

УДК 621.43  
UDC 621.43

**ZMIENY WSKAŹNIKÓW ODCHYLEK UZĘBIENIA I CHROPOWATOŚCI  
POWIERZCHNI PO WYGŁADZANIU ŚCIERNO-CHEMICZNYM W WYGŁADZARCE  
POJEMNIKOWEJ WIBRACYJNEJ KÓŁ ZĘBATYCH DASZKOWYCH**

MICHALSKI Jacek, Prof. Dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska

**ЗМІНИ ПОКАЗНИКІВ ВІДХИЛЕННЯ ДЛЯ ЗУБІВ І ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ  
ШЕВРОННИХ ШЕСТЕРЕНЬ ПІСЛЯ АБРАЗІВНО-ХІМІЧНОГО ХОНІНГУВАННЯ В  
ПОЛІРУВАЛЬНІЙ МАШИНИ ВІБРАЦІЙНОГО ТИПУ**

МІХАЛЬСЬКІ Яцек, Професор, Доктор габілітований, Жешовська Політехніка, Жешув,  
Польща

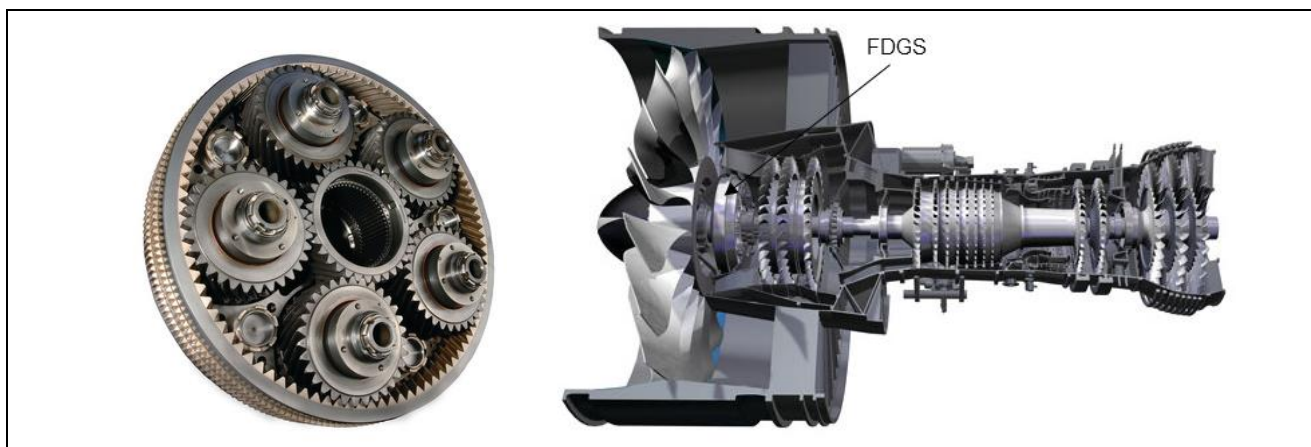
**CHANGES OF DEVIATION INDICATORS FOR TEETH AND SURFACE ROUGHNESS  
OF CHEVRON GEARS AFTER ABRASIVE-CHEMICAL HONING IN VIBRATING CONTAINER  
SMOOTHING MACHINE**

MICHALSKI Jacek, Prof. DSc, Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland

**Wstęp.** Twórcy przekładni środków transportu, silnie obciążonych, ciągle poszukują innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, zwłaszcza spełniających kryteria funkcjonalności i wysokiego poziomu niezawodności. Koła daszkowe znalazły szerokie zastosowanie w walcowych i obiegowych (planetarnych) przekładniach turbin gazowych, napędzie głównym statków, maszynach drogowych, ziemnych i górniczych [8]. Przykładem może być zębata przekładnia obiegowa FDGS (ang. Fan Drive Gear System) (rys. 1) silnika turbowentylatorowego [29]. Zapewnia ona znaczące zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji statków powietrznych, zmniejszenie zużycia paliwa, obniżenie poziomu hałasu oraz emisji dwutlenku węgla, tlenków azotu i kosztów eksploatacji. Przekładnie zębate z kołami daszkowymi (strzałkowymi) zapewniają wysoką dokładność geometryczną przełożenia, płynną pracę z bardzo dużym momentem obrotowym, niewielkie siły osiowe, użytkowanie przy zmiennej prędkości obrotowej z równocześnie małym poziomem drgań i niewielką hałaśliwość [1, 3, 7, 24]. Koła daszkowe mają zwykle modyfikowany zarys i linię zęba [12, 24] oraz niekiedy zmienny moduł zęba [7]. Obróbką cieplno-chemiczną jest najczęściej nawęglanie [6, 17]. Proponuje się także stosowanie powłok na powierzchni bocznej zębów [11].

Rozpatrywany w publikacji sposób wygładzania ścierno-chemicznego stali węglowej polega na tworzeniu kompleksowego związku chemicznego (powłoki konwersyjnej), o małej twardości i małym zużyciu objętościowym, i jej obróbce ubytkowej (ścieraniu) za pomocą materiału kształtek z tworzywa sztucznego i innych, w wygładzarce pojemnikowej wykonującym ruch wibracyjny [25]. Cieczą technologiczną są kwaśne wodne roztwory, o pH 5,0-5,5, fosforanu alkilowego, szczawianów, sulfaminianów i ich mieszanin oraz jednego lub więcej czynników chelatujących, często kwasu i jego soli: cytrynowego, etylenodiaminotetraoctowego (EDTA), nitylotrójoctowego (NTA), glukonowy oraz ich mieszaniny, zawierającej ponadto inhibitor korozji [12, 25]. Płyn zraszający przepływa przez pojemnik wygładzarki, z wydatkiem 0,25-0,60 litra na godzinę na metr sześcienny objętości zbiornika [25]. Stosunek wagowy środków chelatujących do składników wytwarzających powłokę konwersyjną wynosi korzystnie od około 1,3 : 1 do około 1,7: 1. Łączna masa środków zwilżających jest mniejsza niż 1,25% masa kształtek ściernych. Wygładzanie ścierno-chemiczne znalazło zastosowanie do obróbki wykończeniowej i ostatecznej elementów z różnych materiałów. Kształtki wykonane przez REM Technologies Inc. mają wielkość 3-5 mm i kształty: ostrosłupa o podstawie kwadratu, walca i graniastosłupa o podstawie trójkąta równoramiennego oraz inny. Ich materiałem to tworzywa sztuczne lub tlenki glinu spajane nienasyconą żywicą poliestrową [5]. Kształtki z ciężkiej porcelany cyrkonowej to specjalna grupa kształtek do obróbek wspomaganych chemicznie [26]. Według opisu patentów, materiał kształtek ma małe zużycie objętościowe, jest nieścieralny, co oznacza, iż podczas wygładzania wibracyjnego traci mniej niż 0,1% swojej masy na godzinę i zapewniają osiągnięcie określonej chropowatości powierzchni dogładzanych elementów maszyn. Przepływ kształtek był także modelowany elementami skończonymi [18]. Rozwinięciem wygładzenia pojemnikowego roto-wibracyjnego (ang. wibratory mass finishing) jest metoda wygładzania pojemnikowego wibracyjnego

według technologii Isotropic Finishing ISF®, firmy REM Chemicals Inc. Mała wysokość chropowatości powierzchni boków zębów i właściwości warstwy wierzchniej zapewniają małe straty tarcia, niskie obciążenie cieplne, wysokie graniczne naciski zatarcia, dużą wytrzymałość na zużycie poprzez pitting oraz wytrzymałość kontaktową [11, 20, 21, 23]. Z kolei mała wartość widmowej gęstości mocy nierówności powierzchni boków zębów wpływa na cichobieżność i niski poziom drgań przekładni [15].



Rys. 1. Silnik turbowentylatorowy z przekładnią planetarną FDGS umiejscowioną pomiędzy wentylatorem a sprężarką niskiego ciśnienia i turbiną [29]

Pojemnikowe wygładzenie wibracyjne uzębienia o izotropowej topografii powierzchni było proponowane w pracach [4, 9, 19, 28] oraz obecnie przez firmy REM Technologies Inc., OSRO GmbH, Rösler Oberflächentechnik GmbH, MARBAD sp. z o.o Zakład Technik Obróbki Powierzchni [20, 21, 26].

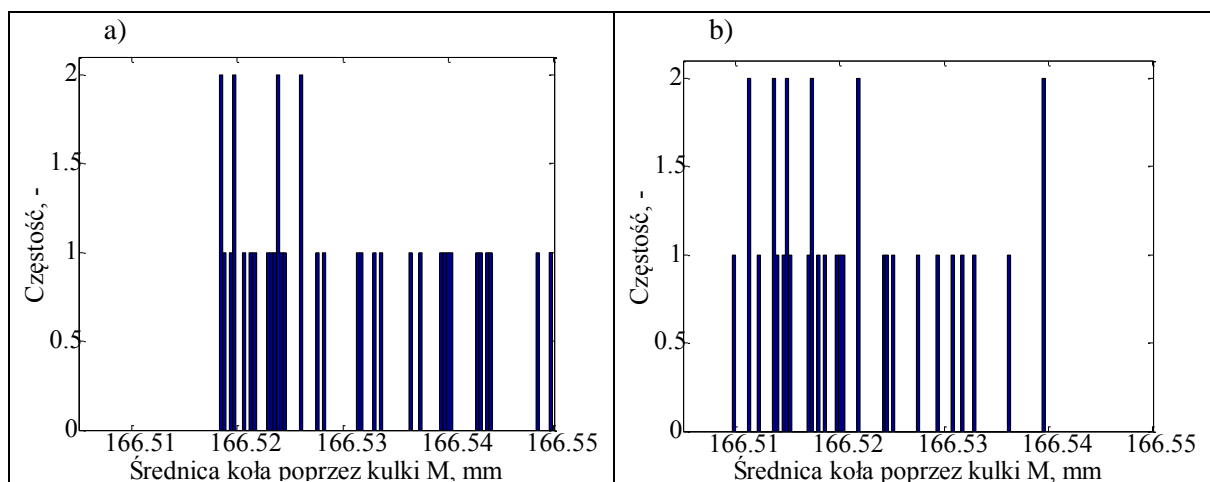
Najbardziej obciążone koła zębate przekładni lotniczych wykonywane są ze stali nawęglanych i hartowanych: AISI 9310 według AMS 6260G oraz obecnie stali Pyrowear 53, według AMS 6308 - stopowej wtórnie utwardzanej niklowo-chromowo-molibdenowej z dodatkiem miedzi [17]. Najbardziej obciążone obustronnie w reduktorze są koła obiegowe [14]. Popularne metody obwodniowe, kształtowe i kopiowe obróbki ubytkowej kół w stanie miękkim i twardym to: frezowanie, dłutowanie, wiórkowanie, szlifowanie, gładzenie, dogładzanie, wygładzanie w masie ścierniej, wygładzanie pojemnikowe, docieranie, kulkowanie strumieniowe, obróbka magnetyczno ścierna, elektrochemiczna, nagniatanie i inne [2, 9, 27]. Spośród metod szlifowania uzębienia największą dynamikę rozwoju mają metody kształtowe (profilowe) a z obróbki wiórowej dłutowanie i wiórkowanie [10].

Warunki badań. Półfabrykatem kół obiegowych były pręty ze stali Pyrowear 53, walcowane na gorąco i zimno o twardości 272 HB. Pręty wykonano z materiału wsadowego najwyższej jakości wytopu, w próżniowym wytapianiu indukcyjnym z wtórnym przetapianiem, w próżniowym piecu łukowym z przetapialną elektrodą. Otoczki kół poddano wyżarzaniu normalizującemu, austenizacji, hartowaniu i odpuszczaniu wysokiemu, uzyskując twardość 28-32 HRC. Uzębienie dwóch wieńców kół uzyskano metodą Sykesa, dłutakami garnkowymi firmy Lorenz. Stosowano metodę obróbki posuwu wgłębny z posuwem obrotowym. Następnie poddano koła nawęglaniu, hartowaniu, wymrażaniu i odpuszczaniu. Stosowano przed nawęglaniem aktywację powierzchni poprzez obróbkę strumieniowo-ścierną korundem, wstępną oksydację, odtłuszczenie i trawienie. Nawęglanie dwustopniowe, o potencjale węgla 1,2% i 0,9%, w temperaturze 950 °C, przeprowadzono w mieszaninie endotermicznej wzbogaconej metanem, z nadciśnieniem 2 hPa przez 6 godzin. Potencjał węglowy kontrolowano za pomocą sondy tlenowej umieszczonej w retorcie pieca wgłębego. Ochronna warstwa miedzi na powierzchniach nie nawęglanych miała grubość 30-40 μm. W piecu z obrotowym trzonem w temperaturze 912 °C przeprowadzono austenizację. Hartowano koła w oleju na prasie. Wymrażanie trwało 4 godziny w temperaturze -70 °C. Odpuszczanie dwustopniowe, po 2,5 godziny, przeprowadzono w temperaturze 232 °C. Proces obejmował także operacje mycia i usuwania warstwy miedzi. Szlifowanie uzębienia metodą kształtową Kappa przeprowadzono na szlifierce VAS 432 CNC z układem sterowania Optronic CNC-D140. Zastosowano ściernicę o średnicy 28 mm z regularnego azotku boru CBN 100 firmy Winterthur Schieftechnik. Stosowano wygładzarkę pojemnikową wibracyjną VBTH 600/3 produkcji włoskiej, Vibrochimica s.r.l. Macchine e prodotti per la finitura di metalli. Około 80% objętości pojemnika trochoidalnego otwartego była wypełniona kształtkami z tworzywa sztucznego. Kształtki stożkowe, walcowe i graniastosłupowe o podstawie trójkątna równobocznego, wielkość 3-5 mm, wykonano z tlenku glinowego związanego nienasyconą żywicą poliestrową. Drgania przestrzenne pojemnika miały częstotliwość 45 Hz. Kąt wzniosu linii śrubowej przemieszczeń wynosił 65° oraz amplituda drgań 4,5

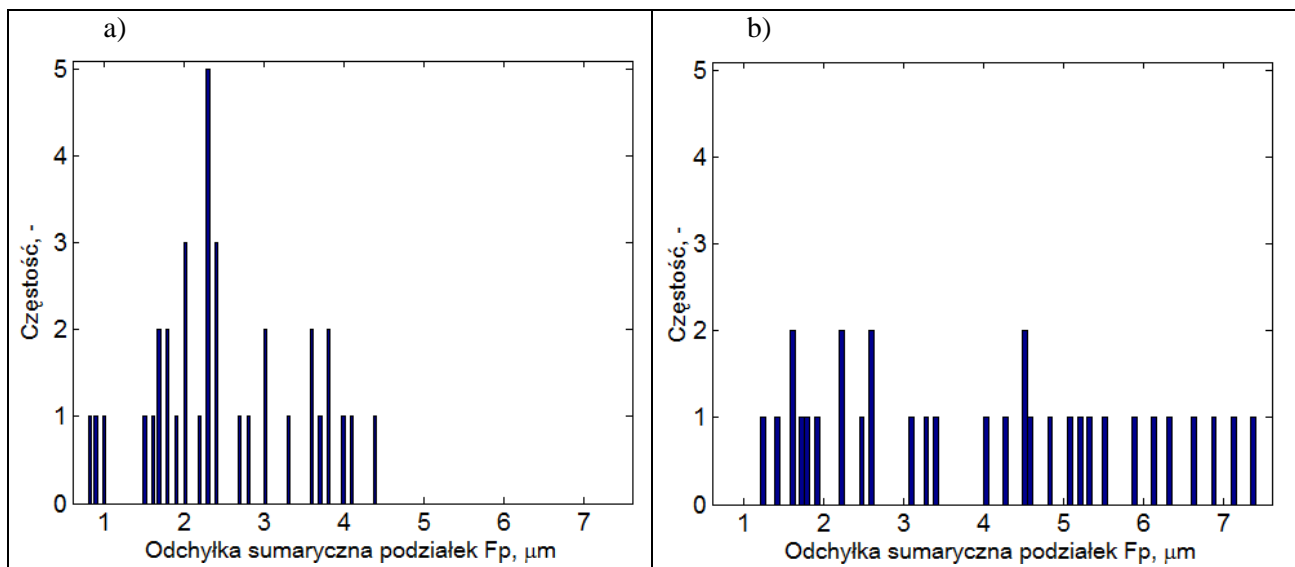
mm. Ciecz nawilżająca ze środkami chemicznymi była wprowadzana z natężeniem przepływu 36 dm<sup>3</sup>/h oraz odprowadzona z natężeniem 2 dm<sup>3</sup>/h, odpowiednio. Równocześnie obrabiano dziewięć kół daszkowych. Kolejno stosowano wodny roztwór cieczy: Ferromil FML-630 o kwasowości pH=5,6 przez 120 min, Ferromil Brunish compaind, obojętny pH=7 przez 10 min, Ferromil ABC-218, zasadowy pH=9,6 przez 120 min oraz mycie benzyną z inhibitorem korozji przez 10 min. Procesami elementarnymi obróbki luźnymi kształtkami w wygładzarkach pojemnikowych są: ścieranie mechaniczne, odłamywanie, mikroskrawania, nagniatanie, polerowanie i roztwarzanie anodowe [9]. Pierwszy okres to ścieranie mechaniczne i mikroskrawanie powstających na powierzchni obrabianej kół zębatych powłok konwersyjnych i utworzonego chylatu, czyli kompleksowego związku chemicznego o cząsteczce złożonej z organicznej struktury pierścieniowej wielopodstawnego ligandu i związanego z nią kilkoma wiązaniami jonu centralnego - kationu metalu. Zapewnia to skład chemiczny mieszaniny zawierającej aktywne czynniki, korzystnie fosforan alkilowy i kwas cytrynowy [25]. Drugi etap to wypompowanie Ferromil FML-630 i neutralizacja. Trzeci etap obróbki to procesy fizyczno-chemiczne i anodowe, w łagodnym środowisku zasadowym - wygładzania, zgniotu i wybłyszczenia. Nieobrabiane powierzchnie kół osłonięto wkładkami elastomerowymi. Zgłady metalograficzne wycinków uzębienia po wygładzaniu pojemnikowym przygotowano z użyciem urządzeń firmy Struers. W badaniach materiałowych wyciętych próbek z kół daszkowych stosowano twardościomierz Vickersa, Rockwella i mikrotwardościomierz Matsuzawa Seiki Co., Ltd., mikroskop świetlny Nikon Epiphot 300, optyczny spektrometr emisyjny ze wzbudzeniem jarzeniowym GD-Profilier HR HR Horiba Jobin-Yvon - do określenia objętości względnej austenitu szczątkowego i pomiaru stężenia węgla w warstwie nawęglanej, dyfraktometr rentgenowski i XRD - do wyznaczenia naprężeń własnych metoda  $\sin^2\Psi$  wzdłuż zarysu zęba.

Tabela 1. Wybrane parametry geometryczne koła daszkowego

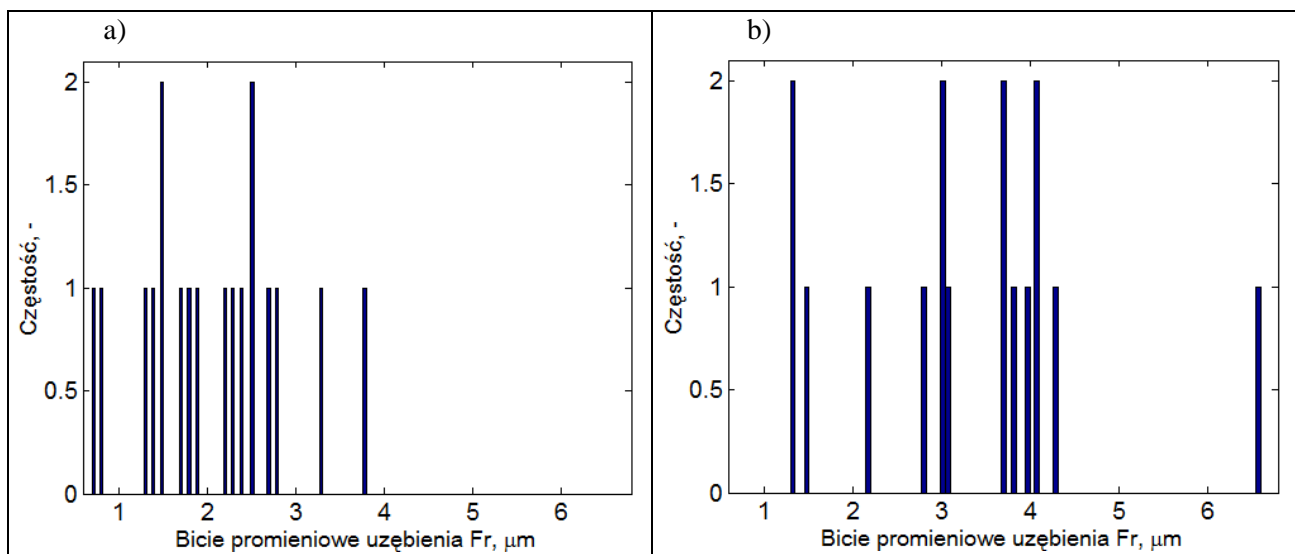
Liczba zębów, $z$ [-]	33
Moduł nominalny, $m_n$ [mm]	3,9214
Kąt pochylenia linii zęba, $\beta$ [°]	34
Kąt pochylenia linii zęba na walcu zasadniczym, $\beta_b$ [°]	31,106
Kąt zarysu w przekroju czołowym, $\alpha_0$ [°]	22,5
Podziałka czołowa, $p_t$ [mm]	14,8599
Średnica wierzchołków, $d_a$ [mm]	165,2016- 165,2549
Średnica podziałowa, $d$ [mm]	156,0921
Średnica podstaw, $d_f$ [mm]	144,5260- 144,7317
Średnica zasadnicza, $d_b$ [mm]	139,6334
Szerokość uzębienia, $b$ [mm]	45,3898



Rys. 2. Histogram wartości średnicy koła zębatego  $M$  poprzez kulki  $\Phi$  7,0993 mm, po: a) szlifowaniu ( $166,5268 \pm 0,0040$ ), b) dodatkowym wygładzaniu ( $166,5230 \pm 0,0039$ ) - w nawiasie wartość średnia i niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95%,  $\mu\text{m}$



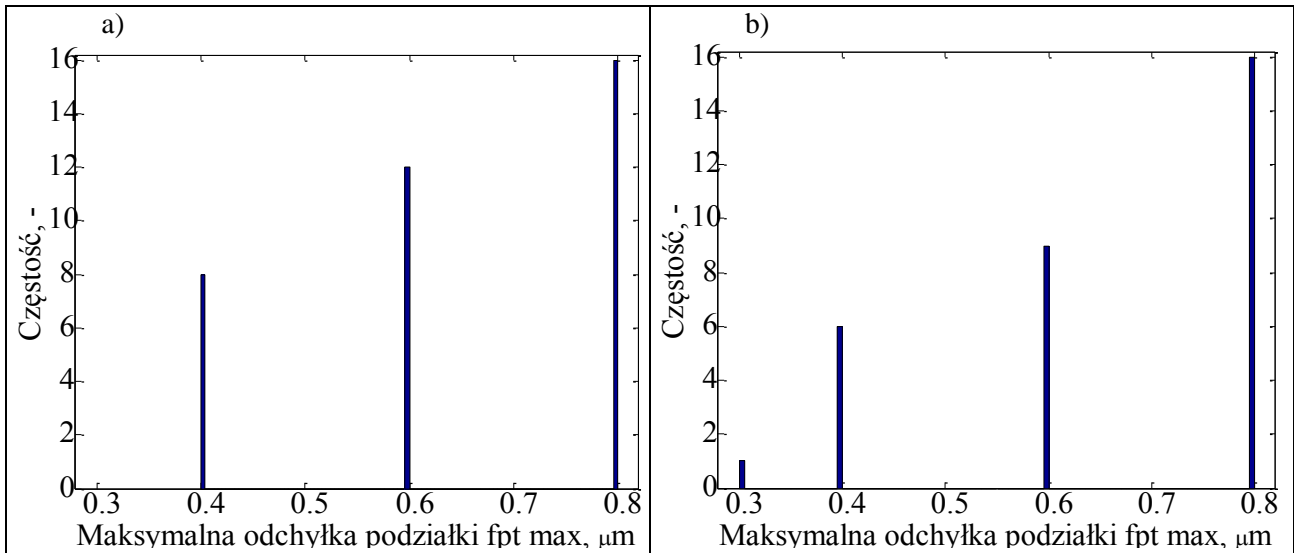
Rys. 3. Histogram wartości odchyłki sumarycznej podziałek koła  $F_p$  po: a) szlifowaniu (lewe boki  $1,97 \pm 0,57$ , prawe boki  $2,82 \pm 0,64$ ) i b) wygładzaniu (lewe boki  $3,04 \pm 0,91$ , prawe boki  $4,75 \pm 1,42$ ) - w nawiasie wartość średnia i niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95%,  $\mu\text{m}$



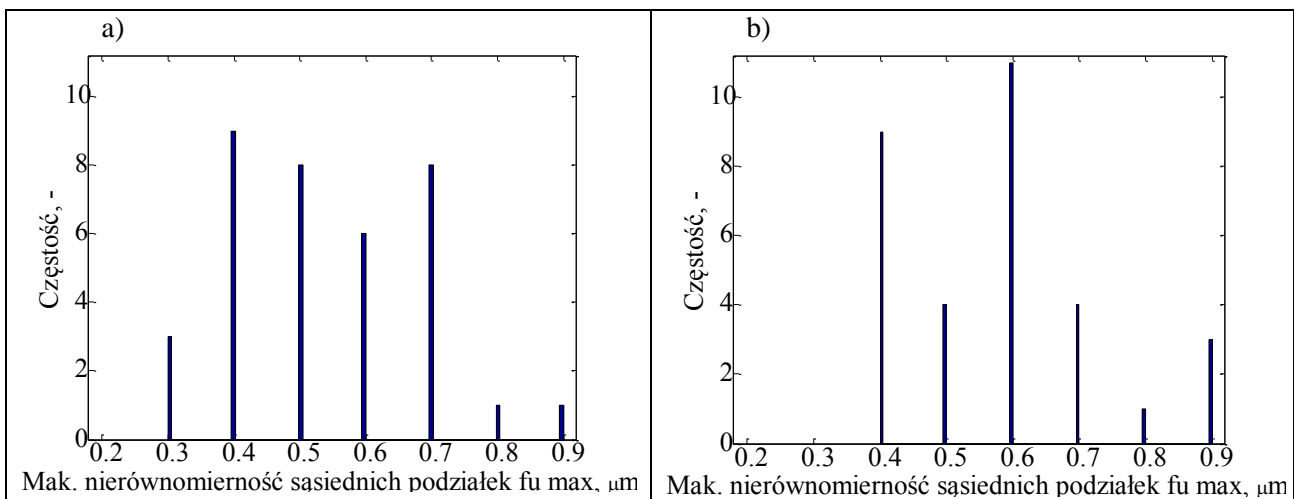
Rys. 4. Histogram wartości bicia promieniowego uzębienia  $F_r$  po: a) szlifowaniu ( $1,82 \pm 0,59$ ) i b) wygładzaniu ( $3,31 \pm 0,78$ ) - w nawiasie wartość średnia i niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95%,  $\mu\text{m}$

Kształt stereometryczny boków zębów kół zębatych zmierzono współrzędnościową maszyną pomiarową CNC, model PNC 40 firmy Klingelnberg Söhne. Trzpień pomiarowy był zakończony rubinową kulą o średnicy 2,032 mm. Bazą pomiaru koła był otwór łożyska ślizgowego. Mierzono parametry pozwalające na ocenę dokładności kinematycznej i płynności pracy, takie jak:  $f_{pt\ max}$  - maksymalna odchyłka podziałki,  $F_p$  - odchyłka sumaryczna podziałek koła,  $F_r$  - bicie promieniowe uzębienia,  $f_{u\ max}$  - maksymalna nierównomierność sąsiednich podziałek,  $R_p$  - zakres zmian podziałek [16]. Z uwagi na modyfikację zębów koła, odchyłkę zarysu zęba i odchyłkę kierunku linii zęba oceniano położeniem w obszarze tolerancji i falistością kształtu. Wyznaczono także średnicę koła zębatego M poprzez przeciwległe kulki o średnicy 7,0993 mm, według AGMA 239.03. Chropowatość powierzchni koła mierzono profilometrem Mahr MFW250, końcówką pomiarową o promieniu 2  $\mu\text{m}$  i kącie wierzchołkowym 90°. Odcinek pomiarowy wzdłuż zarysu zęba wynosił 0,25 mm oraz wzdłuż linii zęba 0,8 mm. Stosowano filtr pasmowy Gaussa o przenoszeniu 1:300. Wyniki pomiarów geometrycznych oszacowano wartością średnią i niepewnością rozszerzoną, typu A, przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia 1,96.

**Przebieg badań i wyniki pomiarów.** Uzębienie kół miało twardość powierzchni warstwy nawęglonej po wygładzaniu pojemnikowym 82,1-82,6 HRA. Jej efektywna głębokość to 0,78-1,00 mm, dla umownej granicy twardości powyżej 513 HV500. Stężenie węgla w warstwie nawęglonej wynosiło 0,85-0,88%. Z kolei twardość rdzenia kół miała wartość 36-37 HRC i strukturę sorbitu o wielkości ziarna 6,5-7  $\mu\text{m}$ . Z kolei składnikami struktury metalograficznej warstwy nawęglonej był martenzyt odpuszczony, austenit szczątkowy i węgliki. Objętość względna austenitu szczątkowego w warstwie nawęglonej oceniono na 5,2-5,6%. Głębokość międzykrystaliczna utlenienia powierzchni nawęglonej nieobrobionej zawarta była w zakresie 3-13  $\mu\text{m}$ . Naprężenia własne wzdłuż zarysu zębów, na średnicy podziałowej wynosiły (-127)-(-203) MPa oraz wzdłuż linii zębów na średnicy dna wrębów, w środku wieńców, (-189)-(-242) MPa.

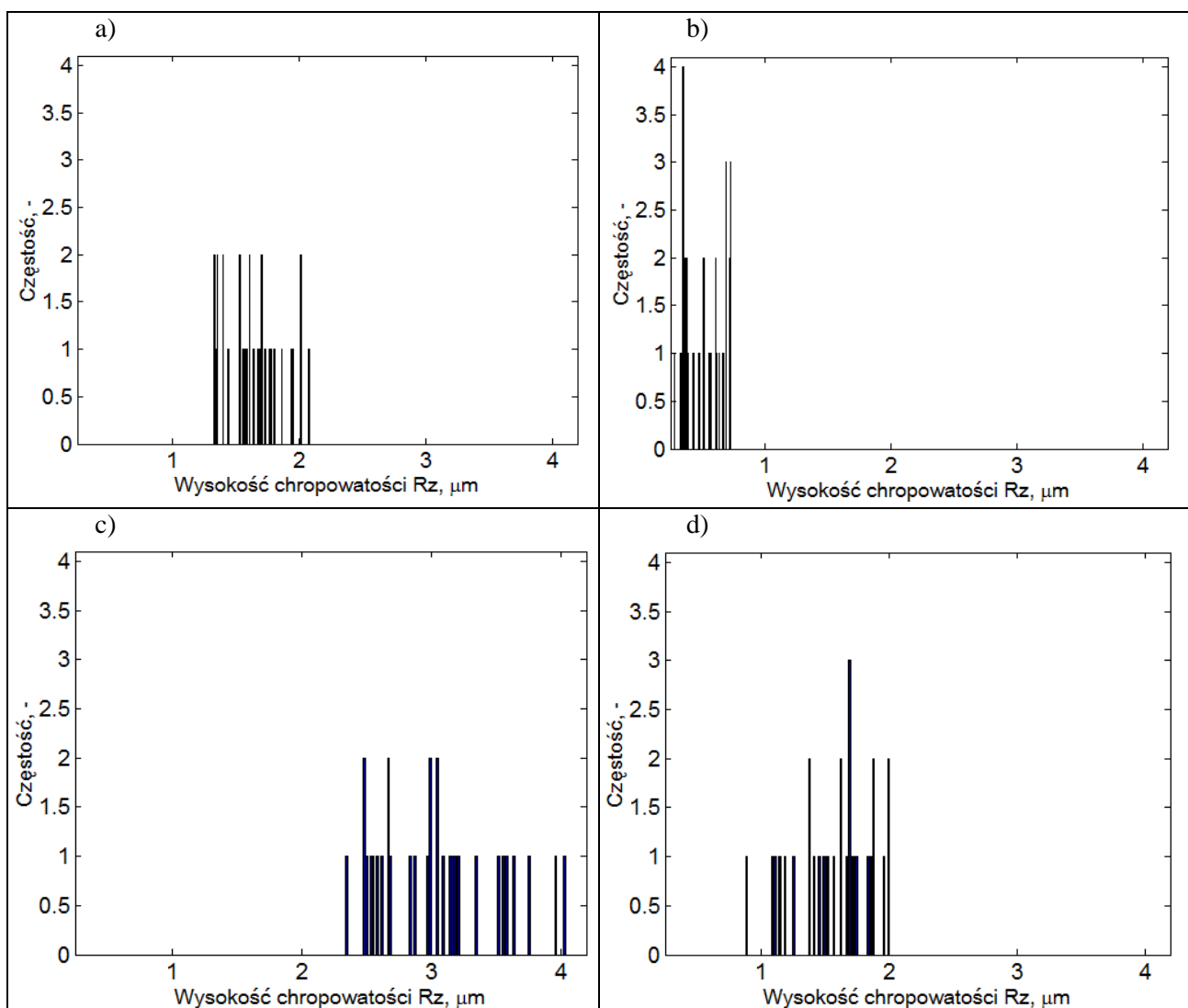


Rys. 5. Histogram wartości maksymalnej odchyłki podziałki  $f_{pt\ max}$  po: a) szlifowaniu (lewe boki  $0,60 \pm 0,12$ , prawe boki  $0,62 \pm 0,13$ ), b) wygładzaniu (lewe boki  $0,65 \pm 0,11$ , prawe boki  $0,68 \pm 0,14$ ) - w nawiasie wartość średnia i niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95%,  $\mu\text{m}$



Rys. 6. Histogram wartości maksymalnej nierównomierności sąsiednich podziałek  $f_{u\ max}$  po: a) szlifowaniu (lewe boki  $0,58 \pm 0,04$ , prawe boki  $0,51 \pm 0,13$ ), b) wygładzaniu (lewe boki  $0,51 \pm 0,13$ , prawe boki  $0,56 \pm 0,13$ ) - w nawiasie wartość średnia i niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95%,  $\mu\text{m}$

Parametry badanego koła daszkowego wyszczególniono w tablicy 1. Histogramy wartości wskaźników odchyłek kół zamieszczono na rysunkach 2-6. Wygładzanie pojemnikowe, w porównaniu ze szlifowaniem, powoduje względne zwiększenie: bicia promieniowego uzębienia  $F_r$ , o 59%, zakresu zmian odchyłek  $R_p$ , o 33% oraz odchyłki sumarycznej podziałek  $F_p$ , o 28%. Niewielkie względne zwiększenie o 7% dotyczy maksymalnej nierównomierności sąsiednich podziałek  $F_{u\max}$  i o 2% maksymalnej odchyłki podziałki  $f_{pt\max}$ . Histogram oraz wartości wysokość chropowatości powierzchni  $R_{zJIS}$  zawiera rysunek 7. Wygładzanie pojemnikowe kształtuje nową izotropową strukturę geometryczną powierzchni uzębienia. W wyniku wygładzania pojemnikowego, w porównaniu do szlifowania, ulega zmniejszeniu względna wysokość chropowatości boków zębów  $R_{zJIS}$  o 68-71%. Wręby zębów zmniejszą względną wysokość chropowatości o 49-63%. W badanych warunkach, wygładzania pojemnikowego usunięto średni naddatek obróbki, wyrażony zmianą średnicy koła poprzez przeciwległe kulki o  $\Delta M=0,0105$  mm. Odchylenie zarysu zębów koła szlifowanego i wygładzanego pojemnikowo wskazuje na odmienną wydajność obróbki na powierzchni boku zęba, zwłaszcza wzdłuż zarysu, o większej wartości przy głowie zęba, o 1,5-2  $\mu\text{m}$ . Wynika to ze wskaźników: nacisku jednostkowego i predyspozycji obróbki, przez kształtki [3, 9]. Odchylenie linii zębów koła szlifowanego i wygładzanego ulega niewielkiej zmianie.



Rys. 7. Histogram wysokość  $R_{zJIS}$  chropowatości powierzchni boków zębów (a, b), stopy zębów (c, d), po (a, c) szlifowaniu (lewy bok  $1,618 \pm 0,100$ , prawy bok  $1,670 \pm 0,115$ , stopa  $1,670 \pm 0,115$ ) i (b, d) dodatkowym wygładzaniu (lewy bok  $0,519 \pm 0,072$ , prawy bok  $0,521 \pm 0,079$ , stopa  $0,563 \pm 0,103$ )



**Podsumowanie.** Stwierdzono, że przedstawiona technologia produkcji kół zębatach daszkowych zębatej przekładni obiegowej, zapewnia ich najwyższą klasę dokładności o numerze 0 lub 1. Jest to technologia droższa o większej pracochłonności niż gładzenie (honowanie) uzębienia oraz nie umożliwia dokonywanie korekcyjnych odchyłek kształtu [12, 22]. Powoduje duże zwiększenie względnie wskaźników odchyłek uzębienia  $F_r$ ,  $R_p$ ,  $F_p$ , o 26-59%. Histogramy wskaźników odchyłek zębów charakteryzują się większymi i niekorzystnymi zakresami zmian. W niewielkim stopniu, 2-7%, zwiększają się odchyłki  $f_{pt\ max}$  i  $f_{u\ max}$ . Grubość warstwy skrawanej wzdłuż linii zęba jest raczej równomierna, natomiast wzdłuż zarysu zęba nierównomierna, większa przy głowie zęba, o 1,5-2  $\mu\text{m}$ . Wymaga to odpowiedniej modyfikacji ściernicy. Zarys i linia zęba wykazuje zmniejszenie wysokości falistości, są one geometrycznie bardziej gładkie. Występuje zmiana struktury geometrycznej powierzchni na lustrzaną izotropową, o małej wysokości. Średnia wysokość  $R_{zJS}$ , boków zębów wynosi po wygładzaniu 0,520  $\mu\text{m}$  oraz wrębu międzyzębnego 0,563  $\mu\text{m}$ .

## LITERATURA

- [1] Che G.-J.: Numerical study on reducing the vibration of spur gear pairs with phasing. *Journal of Sound and Vibration*, 329 (19), 2010, s. 3915-3927.
- [2] Feld M.: Projektowanie procesu technologicznego elementów klasy koło zębate. [w:] Górski E. (koordynator): *Poradnik inżyniera - obróbka skrawaniem*, tom 3. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
- [3] Fernández A., Iglesias M., De-Juan A., García P., Sancibrián R., Viadero F.: Gear transmission dynamic: Effects of tooth profile deviations and support flexibility. *Applied Acoustics*, 77, 2014, s. 138-149.
- [4] Harasymowicz J., Wantuch (red.) E., *Obróbka gładkościowa: skrypt dla wyższych szkół technicznych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1994.
- [5] Holland J. D.: Nonabrasive media with accelerated chemistry. U.S. Patent No. 4,818,333 B24. Zgłoszenie 7 styczeń 2002. Właściciel, REM Technologies, Inc.
- [6] Kula P., Wołowicz E., Pietrasik R., Dybowski K., Klimek L.: The precipitation and dissolution of alloy iron carbides in vacuum carburization processes for automotive and aircraft applications-Part II. *Advanced Materials Research*, 486, 2012, s. 303-308.
- [7] Lin, C., Guo, Z., Chen, B., Zhu, C.: Study of new type herringbone gear with narrow tooth width and beveloid teeth. *Journal of Applied Sciences*, 13 (23), 2013, s. 5584-5593.
- [8] Liu C., Qin D., Liao Y.: Dynamic model of variable speed process for herringbone gears including friction calculated by variable friction coefficient. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 136 (4), 2014, 041006, s. 1-12.
- [9] Marciniak M., Stefko A., Szyrle W.: *Podstawy obróbki w wygładzarkach pojemnikowych*. WNT, Warszawa 1983.
- [10] Markowski T.: *Wiórkowanie: podstawy procesu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1996.
- [11] Michalczewski R.: *Właściwości tribologiczne smarowanych, wysokoobciążonych elementów maszyn pokrytych cienkimi powłokami niskotarciowymi*. Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2012.
- [12] Michaud M., Summers E. D.: Superfinishing large planetary gear systems. Patent US 8109854 B2, 28 maj 2004. Właściciel; REM Technologies, Inc., OSRO GmbH.
- [13] Michalski J., Pawlus P., Żelasko W.: Surface topography of cylindrical gear wheels after smoothing in abrasive mass, honing and shot peening. *Institute of Physics Publishing, Journal of Physics: Conference Series*, 311 (2011) 012022, s.1-5.
- [14] Müller L., Wilk A.: *Zębata przekładnie obiegowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [15] Naser Amini: *Gear surface machining for noise suppression*. Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Högskola, Chalmers Tekniska Högskola 1999.
- [16] PN-ISO 1328-1:2015: *Przekładnie zębata walcowe - Układ ISO tolerancji boków zębów - Część 1: Definicje i dopuszczalne wartości odchyłek boków zębów*. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 2015.
- [17] Raga K.: *Wpływ warunków procesu nawęglania próżniowego i wysokociśnieniowego hartowania gazowego na właściwości warstwy nawęglonej i podłoże stali AISI 9310 oraz Pyrowear 53 kół zębatach przekładni lotniczych*. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Rzeszów 2013. Promotor: prof. Jan Sieniawski.
- [18] Renouf M., Massi F., Fillot N., Saulot A.: Numerical tribology of a dry contact. *Tribology International*, 44 (7-8), 2011, s. 834-844.

- [19] Rodziewicz M.: Wyglądanie luźnym ścierniwem w pojemnikach. WNT, Warszawa 1964.
- [20] Sroka G., Winkelmann L.: Superfinishing gears - The state of the art. Gear Technology, 4 (11-12), 2003, s. 28-33.
- [21] Sroka G.J., Winkelmann L.: Superfinishing gears: The state of the art, part II. Gear Technology, 22 (4), 2005, s. 30-32.
- [22] da Silva S.P., Filho S.L.M.R., Brandão L.C.: Particle swarm optimization for achieving the minimum profile error in honing process. Precision Engineering, 38(4), 2014, s. 759-768.
- [23] Tuszyński W.: Problemy tribologicznych badań właściwości przeciwzatarciowych samochodowych olejów przekładniowych. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, Radom 2012.
- [24] Wang C., de Fang Z., Jia H.-T.: Investigation of a design modification for double helical gears reducing vibration and noise. Journal of Marine Science and Application, 9(1), 2010, s. 81-86.
- [25] Winkelmann L.W.: Active chemistry aqueous composition of conversion coating agents of phosphates, oxalates, sulfamates; chelating agents of citric acid, ethylene diamine tetraacetic acid, nitrilotriacetic acid, gluconic acid; machine parts vibrated with chemical polish added slowly in low volume. Patent US 7641744 B2. Zgłoszono 6 kwiecień 2006. Właściciel Rem Technologies, Inc.
- [26] Woźniak K.: Kształtki ceramiczne jako narzędzia robocze w roto-wibracyjnej obróbce powierzchni. Szkło i Ceramika, 5, 2011, s.
- [27] Wójcik Z.: Obróbka uzębień. [w:] Górski E. (koordynator): Poradnik inżyniera - obróbka skrawaniem, tom 3. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991.
- [28] Żebrowski H.: Techniki wytwarzania. Obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [29] <http://www.aviationpros.com/article/10617063/turbine-technology-innovations-in-turbine-engines>.

### STRESZCZENIE

MICHALSKI Jacek. Zmiany wskaźników odchyłek uzębienia i chropowatości powierzchni po wyglądaniu ścierno-chemicznym w wyglądzarce pojemnikowej wibracyjnej kół zębatach daszkowych / MICHALSKI Jacek // Wisnyk Narodowego Uniwersytetu Transportu. – K. : NUT, 2015. – № 32.

W artykule porównano wartości wskaźników odchyłek uzębienia kół daszkowych, przekładni obiegowej, po szlifowaniu kształtowym według metody Kappa, z ich wartościami, tych samych kół poddanych dodatkowemu wyglądzeniu według technologii Isotropic Finishing ISF®, firmy REM Chemicals Inc. Analizowano wartości wskaźników odchyłek dotyczących dokładności kinematycznej, płynności pracy i struktury geometrycznej powierzchni obrobionych zębów kół. Stwierdzono pogorszenie dokładności szlifowanego uzębienia i wystąpienie lustrzanej powierzchni boków zęba po obróbce w wyglądzarce pojemnikowej wibracyjnej. Wyglądzenie izotropowe ma także charakterystyczną odmienną wydajność obróbki na powierzchni boku zęba, zwłaszcza wzdłuż zarysu, o większej wartości przy głowie zęba. Stwarza to konieczność odpowiedniej modyfikacji powierzchni bocznej zębów w procesie szlifowania. Koła były wykonane ze stali Pyrowear 53 i poddane procesowi nawęglania, hartowania, obróbki podzerowej i odpuszczania niskiego.

### РЕФЕРАТ

МІХАЛЬСЬКІ Яцек. Зміни показників відхилення для зубів і шорсткості поверхні шевронних шестерень після абразивно-хімічного хонінгування в полірувальній машині вібраційного типу / МІХАЛЬСЬКІ Яцек // Вісник Національного транспортного університету. Серія “Технічні науки”. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2015. - Вип. 2 (32).

У статті порівнюються геометричні відхилення шевронних зубів планетарних редукторів після обробки відповідно до методу Карра, з тими ж значеннями для зубчастих коліс, що піддається додатковому поліруванню з використанням ізотропної технології обробки ISF®, REM Chemicals Inc. Були проаналізовані значення відхилень кінематичної точності, плавності і геометричної структури оброблюваних поверхонь зубів. Погіршення точності різання зубів і появи дзеркальної поверхні з боків зуба після обробки в машині вібраційного типу помічено не було. Ізотропне полірування також має різну продуктивність на бічній поверхні зуба, особливо вздовж форми лінії, з більш високими значеннями на вершині зуба. Це створює необхідність відповідної модифікації бічної поверхні зуба в процес обробки. Колеса були зроблені зі сталі Pyrowear 53 і піддавалися цементації, загартуванню, холодній обробці і низькотемпературному нагріванню.



### ABSTRACT

MICHALSKI Jacek. Changes of deviation indicators for teeth and surface roughness of chevron gears after abrasive-chemical honing in vibrating container smoothing machine. Visnyk National Transport University. Series “Technical sciences”. Scientific and Technical Collection. - Kyiv. National Transport University, 2015. - Issue 2 (32).

The article compares geometrical deviations for chevron teeth in planetary gear after grinding, according to the Kappa method, with the same values for wheels subjected to additional smoothing of the Isotropic Finishing ISF® technology, REM Chemicals Inc. The values of the deviations for the kinematic accuracy, smoothness and geometric structure of the machined surfaces of the wheel teeth were analyzed. Deterioration in the accuracy of cut teeth and the occurrence of the mirror surface on tooth sides after treatment in machine vibrating container were noticed. Isotropic smoothness has also different performance on the tooth side surface, especially along the shape line, with higher values at the head of the tooth. This creates the need for appropriate modification of the tooth side surface in grinding process. The wheels were made of steel Pyrowear 53 and subjected to a carburizing, quenching, cold working and low annealing treatment.

### AUTORZY:

MICHALSKI Jacek, Prof. dr hab. inż, Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100,35-959,Rzeszów, Polska

### АВТОРИ:

МІХАЛІВСЬКІ Яцек, Професор, Доктор габілітований, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100,35-959,Жешув, Польща

### AUTHORS:

MICHALSKI Jacek, Prof. DSc, Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

### РЕЦЕНЗЕНТИ:

Матейчик В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, декан автомеханічного факультету, Київ, Україна.

Гутаревич Ю.Ф, доктор технічних наук, професор, Національний Транспортний Університет, завідувач кафедри двигунів і теплотехніки, Київ, Україна.

### REVIEWERS:

Mateichyk V.P., Ph.D., Engineering (Dr.), Professor, National Transport University, Dean of Automobile Mechanic Faculty, Kyiv, Ukraine.

Gutarevych Y.F, Ph.D., Engineering (Dr.), Professor, National Transport University, Head of Department of Engines and Heating Engineering, Kyiv, Ukraine.