

Dr inż. Tadeusz OTKO (Politechnika Krakowska):

METODA IDENTYFIKACJI NAPRĘŻEŃ WEWNĘTRZNYCH W PÓLFABRYKACIE OSIOWOSYMETRYCZNYM DO OBRÓBKI UBYTKOWEJ

Streszczenie

Półfabrykaty przedmiotów przeznaczonych do dokładnego kształtowania metodą obróbki ubytkowej częstokroć mają naprężenia wewnętrzne pozostałe po wcześniej prowadzonych zabiegach cięcia i obróbki plastycznej. Naprężenia te rezydują, w ustalonym stanie równowagi, w całej objętości materiału surówki. Usunięcie naddatku obróbkowego wiąże się ze zmianą tego stanu równowagi i odkształceniami przedmiotu, które zaburzają dokładność wymiarowo-kształtową nadaną w procesie dokładnej obróbki ubytkowej. W pracy podjęto próbę identyfikacji naprężeń wewnętrznych w półfabrykacie, polegającą na beznaprężeniowym usunięciu naddatków obróbkowych i określeniu wpływu tego zabiegu na odkształcenia powierzchni istotnych z punktu widzenia tolerancji wymiarowo-kształtowych przedmiotu.

***Słowa kluczowe:** półfabrykat osiowosymetryczny, naprężenia wewnętrzne, odkształcenia*

A METHOD OF INTERNAL STRESSES IDENTIFICATION IN SEMI FINISHED ROTATIONAL PARTS IN MACHINING

Abstract

Semi-manufactured parts dedicated for precise machining often have internal stresses which have remained after previous cutting and plastic processing. These stresses reside in a fixed state of balance over the entire volume of the workpiece. Removal of the machining allowance is associated with a change in the state of balance and deformation of the workpiece, which affect its dimensional and shape accuracy. The study, involving non-stress removal of precisely defined volume of the machining allowance and determination of the impact of this treatment on the deformation of the workpiece surface is presented. It is important from the point of view of dimensional tolerance of the axially symmetrical workpiece, finally processed by turning.

***Keywords:** semi-finished parts turning, internal stresses, deformations*

METODA IDENTYFIKACJI NAPRĘŻEŃ WEWNĘTRZNYCH W PÓLFABRYKACIE OSIOWOSYMETRYCZNYM DO OBRÓBKI UBYTKOWEJ

Otko Tadeusz¹

1. WSTĘP

Zapewnienie wysokiej klasy dokładności wymiarom i powierzchniom zarysów geometrycznych części maszyn nabiera szczególnego znaczenia we współczesnych procesach wytwarzania tj. w erze intensywnego wprowadzania racjonalizacji, nowych materiałów konstrukcyjnych oraz innowacyjnych rozwiązań w metodach i warunkach obróbki.

W pewnych przypadkach, mimo stosowania dokładnych obrabiarek, doskonałych narzędzi skrawających precyzyjnego zaprogramowania ścieżki narzędzia, i racjonalnie dobranych parametrów technologicznych, zauważa się, że dokładnie obrobiony przedmiot zmienia swoje wymiary w miarę upływu czasu od zakończenia obróbki. Dotyczy to szczególnie przedmiotów osiowosymetrycznych, o niewielkiej sztywności tzn. takich, których wymiary wzdłużne lub średnicowe (średnice wewnętrzne np. pierścieni) są znacznie większe od wymiarów przekroju poprzecznego np. wały, pierścienie, tarcze itp. [1, 2, 3].

Liczne badania wskazują, że głównych przyczyn tego zjawiska należy upatrywać w tworzeniu stanu naprężeń wewnętrznych na etapie nieodzownych procesów technologicznych kształtowania półfabrykatów tj. procesów metalurgicznych, obróbki kształtującej plastycznej i ubytkowej, obróbki cieplnej itp. [4, 5, 10]

W technologii wytwarzania odpowiedzialnych części np. w przemyśle lotniczym, samochodowym, elektromaszynowym wprowadza się zabiegi redukujące te napręże-

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, al. Jana Pawła II 37, 37-864 Kraków

nia i tendencje do wypaczania [2]. Stosuje się wyżarzanie relaksacyjne półfabrykatu oraz dodatkowy zabieg obróbki cieplnej pomiędzy obróbką zgrubną i wykończeniową. Rozwiązania takie, pomimo dodatkowych kosztów, nie zawsze są efektywne, bowiem nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie tych naprężeń. W trakcie obróbki ubytkowej ma miejsce usuwanie materiału naddatku obróbkowego. Ubytki materiału nadatków zakłócają istniejący, zrównoważony stan naprężeń, powodując odkształcanie przedmiotu [6, 7, 8, 9]. Celowe jest opracowanie metody identyfikującej obecność naprężeń wewnętrznych i poprawa ostatecznej dokładności obróbki metodą np.: ustalenia pożądanej kolejności wykonania zabiegów obróbkowych lub skompensowania odkształceń przedmiotu po obróbce np. metodą modyfikowania wymiarów.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

W Katedrze Technologii Maszyn i Narzędzi Instytutu Technologii i Maszyn i Automatyzacji Produkcji w Politechnice Krakowskiej podjęto próbę identyfikacji rezydentnych naprężeń wewnętrznych w półfabrykacie osiowosymetrycznym (odkuwce pierścienia) oraz skutków ich oddziaływania na odkształcenia przedmiotu po nadaniu mu finalnych zarysów geometrycznych.

W pracy, do usuwania nadatków obróbkowych zastosowano elektroerozyjne cięcie drutem, jako metodę obróbkową beznaprężeniową. Powstałe po usunięciu nadatków odkształcenia należy uważać za spowodowane naruszeniem równowagi naprężeń wewnętrznych, wytworzonych w poprzedzających procesach obróbki plastycznej i cieplnej półfabrykatu.

W badaniach wykorzystano półfabrykat pierścienia ze stali stopowej AMS 6265 o średnicy zewnętrznej $\phi 540\text{mm}$ i profilu przekroju poprzecznego, jak na rys. 3a, ukształtowanego metodą obróbki plastycznej. Na wstępie, na stanowisku (rys.1) wycięto z półfabrykatu metodą elektroerozyjnego przecinania drutem (WEDM), segment o pewnej długości obwodowej. Wycięty wycinek pierścienia zawierał naprężenia wewnętrzne powstałe po obróbce plastycznej i cieplnej w obszarze porównywalnym z całkowitą objętością materiału próbki. Charakter naprężeń, rezydujących w ustalonym stanie równowagi w wypreparowanym wycinku był podobny do stanu naprężeń występujących w przekrojach elementarnych w całym półfabrykacie.

Dla uproszczenia badań przyjęto założenie, że odkuwka fragmentu pierścienia posiadała obrobione zarysy powierzchni tworzących wymiary wewnętrzne pierścienia – zarys A (rys. 3b) i tych powierzchni nie objęto badaniami.



Rys. 1. Stanowisko do elektroerozyjnego wycinania drutem próbki do badań z całego pierścienia



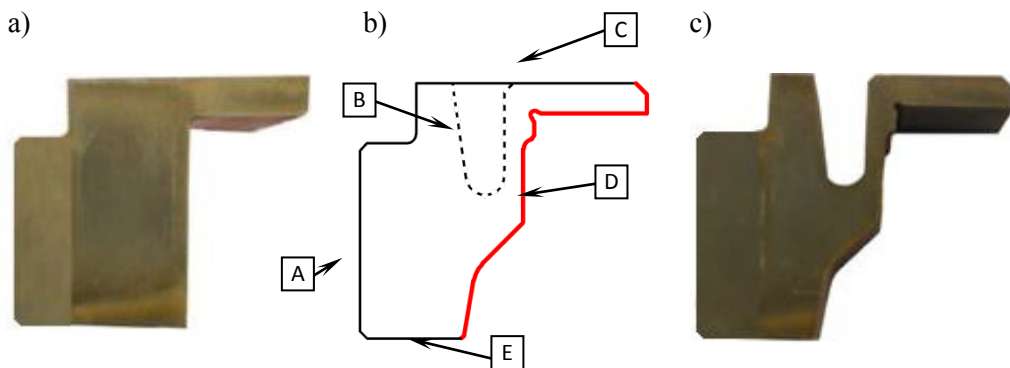
Rys. 2. Stanowisko do szlifowania powierzchni segmentu kołnierza pierścienia

Za istotne z punktu widzenia badań, przyjęto zewnętrzne powierzchnie funkcjonalne pierścienia, które powinny być wykonane w wysokiej klasie dokładności IT, tj. powierzchnie boczne, tworzące zarys D (rys.3 b), powierzchnię czołową kołnierza C oraz zarys rowka wgłębnego B. Za parametr dokładności kształtu przyjęto odchyłkę prostoliniowości i równoległości [11], wyznaczaną wzdłuż promienia na powierzchni czołowej kołnierza C.

Na wstępie obrobiono elektroerozyjnie równoległe powierzchnie czołowe C i E (rys. 3 b). Za powierzchnię bazową do pomiarów odchyłki równoległości przyjęto powierzchnię E, a za powierzchnię pomiarową, powierzchnię C.

Na tej ostatniej przyjęto trasę pomiarową, biegnącą wzdłuż promienia półfabrykatu pierścienia. Powierzchnie E i C przygotowano do pomiarów metodą szlifowania zgrubnego i dokładnego na szlifierce do płaszczyzn (rys.4). Obróbkę szlifowaniem prowadzono aż do całkowitego zaniku kraterów, powstałych po obróbce elektroerozyjnej.

Z doświadczeń warsztatowych wynikało, że usunięcie nadmiaru przewidzianego na obróbkę toczeniem z zarysu D i B (rys. 3b) w sposób istotny zmieniało stan równowagi naprężeniowo odkształceniowej pierścienia i powodowało niepożądane odkształcenia na powierzchni C.



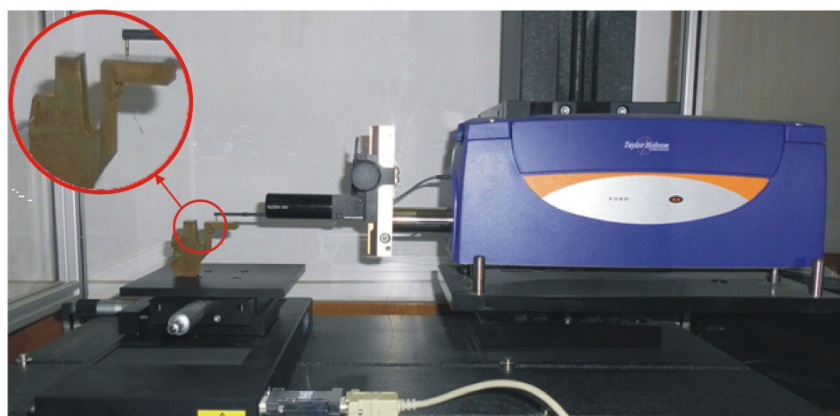
Rys. 3. Wycinek pierścienia w różnych fazach badań

a) widok wycinka pierścienia przed usunięciem nadatków obróbkowych;

b) zarys geometryczny przekroju poprzecznego gotowego przedmiotu: A- zarys powierzchni tworzących wymiary wewnętrzne, B – zarys rowka kształtowego, C powierzchnia czołowa wykorzystana do pomiaru prostoliniowości wzdłuż promienia pierścienia, D - zarys powierzchni zewnętrznej, E – powierzchnia bazowa,

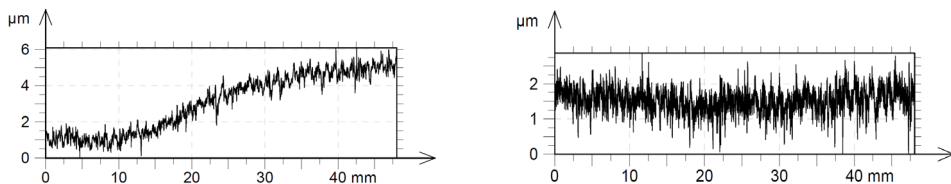
c) widok wycinka pierścienia po ukształtowaniu zarysu bocznego i wycięciu rowka.

Do identyfikacji naprężeń wewnętrznych zastosowano metodę Sachsa i Espeya [10, 11], polegającą na zdjęciu materiału nadatku obróbkowego i pomiarze odkształceń, powstałych po tym zabiegu, na powierzchni funkcjonalnie istotnej. Do pomiarów wartości odkształceń zastosowano Profilograf z kształtometrem Talysurf, firmy Taylor Hobson (rys.4).



Rys. 4. Stanowisko do pomiarów odchyłek kształtu profilu wycinka pierścienia .

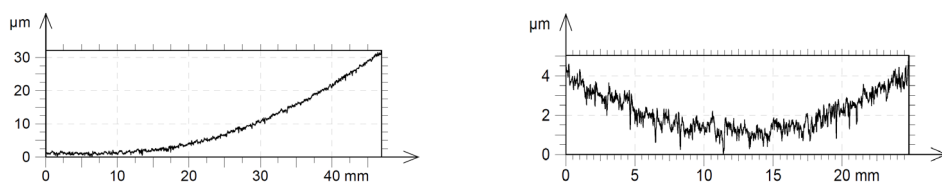
W początkowym etapie badań, po zakończeniu szlifowania płaszczyzn, a przed zdjęciem nadatków obróbkowych, wykonano profilometrem pomiary prostoliniowości i równoległości na powierzchni C (rys 4), wzdłuż przyjętej trasy pomiarowej. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wynik pomiaru zarysu prostoliniowości i równoległości, parametr STRt, STRp, STRv na powierzchni C (rys. 3b) przed elektroerozyjną obróbką zarysu bocznego.

Wartość odchyłki równoległości w odniesieniu do bazy E wyniosła $5\mu\text{m}$, natomiast odchyłka prostoliniowości, wyznaczona w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni C, wyniosła $2\mu\text{m}$.

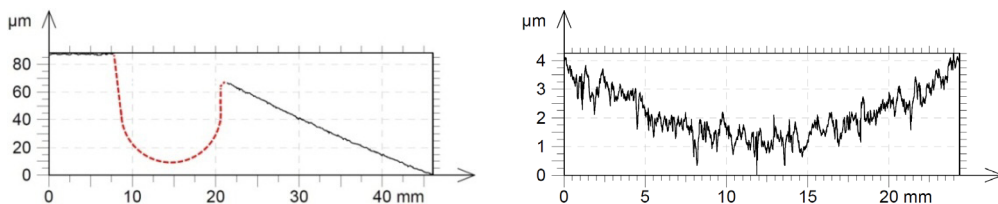
Następnie wykonano elektroerozyjne cięcie drutem, zgodnie z zadanym na rysunku wykonawczym pierścienia zarysem geometrycznym powierzchni bocznej wycinka pierścienia D, (rys. 3b). Po zdjęciu zadanej objętości materiału nadatku stan równowagi naprężeń wewnętrznych w wycinku półfabrykatu uległ zaburzeniu. Zmierzono reakcję odkształceniową przedmiotu. Pomiary wykonano na profilografometrze, wzdłuż tej samej co poprzednio, trasy pomiarowej. Wyniki pomiaru równoległości powierzchni C względem powierzchni E i odchyłki prostoliniowości powierzchni kołnierza, mierzonej wzdłuż przyjętej trasy pomiarowej przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wynik pomiaru odchyłki równoległości i prostoliniowości na powierzchni C, po zdjęciu materiału nadatku obróbkowego z powierzchni bocznej D segmentu pierścienia (rys. 3b).

Wartość odchyłki prostoliniowości wzdłuż promienia kołnierza zwiększyła się i wynosiła $4\mu\text{m}$, a odchyłka równoległości pow. C w odniesieniu do bazy tj. powierzchni E wynosiła $30\mu\text{m}$.

W dalszej kolejności w tej samej próbce na powierzchni kołnierza C, wykonano metodą elektroerozyjnego cięcia drutem zarys rowka kształtowego, wg profilu zaznaczonego literą B, (rys 3b). Po usunięciu objętości materiału rowka wykonano pomiary odchyłek prostoliniowości i równoległości kołnierza C, wzdłuż pierwotnie przyjętej trasy pomiarowej. Wyniki pomiaru pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Wyniki pomiarów odchyłek równoległości i prostoliniowości na powierzchni C, wyznaczonych po zdjęciu materiału nadatku obróbkowego rowka wglębnego, zarys B, (rys. 3b).

Wartość odchyłki prostoliniowości nie uległa zmianie i nadal wynosiła $4\mu\text{m}$, natomiast odchyłka równoległości uległa istotnej zmianie, i wyniosła $80\mu\text{m}$, w odniesieniu do przyjętej bazy. Przy tym zwrot tego odkształcenia był przeciwny do zwrotu poprzedniego odkształcenia.

3. WNIOSKI

Przedmiotem badań podjętych w pracy była metoda identyfikacji naprężeń wewnętrznych w półfabrykacie. Stosując beznaprężeniową metodę obróbki do usunięcia, zdefiniowanego co do objętości i lokalizacji, materiału nadatku obróbkowego, wyznaczono wpływ tego ubytku objętości materiału na wartości i kierunki powstałych odkształceń przedmiotu.

Zastosowanie metody cięcia elektroerozyjnego drutem do kształtowania ostatecznego zarysu z półfabrykatu wniosło zalety:

- a) dokładne odtworzenie złożonego zarysu przekroju poprzecznego gotowego przedmiotu metodą obróbki ubytkowej CNC,
- b) beznaprężeniowy sposób obróbki nie wnosił do przedmiotu dodatkowych naprężeń wewnętrznych, powstających w trakcie obróbki skrawaniem.

Przeprowadzone badania wykazały przydatność proponowanej metody do identyfikacji, wstępnego oszacowania wartości i kierunku naprężeń wewnętrznych rezydujących w półfabrykacie pierścieniowym po obróbce plastycznej i cieplnej. Wykazano reakcję odkształceniową przedmiotu na usunięcie materiału nadatków obróbkowych. Zmierzono odkształcenia spowodowane ubytkiem objętości materiału w zdefiniowanych strefach przedmiotu. Usunięcie nadatku z kształtowej powierzchni bocznej spowodowało odkształcenie kołnierza wycinka pierścienia ku górze o wartość ok $30\mu\text{m}$ i zmianę kształtu (wklęsłość powierzchni czołowej) równą $4\mu\text{m}$. Wycięcie rowka kształtowego na powierzchni czołowej wycinka spowodowało odkształcenia w tym samym kierunku lecz o przeciwnym zwrocie o wartość $110\mu\text{m}$ w stosunku do stanu poprzedniego i nie wpłynęło na wartość odchyłki wklęsłości.

Wyniki badań pozwoliły na zidentyfikowanie obecności rezydentnych naprężeń wewnętrznych w półfabrykacie pierścienia i nasunęły sugestię, że kolejność stosowa-

nia poszczególnych operacji obróbkowych tego przedmiotu, z punktu widzenia zapewnienia najlepszej dokładności kształtowej nie powinna być dowolna. W pierwszej kolejności należy obrobić powierzchnię boczną D, następnie wyciąć rowek kształtowy B, a jako ostatnią obrobić wykańczająco powierzchnię czołową kołnierza C.

Projekt finansowany w ramach Programu INNOLOT, umowa numer INNOLOT/I/10/NCBR/2014.

LITERATURA

1. HEYN E., BAUER O., Über die Spannungen in kaltgereckten Metallen, International Zeitschrift für Metallographie, 1911, Bd. 1, S. 16.
2. HAŁAS W. Badanie wpływu naprężeń szczątkowych na dokładność wytwarzania wałów, Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 20110.
3. SOKOLOV I.A., URALSKIJ V.I.: Ostatocnye naprâżenia i kacestvo metalloprodukcii. M.: Metallurgîâ, 1981, s. 96.
4. SACHS G., ESPEY G.: The measurement of residual stresses in metal. Iren Age, Vol 148, 1941
5. [11]. BIRGER I.A., KOZLOV M.L.: Ostatocnye naprâżenia: problemy i perspektivy. Materialy Vsesouznogo simpoziuma "Tehnologiceskie ostatocnye naprâżenia" M.: 1988., s. 388.
6. Promptov A.P.: Ostatocnye iŝgrâżenia i deformacii pri obrabotke malożestkih detalaj rezaniem. /:ps.dokt. tehn. nauk -Kujbyŝev, 1975, s. 543.
7. Kolot L.P.: Razrabotka i issledovanie kompleksa tehnologiceskih metodov powyŝeniâ tocnosti formy neżestkih detalaj. Avtoref. dis. kand. tehn. nauk.-Minsk 1986, s. 19.
8. Heyn E., Bauer O.: International Zeitschrift für Metallographie. 1911, Bd. 1 s. 16.
9. Kobrin M.M., Dehtâr L.I.: Opredeleniâ vnutrennih naprâženij v cilindriceskih detalâh,M,: Maŝinostroenie, 1965, s. 175
10. Birger I.A., Kozlov M.L.: Ostatocnye naprâżenia: problemy i perspektivy. Materialy Vsesouznogo simpoziuma "Tehnologiceskie ostatocnye naprâżenia" M.: 1988., s. 388.
11. ADAMCZAK S. „Pomiary geometryczne powierzchni, zarysy kształtu, falistości i chropowatości”, WNT Warszawa 2008