

	Organizatorzy: Politechnika Łódźka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

System sterowania adaptacyjnego geometrycznego w procesie szlifowania kłowego wałków

Adaptive geometrical control system for cylindrical grinding process

PAWEŁ LAJMERT
 BOGDAN KRUSZYŃSKI
 MAŁGORZATA SIKORA
 DARIUSZ OSTROWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.375

W artykule przedstawiono system sterowania kompensacyjnego geometrycznego dla procesu szlifowania kłowego wałków. Celem systemu jest usunięcie początkowego błędu kształtu i uzyskanie pożądanej dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianego przedmiotu w minimalnym czasie. Omówiono model odkształceń sprężystych i cieplnych obrabianych przedmiotów. Opisano algorytmy identyfikacji stanu procesu oraz kompensacji zakłóceń występujących w procesie szlifowania kłowego wałków. W końcowej części pracy przedstawiono wyniki obróbki przykładowych detali.

SŁOWA KLUCZOWE: sterowanie geometryczne, szlifowanie cylindryczne, monitorowanie

The article presents a geometrical compensatory control system for plunge grinding process. The purpose of the system is to remove the initial workpiece shape error and to achieve a desired geometrical workpiece accuracy in a minimum time. Thermal expansion and compliance workpiece models were described. Additionally process state identification and disturbance compensation algorithms are presented. In the end the results of exemplary parts grinding results are presented.

KEYWORDS: geometrical control, cylindrical grinding, monitoring

Szlifowanie jest najczęściej finalną operacją w procesie obróbczym i decyduje o wynikowym stanie warstwy wierzchniej jak i o dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianych przedmiotów. Głównym wymogiem szlifowania

wgłębnego wałków jest uzyskanie wymaganego wymiaru i kształtu obrabianego przedmiotu w możliwie najkrótszym czasie. Zwykle w procesie szlifowania generowane są duże siły szlifowania i temperatury, co powoduje powstawanie znacznych ugięć i odkształceń cieplnych obrabianych przedmiotów i utrudnia osiągnięcie tego wymogu [4].

Dodatkowo podczas szlifowania przedmiotów wiotkich powstają problemy związane z usuwaniem nadmiaru obróbkowego oraz z niestabilnością procesu prowadzącą do szybkiej utraty zdolności skrawnych przez narzędzie ściernie. Problemy związane z efektywnym usuwaniem nadmiaru obróbkowego mogą być rozwiązane przez zastosowanie układów sterowania kompensacyjnego geometrycznego, których celem jest kompensacja odkształceń sprężystych obrabianego przedmiotu [2, 4, 5]. Dodatkowym problemem podczas szlifowania, szczególnie materiałów trudnoobrabialnych, są odkształcenia cieplne obrabianego przedmiotu, które muszą być kompensowane poprzez optymalizację przebiegu procesu szlifowania lub estymację tego odkształcenia i korekcję położenia ściernicy w ostatniej fazie szlifowania. Usuwanie błędów kształtu poprzez zmianę grubości warstwy szlifowanej może być realizowane na różne sposoby, np. poprzez zmianę pozycji krawędzi skrawającej ściernicy [3] lub poprzez modulacje prędkości obrotowej przedmiotu [5, 7].

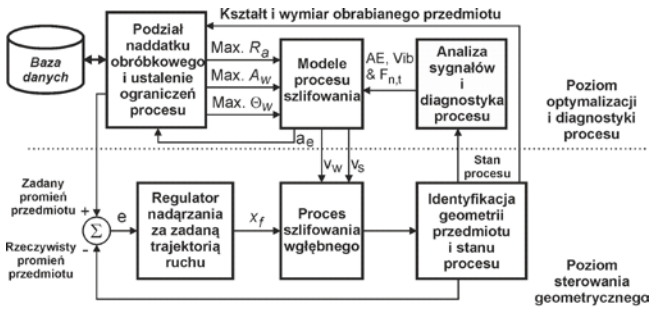
W pracy przedstawiono system sterowania adaptacyjnego geometrycznego w procesie szlifowania kłowego wałków, którego celem jest kompensacja odkształceń sprężystych i cieplnych obrabianych detali oraz usuwanie nadmiaru obróbkowego w sposób optymalny z punktu widzenia przyjętych kryteriów jakościowych obróbki.

Struktura systemu kompensacji zakłóceń

Ogólną strukturę budowanego w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ inteligentnego systemu kompensacji zakłóceń

* dr inż. Paweł Lajmert (pawel.lajmert@p.lodz.pl),
 prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński (bogdan.kruszynski@p.lodz.pl),
 dr inż. Małgorzata Sikora (malgorzata.sikora@p.lodz.pl),
 dr inż. Dariusz Ostrowski (dariusz.ostrowski@p.lodz.pl)

w procesie szlifowania kłowego wałków przedstawiono na rysunku 1 [2].

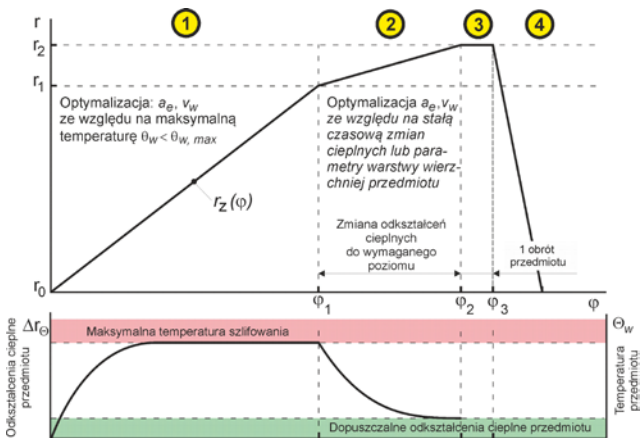


Rys. 1. Struktura systemu kompensacji zakłóceń w procesie szlifowania kłowego wałków

Zadaniem poziomu optymalizacji jest ustalenie optymalnych warunków obróbki w fazie szlifowania zgrubnego i wykończeniowego. Zadaniem poziomu sterowania geometrycznego, będącego przedmiotem niniejszego opracowania, jest usunięcie początkowego błędu kształtu obrabianego przedmiotu i nadadtku obróbkowego w fazie obróbki zgrubnej i wykończeniowej w minimalnym czasie. Zadaniem tego poziomu sterowania jest również identyfikacja wybranych parametrów procesu szlifowania niezbędnych do działania podsystemu diagnostyki i optymalizacji procesu. Przyjęto, iż wielkością sterowaną, nadającą przedmiotowi pożądany kształt będzie promień przedmiotu wychodzący ze strefy obróbki. Zmiany tego promienia w czasie wynikają z wielkości podlegających optymalizacji, tj. zadanej grubości warstwy skrawanej i prędkości obwodowej przedmiotu w poszczególnych fazach cyklu.

Wymogi dla optymalnego cyklu szlifowania

Budowa optymalnego cyklu szlifowania ze względu na czas cyklu i parametry wynikowe szlifowania wraz z wymaganiami stawianymi w poszczególnych fazach cyklu przedstawiona została na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura optymalnego cyklu szlifowania

Podczas projektowania przebiegu cyklu szlifowania istotnym problemem jest:

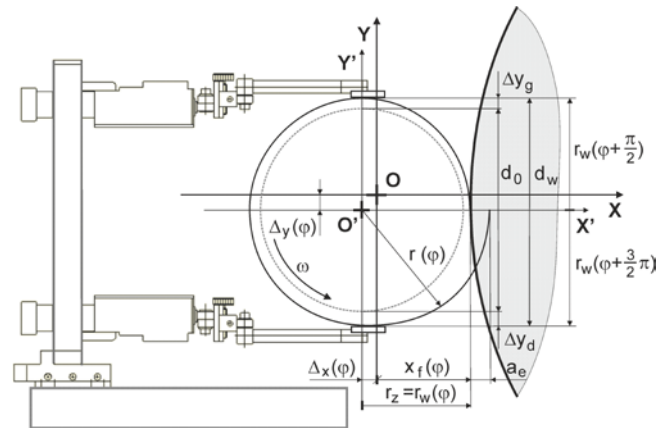
- Ustaleniu warunków obróbki z maksymalną wydajnością, tj. grubości warstwy szlifowanej a_e i prędkości obwodowej przedmiotu v_w w fazie zgrubnego szlifowania ze względu na uszkodzenia ciepłe przedmiotu lub trwałość narzędzia.
- Minimalizacji fazy niestacjonarnej obróbki w fazie szlifowania zgrubnego, tj. naprężenie układu do wartości siły wynikającej z warunków obróbki w minimalnym czasie.

- Ustaleniu momentu przełączenia cyklu z fazy zgrubnej na fazę wykończeniową szlifowania tak, aby zminimalizować odkształcenia ciepłe przedmiotu do poziomu wynikającego z tolerancji docelowego wymiaru przedmiotu (ze względu na stałą czasową zmian odkształceń ciepłych) lub ze względu na możliwość dokładnej estymacji odkształceń ciepłych przedmiotu (z wykorzystaniem odpowiedniego modelu) i ich kompensacji w ostatniej fazie cyklu.
- Ustaleniu parametrów obróbki w fazie szlifowania wykończeniowego, tj. grubości warstwy szlifowanej a_e i prędkości obwodowej przedmiotu v_w , w celu minimalizacji odkształceń ciepłych przedmiotu oraz ze względu na wymagane parametry warstwy wierzchniej przedmiotu.

Zależności kinematyczne w strefie obróbki

Podczas szlifowania wglębnego przedmiotów cylindrycznych zamocowanych w kłach ich geometria kształtowana jest w wyniku ruchu względnego narzędzia i przedmiotu. Podczas obróbki geometria przedmiotu tj. jego średnica mierzona jest przez specjalny przyrząd do aktywnej kontroli wymiaru i kształtu.

Schemat zależności kinematycznych w strefie skrawania w procesie szlifowania wglębnego przedstawiono na rysunku 3. Przyjęta w pracy strategia usuwania początkowego błędu kształtu przedmiotu i nadadtku obróbkowego polega na takim sterowaniu pozycją ściernicy, które realizowałoby nadążanie rzeczywistego promienia $r(t)$ fragmentu powierzchni przedmiotu wychodzącej ze strefy obróbki za wartością zadaną $r_z(t)$, która w poszczególnych fazach cyklu szlifowania może być uważana jako funkcja położenia kąтового przedmiotu w układzie współrzędnych $O'X'Y'Z'$ związanym z umowną, chwilową osią obrotu przedmiotu, zgodnie z cyklem przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 3. Schemat zależności kinematycznych w strefie skrawania

Pomimo, iż system pomiarowy wyposażony został w wzmacniacz sygnałów dostarczający informacji o przemieszczeniu końcówek pomiarowych z obu głowic zakłada się, że system sterowania dysponuje jedynie informacją o średnicy przedmiotu, równoważnej sumie promieni przedmiotu rejestrowanych przez górną i dolną głowicę pomiarową, odpowiednio na pozycjach kątowych $\pi/2$ i $3\pi/2$. Wynika to z faktu, iż praktycznie wszystkie komercyjne przyrządy do aktywnej kontroli wymiaru szlifowanych przedmiotów dostarczają jedynie informacji o aktualnej średnicy przedmiotu. Używany na stanowisku wzmacniacz firmy Marposh został wykonany na specjalne zamówienie [3]. W wyniku realizacji procesu szlifowania powstaje składowa odporowa siła szlifowania F_n , powodująca odkształcenie sprężyste przedmiotu, czego efektem jest przemieszczenie się początku układu $O'X'Y'Z'$ o wartość tego odkształcenia

w kierunku osi OX. Aktualna średnica przedmiotu d_w dana jest zatem następującą zależnością:

$$d_w = d_0 + \Delta y_g + \Delta y_d \quad (1)$$

w której: d_0 – jest docelową średnicą obrabianego przedmiotu, Δy_g i Δy_d – są przemieszczeniami końcówek odpowiednio górnej i dolnej głowicy pomiarowej.

Przemieszczenie końcówek przedmiotu jest zatem uwikłane w sygnale pomiarowym reprezentującym średnicę przedmiotu. Przemieszczenie końcówek jest wynikiem zmian promienia przedmiotu na skutek usuwania materiału przez narzędzie ściernie, zmian wnikających z odkształceń cieplnych górnego i dolnego fragmentu obrabianego przedmiotu, przemieszczenia końcówek w wyniku przemieszczenia przedmiotu w osi OY pod działaniem składowej stycznej siły szlifowania, nieistotnego w przypadku pomiaru średnicy przedmiotu. Pozycja ściernicy $x_f(\varphi)$ określona jest w globalnym układzie współrzędnych OXYZ. Jeżeli pozycja ta podlega pomiarowi to promień przedmiotu $r_w(\varphi)$ wychodzący ze strefy obróbki może być określony jako suma pozycji ściernicy $x_f(\varphi)$ oraz odkształcenia przedmiotu w osi $\Delta x(\varphi)$ w kierunku osi OX. Promień wychodzący ze strefy szlifowania jest zawsze powiększony o odkształcenie cieplne fragmentu przedmiotu będącego aktualnie w kontakcie z narzędziem ściernym Δ_ϕ . Zależność kinematyczna w strefie styku ściernicy z przedmiotem wyrażona jest zatem następującą zależnością:

$$r_w(\varphi) = x_f(\varphi) + \frac{F_n(\varphi)}{k_x} - \Delta_\phi(\varphi) \quad (2)$$

Występująca we wzorze (2) całkowita sztywność układu OUPN k_x obejmuje jedynie sztywność mocowania przedmiotu, sztywność przedmiotu obrabianego oraz sztywność mocowania ściernicy. Znacznie bardziej istotny jest ubytek materiału ściernicy w wyniku wykruszania się fragmentów wierzchnich ziaren ściernych zmieniający położenie rzeczywistej pozycji krawędzi skrawającej ściernicy x_f . W ramach systemu sterowania geometrycznego opracowano również algorytmy estymacji rzeczywistej grubości warstwy skrawanej i zdolności skrawanej ściernicy.

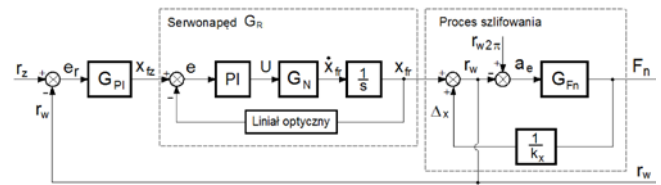
Grubość warstwy skrawanej może być wyznaczona jako różnica pomiędzy promieniem przedmiotu wychodzącym ze strefy obróbki a oraz tym sprzed jednego obrotu przedmiotu. Estymata zdolności skrawanej ściernicy według składowej normalnej siły szlifowania może być zatem wyznaczona według następującej zależności:

$$\hat{K}'_{zn}(t) = \frac{a_e(t)v_w}{F_n(t)} = \frac{r_w(\varphi-2\pi) - r_w(\varphi)}{F_n(t)} \quad (3)$$

w której: a_e – rzeczywista grubość warstwy skrawanej, F_n – składowa normalna siła szlifowania, $r_w(\varphi)$ i $r_w(\varphi-2\pi)$ – odpowiednio aktualny promień wychodzący ze strefy obróbki i ten sprzed jednego obrotu.

■ Struktura systemu sterowania nadążnego

Ponieważ przyjęty w pracy algorytm sterowania opiera się na takim sterowaniu pozycją ściernicy, które realizowałoby nadążanie rzeczywistego promienia przedmiotu $r_w(\varphi)$ za wartością zadaną $r_z(\varphi)$, układ sterowania musi być zrealizowany w formie zamkniętej pętli regulacji ze sprzężeniem zwrotnym od promienia przedmiotu wychodzącego ze strefy obróbki. Schemat układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym od promienia przedmiotu opuszczającego strefę obróbki $r(\varphi)$ przedstawiono na rysunku 4.

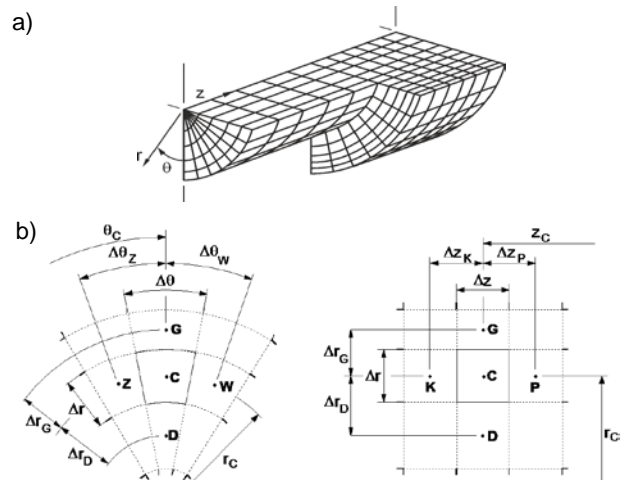


Rys. 4. Schemat blokowy układu regulacji nadążnej

W układzie regulacji obecne są dwie pętli regulacji. Pętla wewnętrzna zawiera model serwonapędu o transmitancji G_N oraz regulator proporcjonalno-całkujący. Układ regulacji położeniem krawędzi skrawającej ściernicy zrealizowano w oparciu o moduł sterownika ruchu QD75D4 dla sterownika PLC serii Q Mitsubishi. Zewnętrzna pętla regulacji dla procesu szlifowania obejmuje natomiast regulator proporcjonalno-całkujący PI o transmitancji G_{PI} oraz model procesu szlifowania, którego transmitancja dla wielkości wyjściowej $r_w(t)$ jest w tym przypadku funkcją czasu.

Modele procesu szlifowania

W celu realizacji postawionych celów dla systemu sterowania geometrycznego opracowano modele odkształceń sprężystych i cieplnych obrabianego przedmiotu. Na rysunku 5 przedstawiono model cieplny szlifowanego przedmiotu opracowany z użyciem metody elementów skończonych [1].



Rys. 5. Model cieplny przedmiotu: a) trójwymiarowa siatka elementów skończonych dla jednej ćwiartki obrabianego przedmiotu, b) podział przedmiotu na elementy skończone odpowiednio w przekroju poprzecznym i wzdłużnym

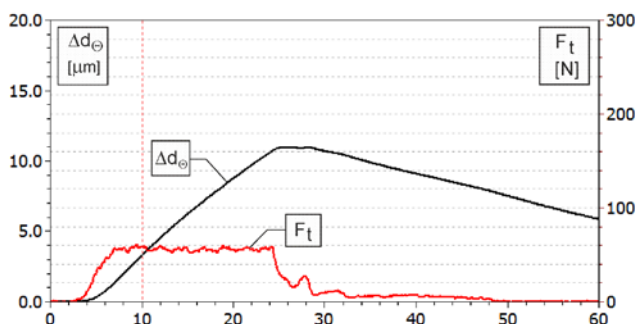
Przyrost temperatury dla poszczególnych elementów skończonych wyznaczony został według zależności opisanych w pracy [2]. Na podstawie rozkładu temperatury w objętości szlifowanego materiału możliwe jest wyznaczenie promieniowych odkształceń cieplnych na danej pozycji kątowej przedmiotu $\Delta r_\phi(\varphi)$ lub średnich średnicowych odkształceń cieplnych przedmiotu Δd_ϕ . Przykładowo średnie średnicowe odkształcenie cieplne może być wyznaczone według następujących zależności:

$$\Delta d_\phi = 2\alpha R_w(T_n - T_r)$$

$$T_n = \frac{1}{\pi R_w^2 \Delta z_n} \int_0^{2\pi} \int_0^R T(r, \varphi, z, t) r dr d\varphi \quad (4)$$

w których: α – współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału przedmiotu, R_w – średni promień przedmiotu, T_n – średnia temperatura przedmiotu na danej pozycji osiowej, T_r – temperatura referencyjna ($T_r = 20^\circ\text{C}$), Δz_n – szerokość elementu skończonego na n -tej pozycji osiowej, $T(r, \varphi, z, t)$ – rozkład temperatury w objętości szlifowanego materiału, r – współrzędna promieniowa przedmiotu.

Przykładowy przebieg zmian średnicy przedmiotu w funkcji składowej stycznej siły szlifowania przedstawiono na rysunku 7 (średnica przedmiotu $d_w=110$ mm).

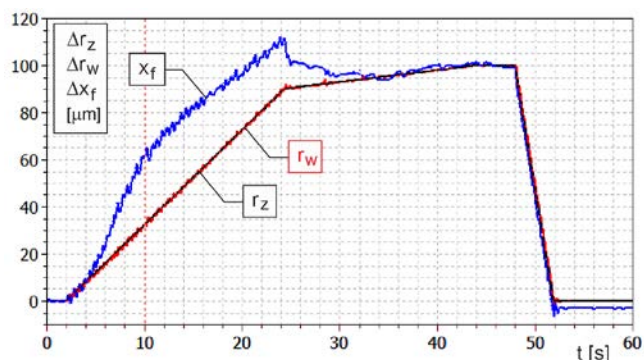


Rys. 6. Przebieg zmian przyrostu ciepłego średnicy przedmiotu Δd_ϕ na tle zmian składowej stycznej siły szlifowania

Do budowy modelu podatności obrabianego przedmiotu wykorzystano metodę elementów skończonych [1]. Z wykorzystaniem tej metody przedmiot zastąpiono elementami belkowymi o czterech stopniach swobody. Macierzowe równanie przemieszczeń rozwiązywano w wykorzystaniem numerycznej metody Choleskiego dla układów równań liniowych [6].

Wyniki działania systemu

W celu weryfikacji działania opracowanego systemu kompensacji zakłóceń przeprowadzono próby szlifowania według przyjętego optymalnego cyklu szlifowania. Szlifowano próbki o średnicy około 110 mm wykonane ze stali 38HMJ ulepszonej do twardości 53 HRC. Do prób użyto klasycznej ściernicy elektrokorundowej 38A60K5VBE. Na rys. 7 przedstawiono przebiegi rzeczywistej pozycji ściernicy oraz zadanego i rzeczywistego promienia przedmiotu wychodzącego ze strefy obróbki.

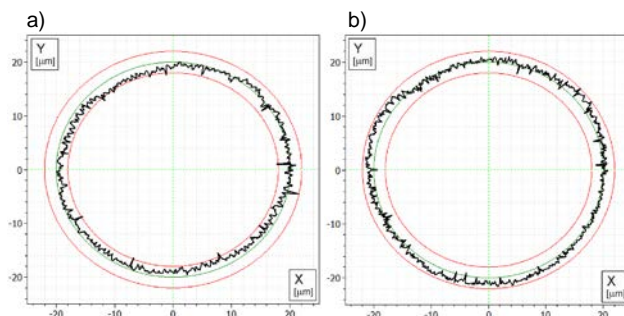


Rys. 7. Zmiany rzeczywistej pozycji ściernicy oraz zadanego i rzeczywistego promienia przedmiotu względem pozycji początkowej z kompensacją odkształceń sprężystych i cieplnych.

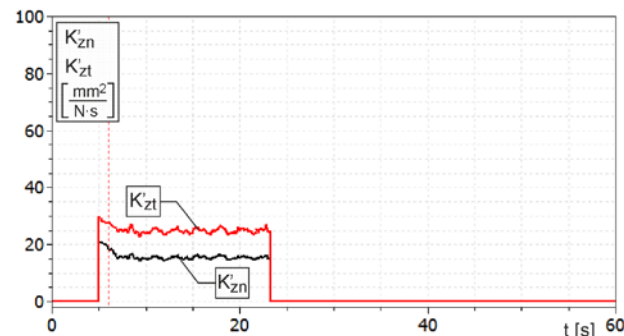
Na rysunku 8 przedstawiono z kolei zarejestrowane zarysy przedmiotu dla klasycznego cyklu szlifowania z długim czasem wyiskrzania oraz w przypadku szlifowania z systemem kompensacji zakłóceń.

Widać, że w obu przypadkach błędy zarysu przedmiotu nie przekraczają ± 2 μm , przy czym w klasycznie prowadzonym cyklu szlifowania pozostawał nieusunięty naddatek o wartości około 20 μm .

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi zmian estymat zdolności skrawnej ściernicy w fazie szlifowania zgrubnego cyklu szlifowania.



Rys. 8. Zarysy przedmiotu dla: a) klasycznego cyklu szlifowania z długim czasem wyiskrzania (czas trwania ok. 2 min); b) cyklu szlifowania z kompensacją zakłóceń (czas trwania ok. 30 s).



Rys. 9. Zmiany estymat zdolności skrawnej w fazie szlifowania zgrubnego dla składowej stycznej i normalnej siły szlifowania

Podsumowanie

Opracowane algorytmy kompensacji zakłóceń pozwalają na znaczne skrócenie trwania cyklu szlifowania przy zachowaniu wysokich parametrów geometrii przedmiotu i stanu warstwy wierzchniej. Opracowany model odkształceń cieplnych przedmiotu pozwala na kompensację tych odkształceń i prowadzenie usuwania naddatku obróbkowego względem wymiaru skorygowanego do temperatury otoczenia. Opracowano algorytmy umożliwiające identyfikację wszystkich parametrów procesu istotnych z punktu widzenia bieżącej diagnostyki stanu procesu i narzędzia, tj. rzeczywistej grubości warstwy skrawanej i zdolności skrawnej ściernicy.

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

1. Kruszewski J., Gawroński W., Wittbrodt E., Najbar F., Grabowski S., Metoda sztywnych elementów skończonych, Arkady, 1975.
2. Kruszyński B., Lajmert P., An intelligent supervision system for cylindrical traverse grinding, Annals of the CIRP, Vol. 54/1, 2005.
3. Lajmert P., Ostrowski D., Sikora M., Kruszyński B., Stanowisko do badania procesu szlifowania wgłębnego wałków. VI Międzynarodowa Konf. Naukowo-Techniczna METROLOGIA W TECHNIKACH WYTWARZANIA, Mechanik, nr 8/9, 195-202, 2014.
4. Oczko K.E., Porzycki J., Szlifowanie. WNT Warszawa, 1986.
5. Ornaf A., Adaptacyjne sterowanie wieloparametrowe optymalizujące proces szlifowania kłowego wałków, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 1995.
6. Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B., Numerical recipes: the art of scientific computing. Cambridge Univ. Press, 2007.
7. Salje E., Bode H. O., New method to control grinding processes, Modelling, Sensing and Control of Manufacturing Processes. The Winter Annual Meeting of ASME, 181-188, 1986.