

Anna ARASIMOWICZ¹
Bogdan NOWICKI¹
Anna PODOLAK-LEJTAS¹

POMIAR NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH METODĄ USUWANIA WARSTW PRZEZ DOCIERANIE PO OBRÓBCE EDM I KULOWANIU STRUMIENIOWYM

W artykule została przedstawiona metodyka badań oraz wyniki pomiaru naprężeń własnych metodą usuwania warstwy wierzchniej przez docieranie spojonym ziarnem diamentowym, w próbkach obrobionych elektroerozyjnie i kulowaniu strumieniowym.

1. WPROWADZENIE

Po procesach obróbki oraz usunięciu wszelkich obciążeń zewnętrznych i oddziaływań temperaturowych, w warstwie wierzchniej pozostają ściskające bądź rozciągające naprężenia własne. Zewnętrzne oddziaływania na metal zakłócają naturalną budowę sieci krystalicznej, powodując przemiany strukturalne, będące przyczyną powstania nowego stanu naprężeń materiału. Po odciążeniu tylko część atomów powraca do swojego pierwotnego położenia, natomiast reszta pozostaje w stanach przesuniętych, powodując zmiany naprężeń własnych w materiale WW [5]. Według wytycznych CIRP, obok badań mikrostruktury, mikrotwardości i chropowatości, pomiary naprężeń własnych powinny być wykonywane zarówno w pracach badawczych, jak i do kontroli funkcjonalnie ważnych elementów maszyn, zwłaszcza pracujących w warunkach zmęczeniowych obciążeń powierzchniowych lub objętościowych. Zależność tych naprężeń od warunków ich powstawania jest przedstawiana w postaci [4]:

$$\sigma_w = f(m, t, k, o) \quad (1)$$

gdzie: $m = f(c, w, f, ch, s)$ – funkcja materiału określana przez właściwości cieplne – c , mechaniczne – w , fizyczne – f , chemiczne – ch , strukturę stereometryczną i metalograficzną materiału – s ,
 t – technologia wytwarzania warstwy wierzchniej lub powłoki,
 k – kształt i wymiary elementu podlegającego obciążeniom,

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technik Wytwarzania

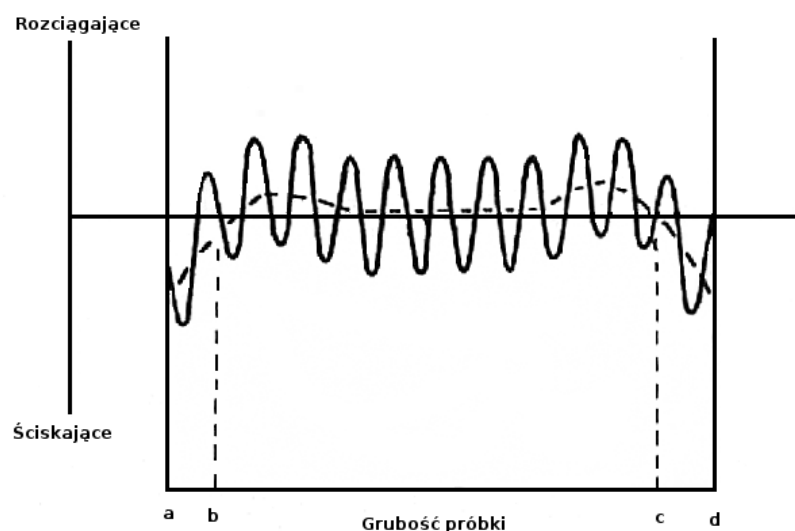
o – oddziaływanie rdzenia lub podłoża na warstwę wierzchnią lub powłokę.

Na naprężenia te wpływ mają cechy materiału i zastosowanej obróbki, czynniki zewnętrzne itp.

Naprężenia własne powstają podczas większości operacji technologicznych, a ich wartość i rozkład w głąb materiału znacząco wpływają na wytrzymałość zmęczeniową, zużycie itp. W zależności od tego, czy występują naprężenia rozciągające czy ściskające, mogą one zwiększać lub zmniejszać wytrzymałość zmęczeniową.

W przypadku zastosowania obróbek powierzchniowych zgniotem, np. kulowania, w warstwie wierzchniej powstają naprężenia ściskające, które w istotny sposób wpływają na poprawę wytrzymałości zmęczeniowej, twardości i odporności na zużycie ściernie oraz przeciwdziałają powstawaniu i propagacji mikropęknięć. Z kolei obróbki elektroerozyjne powodują generowanie w WW naprężeń rozciągających, które są wynikiem głównie oddziaływań cieplnych i zmian strukturalnych, znacząco obniżają wytrzymałość zmęczeniową i mogą przyczyniać się do korozji międzykrystalicznej [3],[7].

Według klasyfikacji N. N. Davidenkova wyróżnia się naprężenia własne I, II i III rodzaju, w zależności od rozpatrywanej skali. Naprężenia I i II rodzaju, tzw. mikronaprężenia (wg. klas. E. Orowana), mają zasięg w obrębie kilku cząstek materiału lub pojedynczych warstw sieci krystalicznej. Natomiast naprężenia III rodzaju tzw. makronaprężenia, są wartością średnią w całej objętości rozpatrywanej warstwy wierzchniej. Na rys. 1 przedstawiono przykładowy rozkład naprężeń WW w próbce poddanej obróbce powierzchniowej zgniotem.



Rys.1. Przewidywany rozkład naprężeń własnych w próbce po obróbce zgniotem powierzchniowym [6]

Fig. 1. The expected distribution of residual stress in specimen after plastic deformation [6]

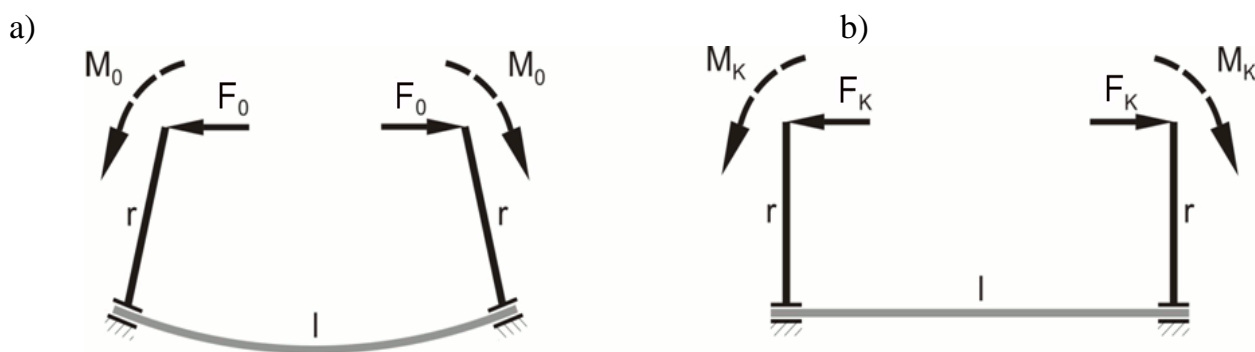
Pod wpływem niejednorodnych odkształceń plastycznych materiału, występujących w nim wtrąceń, blokowania ziaren i kumulacji dyslokacji, powstają mikronaprężenia, na wykresie widoczne, jako oscylacje. Linia przerywaną przedstawiono makronaprężenia (ściskające pomiędzy punktami *a* i *b* oraz *c* i *d*, rozciągające pomiędzy *b* i *c*), będące

wypadkową naprężeń w znacznej objętości próbki. Jednakże suma naprężeń w próbce jest równa zeru.

Podobny rozkład naprężeń może być generowany również przez inne obróbki powierzchniowe lub podczas nanoszenia powłok; różnice efektów obróbki manifestują się w znaku, wartościach i głębokościach zalegania makro- i mikronaprężeń [6].

2. METODA BADAWCZA

Dozór techniczny wykorzystuje głównie nieniszczące metody kontrolowania naprężeń własnych, oparte o właściwości magnetyczne lub elektryczne materiałów. Jednakże są one wrażliwe na niejednorodności badanej struktury, wtrącenia itp. oraz nie umożliwiają badania naprężeń w funkcji głębokości. W warunkach laboratoryjnych popularna jest metoda dyfrakcji rentgenowskiej. Jednakże za jej pomocą mierzone są mikronaprężenia, które lokalnie mogą znacznie różnić się od makronaprężeń (rys. 1). Wyznaczanie rozkładu makronaprężeń własnych w funkcji głębokości ich występowania w materiale umożliwiają metody relaksacyjne, opierające się o zaburzenie wewnętrznej równowagi sił, poprzez częściowe usuwanie naprężonego materiału, prowadzące do odkształcania się badanej próbki. Jedną z najdokładniejszych metod tego typu jest metoda usuwania warstw (Phillipsa Waismana), w której materiał warstwy wierzchniej usuwany jest roztwarzaniem elektrochemicznym. Proces ten jest szkodliwy z punktu widzenia BHP i powoduje kopiowanie chropowatości powierzchni próbki i wad materiałowych w głąb badanej próbki, przez co usuwanie materiału zachodzi nierównomiernie i może prowadzić to do błędów w obliczeniach rozkładów naprężeń w WW.

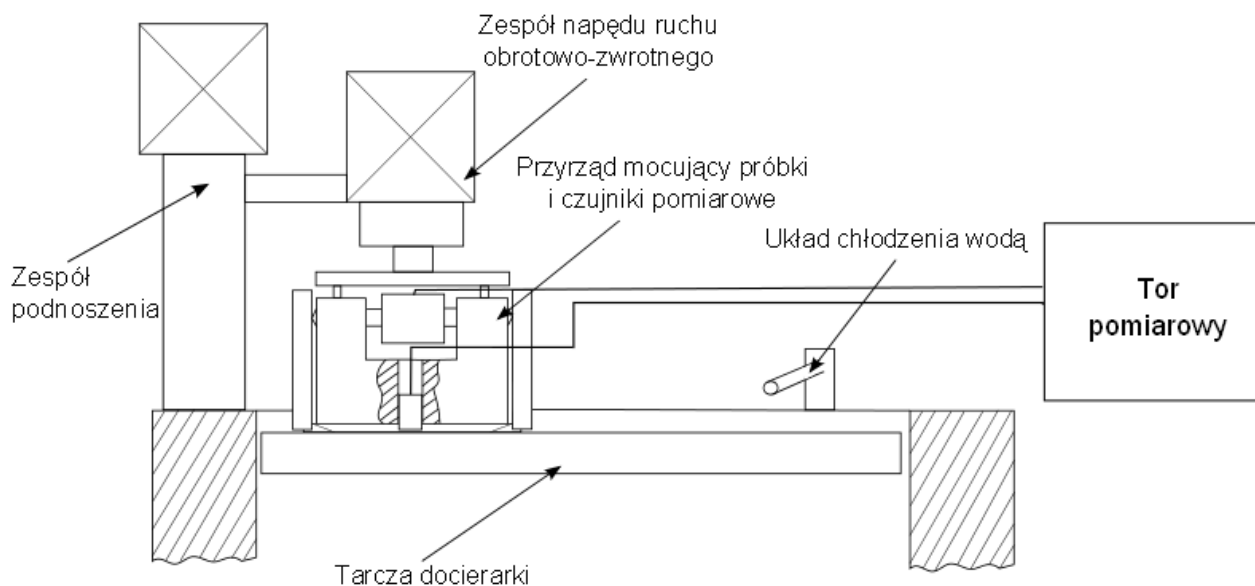


Rys. 2. Zasada pomiaru naprężeń w WW metodą usuwania warstw docieraniem; a) $F = 0$; b) $F > 0$
 Fig. 2. The measuring principle of residual stress in surface layer with the method of successive layer removal with lapping; a) $F = 0$; b) $F > 0$

Poniżej zostaną przedstawione wyniki badań otrzymane metodą usuwania warstw z zastosowaniem docierania do usuwania WW (MUWD), opracowaną w Instytucie Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej. Jej głównym zastosowaniem są badania naprężeń własnych w niejednorodnych WW (np. po EDM, LBM, stopowaniu elektroiskrowym), bądź

nieprzewodzących prądu elektrycznego. MUWD polega na stopniowym usuwaniu WW za pomocą obróbki ścierniej (docierania) z wyprostowanej próbki (rys. 2) i pomiarze sił, bądź momentów sił, niezbędnych do utrzymania próbki w stanie wyprostowanym. Na podstawie danych o wartościach tych obciążeń oraz grubości usuwanej warstwy, wyznaczany jest rozkład naprężeń w WW [1],[2].

Do badań wykorzystano stanowisko zbudowane, specjalnie na potrzeby MUWD, na bazie jednotarczowej docierarki laboratoryjnej (rys. 3).



Rys. 3 Schemat stanowiska badawczego
Fig. 3. Diagram of the test stand

Stanowisko badawcze składa się z:

- wyposażonego w silnik korkowy zespołu podnoszenia i opuszczania uchwytu mocującego próbki,
- zespołu napędu i realizacji ruchu obrotowo-zwrotnego uchwytu mocującego próbki,
- zespołu mocowania próbek, wraz z układami czujników pomiarowych,
- torów pomiarowych sił i grubości usuwanych warstw,
- sterowanego komputerowo systemu zadawania ruchów podnoszenia, opuszczania i ruchu obrotowo-zwrotnego próbek oraz rejestracji sygnałów pomiarowych,
- docierarki jednotarczowej,
- układu obiegu wody chłodzącej.

Umożliwia ono zautomatyzowane wykonanie badań. Próbki mocowane są w uchwycie pozwalającym na wyprostowanie ich na czas usuwania warstwy wierzchniej. Docieranie realizowane jest na tarczach ze spojonym żywicą ziarnem diamentowym, zapewniających stałą, względnie dużą wydajność procesu usuwania WW (ok. $3\mu\text{m}/\text{min}$).

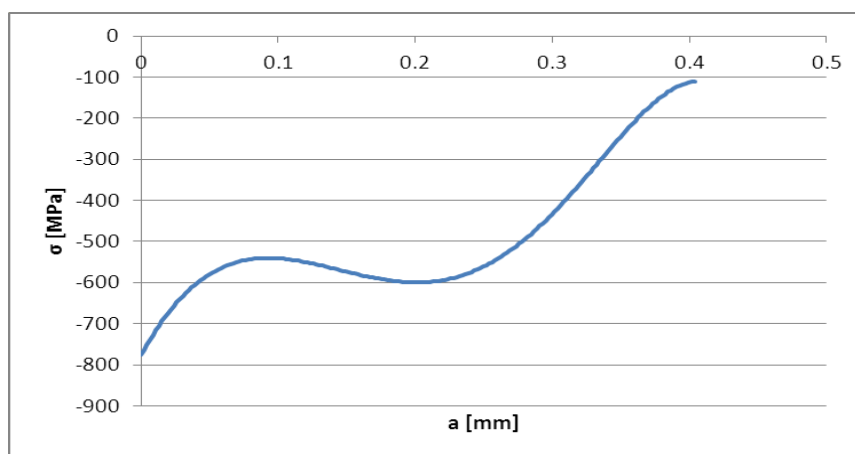
W odróżnieniu od roztwarzania elektrochemicznego, obróbka ta pozwala uzyskać płaskie powierzchnie, równomierne usuwanie WW na całej powierzchni próbki

i jednoznaczne określenie bieżącej grubości usuniętej WW. Ponadto zmiany sił związane z usuwaniem WW mają bezpośredni związek z naprężeniami i nie ma potrzeby, jak to ma miejsce w metodzie Phillipsa Waismana, przeliczać zmian strzałek ugięcia na momenty sił.

3. BADANIA I WYNIKI

Badania przeprowadzono dla dwóch typowych obróbek tj. nagniatania powierzchniowego generującego ściskające naprężenia w WW i obróbki elektroerozyjnej, po której WW charakteryzuje się znaczną niejednorodnością, naprężeniami rozciągającymi i dla której występują trudności przy badaniu naprężeń WW innymi metodami. Powierzchnie próbek Almen typu A (stal SAE/AISI 1070 (0,7 C, 0,64Mn, 0,006 P, 0,001 S, 0,19 Si, twardość: 45÷48 HRC, wymiary 1,3x8x76) obrobiono jednostronnie elektroerozyjnie z parametrami: $I = 24A$, $t_i = 200\mu s$, $U = 120V$ oraz kulowaniem strumieniowym: kulki stalowe $\Phi = 2,5mm$, $p = 4,5bar$, $t = 5min$.

Badania wykonano na zbudowanym w Instytucie Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej skomputeryzowanym stanowisku badawczym, które w czasie docierania umożliwia rejestrację wyników pomiarów sił niezbędnych do utrzymania próbek w stanie wyprostowanym i rejestrację grubości usuwanej WW. W oparciu o zbiory tych danych obliczany jest rozkład naprężeń w WW.

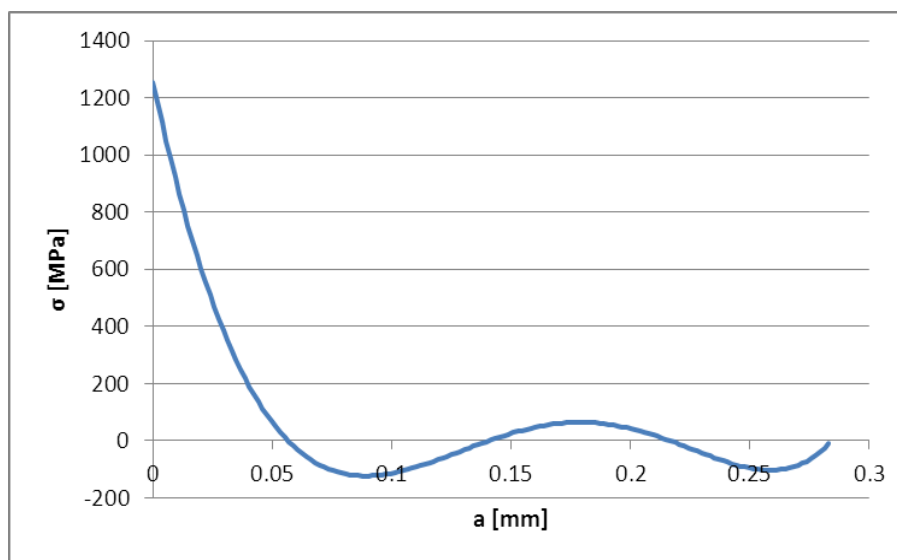


Rys. 4. Rozkład naprężeń własnych w próbce poddanej obróbce kulowaniem strumieniowym otrzymany za pomocą MUWD

Fig. 4. The residual stress distribution in specimen after shot peening obtained by using MUWD

Na rys. 4 przedstawiono rozkład naprężeń własnych σ w próbce po kulowaniu strumieniowym. Występują w niej naprężenia ściskające, ich maksymalna wartość znajduje się przy powierzchni próbki i osiąga blisko - 800MPa. Można zaobserwować przegięcie wykresu, charakterystyczne dla tej obróbki. Ze względu na zbyt małą grubość próbki w stosunku do grubości powstałej warstwy wierzchniej, nie cała WW została usunięta,

z tego powodu wykres nie przecina osi X, a naprężenia nie zmieniają, w badanym zakresie, charakteru na rozciągające. Mimo to, zgodnie z wynikami otrzymywanymi przez innych badaczy [8],[9], głębokość występowania naprężeń jest rzędu $400\mu\text{m}$.



Rys. 5. Rozkład naprężeń własnych w funkcji grubości WW w próbce poddanej obróbce EDM otrzymany za pomocą MUWD

Fig. 5. The residual stress distribution in specimen after EDM obtained by using MUWD

Na rys. 5 przedstawiono rozkład naprężeń własnych σ , otrzymany metodą usuwania warstw poprzez docieranie, w próbce po obróbce elektroerozyjnej. Naprężenia własne osiągają maksimum przy powierzchni próbki, wynoszą ok. 1200MPa i mają charakter rozciągający. Na głębokości ok. $55\mu\text{m}$ zmieniają się na naprężenia ściskające dochodzące do -120MPa . Na głębokości $140\mu\text{m}$ naprężenia są znowu rozciągające i przechodzą w ściskające naprężenia rdzenia na głębokości ok. $215\mu\text{m}$. Zmiany znaku naprężeń własnych są związane z istnieniem stref wpływów ciepła i zmianami strukturalnymi w WW powstałej po EDM.

4. WNIOSKI

Przedstawione powyżej rozkłady naprężeń własnych uzyskane przy użyciu MUWD są zgodne, zarówno co do kształtu, jak i wartości naprężeń i grubości WW, z wynikami publikowanymi w literaturze światowej [8-11]. Opracowana metoda daje dobre wyniki, jest prosta w zastosowaniu i bezpieczna dla środowiska (brak żrących kwasów stosowanych w klasycznej metodzie usuwania warstw). Może być ona alternatywą dla innych metod wyznaczających naprężenia własne w WW, szczególnie w przypadku przeprowadzania badań elementów o niejednorodnej WW, dużej chropowatości, nieprzewodzących prądu elektrycznego itp.

LITERATURA

- [1] ARASIMOWICZ A., NOWICKI B., 2010, *Measurement of residual stress in surface layer of considerable non-homogeneity*, Proceedings of the 5th International Conference on Advances In Production Engineering, Warsaw, 204-211.
- [2] ARASIMOWICZ A., NOWICKI B., 2011, *Sposób pomiaru naprężeń własnych w technologicznych warstwach wierzchnich i przyrząd do pomiaru naprężeń własnych*. Patent. 210364.
- [3] BEZJAZYCZNYJ V. F., 2002, *Wpływ jakości warstwy wierzchniej na właściwości eksploatacyjne części maszyn*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn - Tribologia, 37/2, 7-27.
- [4] BURAKOWSKI T., WIERZCHOŃ T., 1995, *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa.
- [5] HEBDA M., WACHAL A., 1980, *Trybologia*, WNT, Warszawa.
- [6] LU J., 1996, *Handbook of Measurement of Residual Stresses: Society For Experimental Mechanics*, Liburn, GA: Fairmont Press.
- [7] PODOLAK-LEJTAS A., 2006, *Modyfikacja warstwy wierzchniej zgniotem powierzchniowym elementów obrobionych elektroerozyjnie*, Rozprawa doktorska, PW, Warszawa.
- [8] PRZYBYLSKI W., 1987, *Technologia obróbki nagniataniem*, WNT, Warszawa,
- [9] NIKU-LARI A., 1987, *Advances in surface treatments. Technology – Applications - Effects. vol.4 Residual stress*, Pergamon Press, Great Britain, 237-250.
- [10] BRINGSMAIER E., CAMMETT J. T., KÖNIG W., LESKOVAR P., PETERS J., TÖNSHOFF H. K., 1982, *Residual stresses – measurement and causes in machining processes*, Annals of the CIRP, 31/2, 491-510.
- [11] EKMEKCI B., TEKKAYA A. E., ERDEN A., 2006, *A semi-empirical approach for residual stresses in electric discharge machining (EDM)*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, Elsevier, 858-868.

RESIDUAL STRESS MEASUREMENT AFTER ELEKTRO DISCHARGE MACHINING AND SHOT
PEENING USING THE METHOD OF SUCCESSIVE LAYER REMOVAL WITH LAPPING

The paper presents the methodology and results of residual stress measurement with method of successive layer removal with lapping in samples after electro-discharge machining and shot peening.