warstw. Badania przeprowadzono dwoma wariantami tej metody: usuwanie warstwy wierzchniej zrealizowane zostało poprzez roztrzaskanie elektrochemiczne oraz pomiar grubości usuniętej warstwy i zmian strzałki ugięcia; w drugim przypadku warstwa wierzchnia została usunięta mechanicznie docieraniem, a naprężenia własne określone na podstawie pomiarów grubości usuniętej warstwy wierzchniej i zmiany strzałki ugięcia próbki.

**Słowa kluczowe:** naprężenia własne, warstwa wierzchnia, docierania, usuwanie WW.

Z inżynierskiego punktu widzenia, jednym z najważniejszych parametrów wytwarzanego detalu jest stan warstwy wierzchniej (WW). Odpowiada on za długość i jakość jego pracy oraz współpracę z innymi elementami. W opisie warstwy wierzchniej (WW) istotnym parametrem, oprócz jej stanu struktury oraz rozkładu mikrotwardości, jest stan naprężeń własnych pozostałych po obróbkach wykańczających.

W wyniku działania zewnętrznych czynników mechanicznych, cieplnych, chemicznych oraz przemian strukturalnych zachodzą w materiale odwracalne i nieodwracalne zmiany powodujące odpowiednio odkształcenia sprężyste i plastyczne. W konsekwencji ich wystąpienia powstają naprężenia własne (NW), które, po usunięciu obciążeń zewnętrznych, równoważą się wzajemnie wewnątrz pewnego obszaru WW. Są one funkcją obciążeń zewnętrznych, struktury wewnętrznej materiału obrabianego, rodzaju obróbki i kształtu elementu obrabianego, przemian fazowych wywołanych obróbką oraz oddziaływania nieobrobionego rdzenia na WW [1].

W celu odróżnienia zasięgu oddziaływań NW, dzieli się je na trzy rodzaje (patrz rys. 1), tj.:

– naprężenia I-go rodzaju ( $\sigma'$  – makronaprężenia), występujące w całym kontynuum badanego przedmiotu. Ich powstawanie wywołane jest makro-wpływem wielu czynników zewnętrznych, takich jak: zróżnicowanie struktury wewnętrznej wywołane obróbką oraz nierównomierne stygnięcie WW na różnych głęboko-

<sup>1)</sup> Instytut Technik Wytwarzania, Zakład Obróbek Wykańczających i Erozyjnych, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska.

<sup>2)</sup> Instytut Mechaniki i Poligrafii, Zakład Mechaniki i Technik Uzbrojenia, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska.

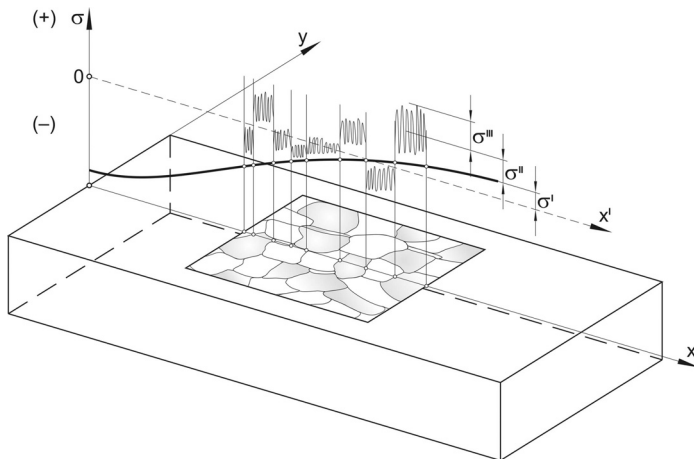
kościach. Naprężenia te w głównym stopniu wywołują zmiany gabarytów obrabianego przedmiotu oraz pęknięcia w WW,

- naprężenia II-go rodzaju ( $\sigma''$  – mikronaprężenia), występujące w obszarze kilku sąsiednich ziaren oraz ich granic, są spowodowane zmianą orientacji ziaren wobec siebie oraz różnicą objętości właściwej pomiędzy nimi,
- naprężenia III-go rodzaju ( $\sigma'''$  – subnaprężenia), działające w obszarze kilku odległości atomowych i wywołane licznymi defektami w strukturze sieci krystalicznej po obróbce (wakanse, atomy międzywęzłowe, dyslokacje, uskoki sieci i rozwarstwienia).

Ze względu na powstawanie NW dzieli się je na: NW pochodzenia mechanicznego, cieplnego i strukturalnego.

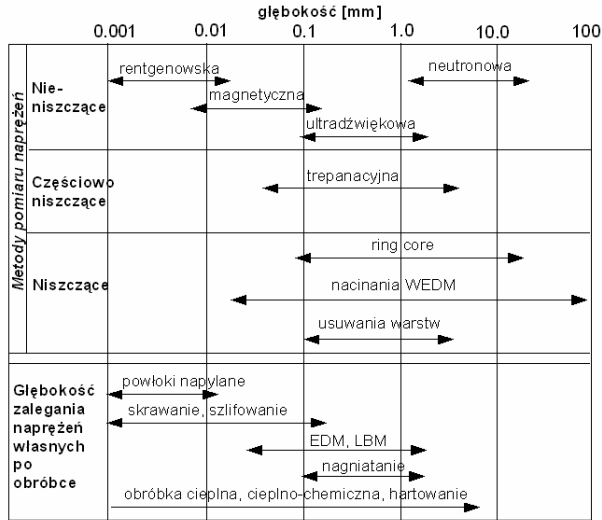
Wielkość NW determinuje kształt przedmiotu po obróbce, tj. jeżeli ich wielkość jest zbliżona do granicy wytrzymałości, a grubość materiału dostatecznie mała to obserwuje się odkształcenia makroskopowe całego ciała. W przypadku materiałów o znacznych rozmiarach w stosunku do wielkości WW obserwuje się zmiany kształtu tylko na powierzchni. Po przekroczeniu granicy wytrzymałości materiału następuje jego degradacja, charakteryzująca się pęknięciem/pęknięciami WW oraz znaczną zmianą struktury wewnętrznej warstw przypowierzchniowych [2, 3].

Istotną cechą NW występujących w WW jest określenie ich znaku, tj. czy mają charakter rozciągający (+), czy ściskający (–), przy czym opisuje się je jako naprężenia normalne, bądź styczne. W niniejszej pracy autorzy koncentrują się na pomiarze jednoosiowych naprężeń normalnych I-go rodzaju przy zastosowaniu dwóch metod trepanacyjnych polegających na ciągłym, „papierosowym” sposobie usuwania cienkich warstw przypowierzchniowych (rys. 1).



**Rys. 1.** Poziom i wielkość naprężeń własnych ( $\sigma'$ ,  $\sigma''$ ,  $\sigma'''$ ) 1-go, 2-go i 3-go rodzaju  
**Fig. 1.** The level and size of residual stresses ( $\sigma'$ ,  $\sigma''$ ,  $\sigma'''$ ) of 1-st, 2-nd and 3-rd order

Aby określić naprężenia własne, pozostałe po procesie wytwarzania, opracowano wiele metod badawczych – nieniszczących, takich jak metoda dyfrakcji rentgenowskiej, ultradźwiękowa, prądów wirowych itp., jak i niszczących, m.in. metoda ring-core, metody usuwania warstw, metoda Oppela i inne (rys. 2).

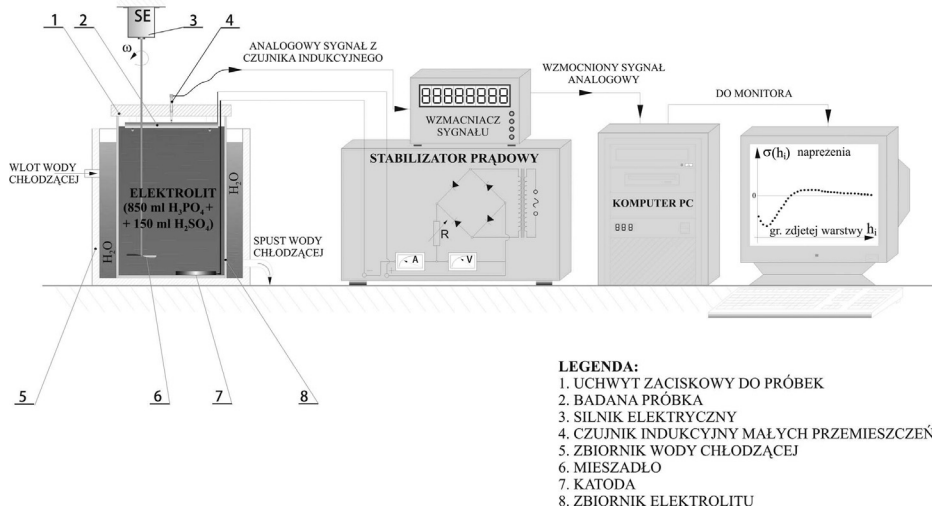


Rys. 2. Zakres występowania naprężeń własnych w WW oraz stosowane metody ich pomiaru

Fig. 2. The range of residual stresses distribution in surface layer and methods of its measurement

Sprawdzoną metodą wyznaczania rozkładu naprężeń własnych, służącą również do wzorcowania nieniszczących metod porównawczych, jest metoda usuwania warstw (MUW) –Waismana-Phillipsa [1, 4]. Polega ona na pomiarze strzałki ugięcia trawionej próbki płaskiej o przekroju prostokątnym, leżącej swobodnie na dwóch podporach. Proces trawienia polega najczęściej na chemicznym, bądź elektrochemicznym usuwaniu materiału próbki. Ten drugi proces, wykorzystywany w opisanych poniżej badaniach, jest krótkotrwały i pozwala na szybkie trawienie próbki. Niestety, podczas usuwania WW generowane są niekorzystne efekty związane z pasywacją warstwy usuwanej, nagłą zmianą strzałki ugięcia tuż po załączeniu napięcia zasilania oraz grzaniem się próbki i elektrolitu, itp. Te wszystkie zjawiska, choć zakłócają pomiar naprężeń, są w odpowiedni sposób zredukowane i ostatecznie nie wpływają znacząco na końcowe wyniki badań. Należy dodać, że MUW jest metodą dającą powtarzalne wyniki pomiaru NW i precyzyjnie określa ich rozkład oraz znak w funkcji usuwanej warstwy. Omawiana metoda jest metodą niszczącą, pracochłonną, energochłonną, czasochłonną i środkochłonną. Pozwala tylko na pomiar naprężeń normalnych 1-go rodzaju, a ich rozkłady mierzy się maksymalnie do kilku milimetrów w głąb WW. Proces elek-

trochemicznego usuwania warstwy może powodować nierównomierne trawienie WW, co prowadzi do zaburzenia wyników badań (unikana się tego przez zastosowanie szeregu sposobów korekcyjnych, co do zasilania prądowego, chłodzenia elektrolitu oraz sposobu zamocowania próbki podczas usuwania WW). Metoda ta nie pozwala na trawienie dowolnych kształtów próbek (stosuje się najczęściej cienkie próbki o przekroju prostokątnym, stałym na ich długości) (rys. 3).

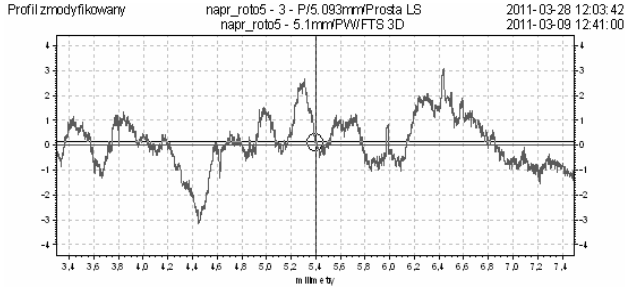


**Rys. 3.** Schemat ideowy stanowiska do pomiaru naprężeń własnych na cienkich próbkach o przekroju prostokątnym, obrabianych elektrochemicznie

**Fig. 3.** The diagram of residual stress measuring in thin specimens with rectangular cross-section, treated with electrochemical etching method

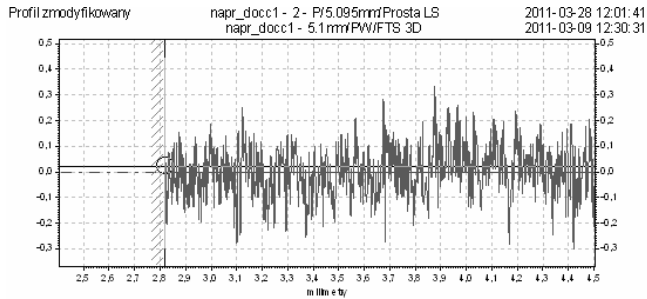
Mierzone NW mają charakter wypadkowych, zebranych z powierzchni usuwanej, co pozwala także na uśrednianie wyników z powierzchni mocno zdefektowanych po intensywnych obróbkach. Należy dodać, że MUW uwzględnia w opisie naprężenia pochodzące od warstw wcześniej usuniętych. Ponadto, poprawnie prowadzony proces elektrochemicznego usuwania warstw jest quasi-stacjonarny i przewidywalny, co pozwala szacować wyniki NW praktycznie od samego początku powierzchni zewnętrznej próbki. Trawiona WW usuwana jest w sposób „papierosowy”, co daje równomierny ubytek materiału grubości próbki [5, 6].

W dalszej pracy autorów, klasyczna metoda usuwania warstw posłużyła jako sprawdzająca nową metodę pomiarową naprężeń własnych, opracowywaną w Zakładzie Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Politechniki Warszawskiej, w której do usuwania WW zastosowano docieranie (MUWD). Z założenia ma ona służyć do pomiaru NW w warstwach wierzchnich o dużej niejednorodności składu i struktury oraz znacznej chropowatości, powstających m. in. po takich obróbkach jak stopowanie elektroiskrowe, EDM, LBM.

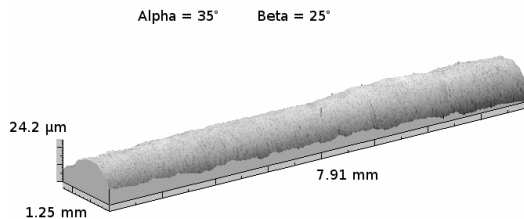


**Rys. 4.** Profilogram chropowatości po roztworzeniu elektrochemicznym  
**Fig. 4.** The surface roughness profile after electrochemical etching

Poniżej przedstawiono profilogramy chropowatości po roztworzeniu elektrochemicznym i po docieraniu, wykonane na profilometrze skaningowym Taylor Hobson. Docieranie pozwala uzyskać większą gładkość i płaskość powierzchni. Chropowatość Ra po docieraniu wynosi  $0,0728\mu\text{m}$ , gdy po trawieniu jest to ok.  $0,8238\mu\text{m}$  (rys. 4, 5). Natomiast błędy kształtu w kierunku prostopadłym do osi próbki są rzędu  $10\mu\text{m}$  po trawieniu i  $1\mu\text{m}$  po docieraniu (rys. 6, 7). Ponadto obróbka docieraniem pozwala uniknąć podtrawiania powierzchni bocznej próbki, co ma znaczenie szczególnie przy badaniach wykonywanych na cienkich próbkach, o grubości poniżej  $1,5\text{mm}$ .

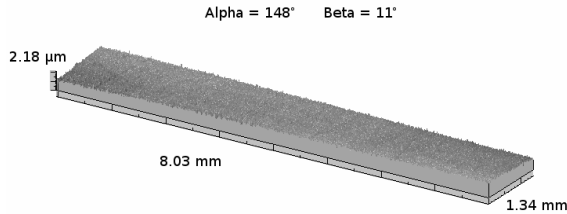


**Rys. 5.** Profilogram chropowatości po docieraniu  
**Fig. 5.** The surface roughness profile after lapping



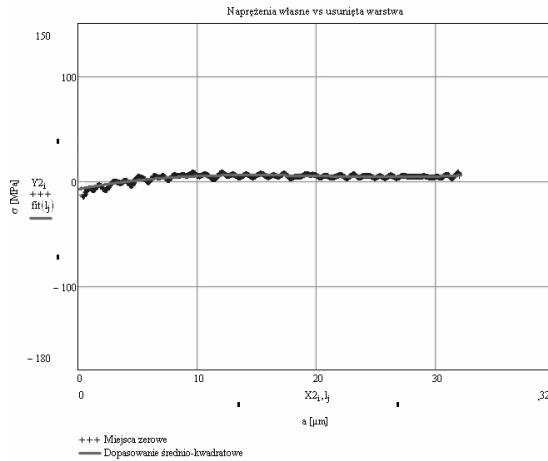
**Rys. 6.** Obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrochemicznej  
**Fig. 6.** Surface after electrochemical etching – 3D view

Metoda usuwania warstw MUWD jest metodą niszczącą, polegającą na delikatnym, mechanicznym usuwaniu WW za pomocą tarczy docierającej, o specjalnej konstrukcji, w której diamentowe ziarno ściernie jest związane żywicą w postaci wysepek.



**Rys. 7.** Obraz stereometryczny powierzchni po obróbce docieraniem  
**Fig. 7.** Surface after lapping – 3D view

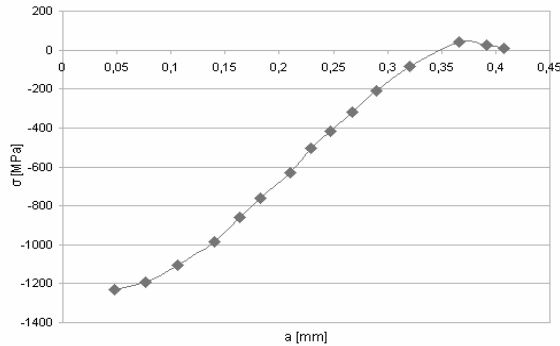
Naprężenia własne wywołane usuwaniem warstwy przy użyciu tych tarcz są nieznaczne, gdyż metoda MUWD praktycznie ich nie generuje i nie wpływają one na końcowy wynik pomiarów. Rys. 8 przedstawia rozkład NW wyznaczonych MUW w próbce nienapreżonej, która została poddana procesowi docierania na tarczy ze spojonym ziarnem diamentowym o średniej wielkości 25μm [7]. Maksymalna ich wartość wynosi ok. 7MPa, a głębokość zalegania nie przekracza 4μm.



**Rys. 8.** Rozkład naprężeń własnych w próbce po docieraniu  
**Fig. 8.** Residual stress distribution in the specimen after lapping

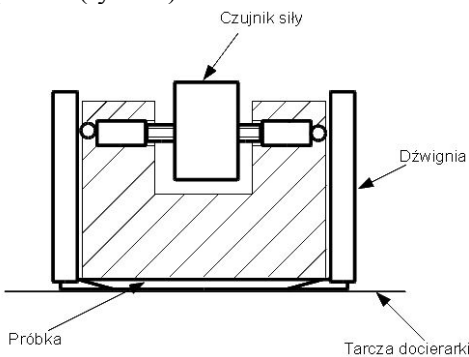
Podczas wstępnych badań nad MUWD, badana próbka była mocowana w specjalnym uchwycie, umożliwiającym wyprostowanie jej (proces docierania zachodzi na płaskich elementach), następnie usuwanie warstw odbywało się przy

użyciu luźnego ziarna ściernego, podawanego na żeliwny docierak [8]. Po usunięciu warstwy materiału, rzędu kilkunastu  $\mu\text{m}$ , próbka była odmocowywana w celu zmierzenia strzałki ugięcia i grubości usuniętej warstwy. Ten cykl był powtarzany do momentu usunięcia całej WW zawierającej naprężenia własne, a co za tym idzie, wyprostowania się próbki. Na podstawie danych pomiarowych, korzystając z tych samych wzorów jak w przypadku MUW, wyznaczano rozkład naprężeń własnych w WW. Poniżej zamieszczono rozkład naprężeń własnych w próbce Almena po obróbce zgniotem powierzchniowym roto peen (rys. 9). Głębokość zalegania NW oraz ich rozkład ma charakter typowy dla tej obróbki, występujący w próbkach Almena [9].



**Rys. 9.** Rozkład naprężeń własnych w próbce po obróbce roto peen, wyznaczone MUWD  
**Fig. 9.** Residual stress distribution in the specimen after roto peen

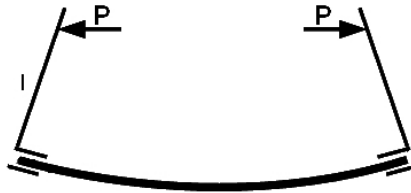
Docelowo opracowywana jest metoda pomiaru NW, w której nie będzie konieczne wyjmowanie próbki z przyrządu w celu wykonania pomiarów, a cały proces badań będzie zmechanizowany. Do tego celu skonstruowano specjalny przyrząd, zaopatrzony w czujniki siły oraz czujniki przemieszczeń liniowych do pomiaru grubości usuwanej warstwy, w którym smukła próbka jest mocowana w specjalnych gniazdach wykonanych w dźwigniach służących do wyprostowania próbki (rys. 10).



**Rys. 10.** Schemat przyrządu do docierania prostej próbki  
**Fig. 10.** The device scheme for lapping the straight sample

Napężenia własne w WW powodują wyginania się próbki. Jej końce są sztywno mocowane w dwóch dźwigniach (rys. 11), do których prostopadle do osi dźwigni przykładana jest siła  $P$ , przekazywana przez czujnik pomiarowy, wymagana do wyprostowania próbki na czas docierania (rys. 12). W trakcie obróbki ścierniej zmienia się przekrój poprzeczny próbki, a co za tym idzie, zmniejsza się siła niezbędna do utrzymania próbki w stanie wyprostowanym.

Przy użyciu czujnika przemieszczenia mierzona jest grubość usuwanej warstwy wierzchniej. Rejestracja grubości usuwanej warstwy i sił utrzymujących próbkę w stanie wyprostowanym pozwala na wyznaczenie rozkładu naprężeń własnych w technologicznych warstwach wierzchnich.



**Rys. 11.** Schemat układu dźwigni – próbka przed jej wyprostowaniem  
**Fig. 11.** The scheme of the levers – sample before straighten



**Rys. 12.** Schemat układu dźwigni – próbka po jej wyprostowaniu  
**Fig. 12.** The scheme of the levers – sample after straighten

## WNIOSKI

Docieranie daje wysokie płaskości i gładkości powierzchni, co może mieć duże znaczenie przy badaniu naprężeń własnych w WW o dużej niejednorodności oraz chropowatości wyjściowej, które się źle roztwarzają (np. po EDM, LBM, stopowaniu elektroiskrowym).

Docieranie jako obróbka stosowana do usuwania WW wprowadza do WW znikome naprężenia dodatkowe, co nie wpływa znacząco na badany stan naprężeń własnych.

Opryzrządowanie zastosowane do wyznaczania NW z zastosowaniem docierania jest stosunkowo proste, nie wymaga stosowania żrących substancji, jest przyjazna dla przeprowadzającego badania i dla środowiska.



## PIŚMIENNICTWO

1. Waisman I. L., Phillips A.: Simplified Measurement of Residual Stresses, Proc. of the Society Experimental Stress Analysis, t. XI, 1952, nr 2, str. 102.
2. Hebda M., Wachal A.: Trybologia, WNT, Warszawa 1980.
3. Birger I. A.: Ostatočné naprężeniâ, Mašgiz, Moskva 1963.
4. Piekarski R.: Zastosowanie metody prądów wirowych do pomiaru naprężeń własnych wywołanych wybranymi obróbkami powierzchniowymi, praca doktorska, OWPW, str. 106, Warszawa, 2001 r.
5. Piekarski R.: Wyznaczanie naprężeń własnych w warstwie wierzchniej elementów maszyn ze stali 42CrMo4 poddanych kulowaniu strumieniowemu, Mechanik, 2005, nr 5, s. 102-106.
6. Nowicki B., Pierzynowski R., Piekarski R., Spadło S.: Badania stanu warstwy wierzchniej spoiw ściernic diamentowych po obróbce elektrodami szczotkowymi, Prace Nauk. Inst. Bad. i Ekspertyz Nauk. w Gorzowie, XX Konf. nt. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej – WW'02, Gorzów Wlkp. – Poznań, 2002.
7. Arasimowicz A., Nowicki B.: Measurement of residual stress in surface layer of considerable non-homogeneity. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Advances In Production Engineering, Warsaw 2010, str. 204-211.
8. Arasimowicz A., Nowicki B.: Nowy sposób pomiaru naprężeń własnych metodą usuwania warstw w niejednorodnych warstwach wierzchnich, Inżynieria maszyn, R. 12, z. 2-3, Obróbka erozyjna; teoria i eksperyment, str. 5-14, Wrocław 2009.
9. Winter P. M.: The use of „3M” Brand roto peen products in conditioning metal surfaces., 3M Company St. Paul, Minnesota, October 1, 1968.

## RESIDUAL STRESS MEASUREMENT IN TECHNOLOGICAL SURFACE LAYER WITH LAYER REMOVAL METHOD

### Summary

The results of residual stress measurement in surface layer with successive layer removal method are presented in this paper. The study has been made with two variants of this method: removing the surface layer has been realized by electrochemical etching, and measuring the thickness of the layer and deflection changes; in the second case, the surface layer had been mechanically removed with lapping, and residual stress distribution has been determined on the basis of the measurement of the removed layer thickness and the deflection relating to it.

**Keywords:** residual stresses, surface layer, lapping, removing surface layer.