



Article citation info:

Michalski, J. Finishing aeronautical planetary herringbone gear wheels in container vibrating smoothing machine. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2015, **89**, 109-117. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2015.89.12.

Jacek MICHALSKI¹

FINISHING AERONAUTICAL PLANETARY HERRINGBONE GEAR WHEELS IN CONTAINER VIBRATING SMOOTHING MACHINE

Summary. The paper presents the technological process of abrasive-chemical machining wheel bearing surface of the cylindrical herringbone gears planetary gear in vibrating container smoothing machine according to Isotropic Finishing ISF® technology of the REM Chemicals Inc. company. Gear wheels are made of stainless Pyrowear 53 and subjected to carburizing, hardening, cold working and low tempering. The change in value of deviation indicators for the kinematic accuracy, smoothness and geometric structure of the machined surfaces of the gear teeth after smoothing compared with the contoured grinding were analyzed. The findings are different a characteristic performance on the surface of the tooth side along the outline, especially with a higher value at the head of the teeth. This creates a need for appropriate modification of the lateral surface of the teeth in the process of contoured grinding. The results of the mechanical strength of the samples gear wheel after the smoothing process and evaluating the hydrogen embrittlement are presented.

Keywords: processing in container vibration smoothing machine, contoured grinding, modification of the side surfaces of the tooth, the accuracy of gears, hydrogen embrittlement

¹ Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics, The Rzeszów University of Technology, Rzeszów, Poland. E-mail: jmichals@prz.edu.pl

OBRÓBKA WYKOŃCZENIOWA W WYGŁADZARCE POJEMNIKOWEJ WIBRACYJNEJ KOŁA DASZKOWEGO LOTNICZEJ ZĘBATEJ PRZEKŁADNI OBIEGOWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono proces technologiczny obróbki ściernochemicznej powierzchni nośnych koła walcowego daszkowego, zębatej przekładni obiegowej, w wygładzarce pojemnikowej wibracyjnej według technologii Isotropic Finishing ISF[®], firmy REM Chemicals Inc. Koła wykonano ze stali Pyrowear 53 i poddano procesowi nawęglania, hartowania, obróbki podzerowej i odpuszczania niskiego. Analizowano zmianę wartości wskaźników odchyłek, dotyczących dokładności kinematycznej, płynności pracy i struktury geometrycznej powierzchni obrobionych zębów koła po wygładzaniu w porównaniu z poprzedzającym szlifowaniem kształtowym. Stwierdzono charakterystyczną odmienną wydajność obróbki na powierzchni boku zęba, wzdłuż zarysu, o większej wartości na powierzchni głowy zębów. Stwarza to konieczność odpowiedniej modyfikacji powierzchni bocznej zębów w procesie szlifowania. Zamieszczono wyniki wytrzymałości mechanicznej próbek koła zębatego po procesie wygładzania oceniających kruchość wodorową.

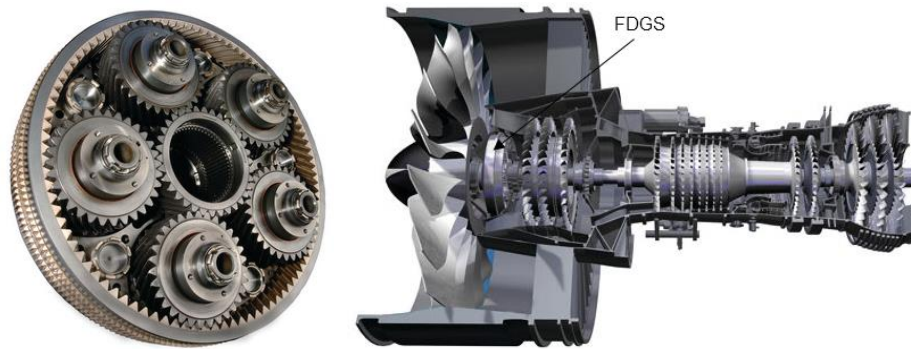
Słowa kluczowe: obróbka w wygładzarkach pojemnikowych wibracyjnych, szlifowanie kształtowe, modyfikacja powierzchni bocznych zęba, dokładność kół zębatych, kruchość wodorowa

1. WPROWADZENIE

Ciągle poszukiwane są innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne przekładni lotniczych, zwłaszcza celem zapewnienia wymaganej funkcjonalności i wysokiego poziomu niezawodności. Przykładem takim jest zębata przekładnia obiegowa FDGS silnika turbowentylatorowego (rys. 1). Zapewnia ona znaczące zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji statków powietrznych, zmniejszenie zużycia paliwa, obniżenie poziomu hałasu oraz emisji dwutlenku węgla, tlenków azotu i kosztów eksploatacji [19]. Zastosowanie kół walcowych daszkowych (strzałkowych), z rozdzielonymi uzębieniami jednokierunkowymi, zapewnia dużą nośność przekładni, bardzo dobrą odporność na zacieranie i zmęczenie stykowe, obciążenia dynamiczne, dużą wytrzymałość na zginanie i twardość oraz dobrą stabilność mikrostruktury metalograficznej. 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 [14]. Bardzo obciążone obustronnie w reduktorze są koła obiegowe [11]. Obecnie mają lustrzanej gładkości powierzchnie boków zębów, o temperaturze styku 200-300°C. Przekładnia FDGS wymaga stosowania oleju syntetycznego TURBONYCOIL 600 na bazie estrów polioliowych, klasy lepkości 5 mm² s w 100°C, niskiej odparowalności w wysokich temperaturach oraz wysokiej temperaturze zapłonu. Mała wysokość nierówności powierzchni zapewnia małe opory ruchu i zużycie tribologiczne [18]. Z kolei mała wartość widmowej gęstości mocy nierówności powierzchni boków zębów wpływa na cichobieżność i niski poziom drgań przekładni [4]. Szczególnie trudne jest zapewnienie powtarzalności minimalnych odchyłek kształtu stereometrii uzębionych wieńców oraz spełnienie wymaganej jakości stref podpowierzchniowych warstwy wierzchniej [2, 15]. Popularne metody obwiedniowe i kształtowe obróbki ubytkowej kół w stanie miękkim i twardym to: frezowanie, dłutowanie, wiórkowanie, szlifowanie, gładzenie, dogładzanie, wygładzanie w pojemnikach z masą ścierną lub kształtkami

ściernymi, docieranie, kulkowanie strumieniowe, obróbka magnetyczno ścierna, elektrochemiczna, nagniatanie i inne [7, 16]. Spośród metod szlifowania uzębienia największą dynamikę rozwoju mają metody kształtowe (profilowe) oraz z obróbki wiórowej dłutowanie i wiórkowanie [8].

Adhezja i dyfuzja wodoru mogą pogorszyć właściwości tribologiczne kół zębatych oraz wytrzymałość doraźną [3, 6, 9]. Występuje ona podczas obróbki cieplno-chemicznej, galwanicznej, chemicznej, nanoszenia powłok i eksploatacji. Kruchość wodorowa prowadzi do uszkodzeń pęknięcia powierzchniowego i zmęczeniowego oraz złamania kruchego [13].



Rys. 1. Silnik turbowentylatorowy z przekładnią planetarną FDGS umiejscowioną pomiędzy wentylatorem a sprężarką niskiego ciśnienia i turbiną [19]

2. 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 Fellowsa na dłutownicy firmy Sykes, dłutakami garnkowymi firmy Lorenz. Stosowano metodę obróbki posuwu wglębnego z posuwem obrotowym. Następnie poddano koła nawęglaniu, hartowaniu, wymrażaniu i odpuszczaniu. Przed nawęglaniem przeprowadzono aktywację powierzchni przez obróbkę strumieniowo-ścierną korundem, wstępną oksydację, odtłuszczenie i trawienie. Nawęglanie dwustopniowe przeprowadzono w mieszaninie endotermicznej wzbogaconej metanem. Uzębienie kół miało twardość 82,1-82,6 HRA i grubość warstwy nawęglonej 1,1-1,2 mm, dla umownej granicy twardości >513 HV500. Stosowano twardościomierz Vickersa, Rockwella i mikrotwardościomierz Matsuzawa Seiki Co., Ltd. Szlifowanie uzębienia wykonano metodą kształtową na szlifierce VAS 432 CNC z układem sterowania Optronik CNC-D140 firmy Kapp. Zastosowano ściernicę o średnicy 28 mm z regularnego azotku boru CBN 100 firmy Winterthur Schieftechnik. Zastosowano 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 REM stożkowe, walcowe i graniastosłupowe o podstawie trójkątna równobocznego były wielkości 2-4 mm. Drgania przestrzenne pojemnika miały częstotliwość 45 Hz. Kąt wzniosu linii śrubowej przemieszczeń wynosił 65° oraz amplituda drgań 4,5 mm. Ciecz ze środkami chemicznymi była doprowadzona z natężeniem przepływu 36 dm³/h oraz odprowadzona z natężeniem 2 dm³/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 z inhibitorem korozji przez 10 min. Pierwszy okres obróbki to ścieranie mechaniczne i mikroskrawanie powstających na powierzchni obrabianej kół zębatych powłok konwersyjnych i utworzonego chylatu. Zapewnia to skład chemiczny mieszaniny, zawierającej aktywne czynniki, korzystnie fosforan alkilowy i kwas cytrynowy [10, 17]. Drugi etap to wypompowanie Ferromil FML-630 i neutralizacja. W trzecim etapie obróbki przebiegają procesy fizyczno-chemiczne i anodowe w łagodnym środowisku zasadowym – wygładzanie, zgniot i wybłyszczenie. Nieobrabiane powierzchnie kół zębatych osłonięto wkładkami elastomerowymi.

Kształt stereometryczny boków zębów kół zębatych zmierzono współrzędnościową maszyną pomiarową CNC, model PNC 40 firmy Klingelberg Söhne. Trzpień pomiarowy był zakończony kulą rubinową o średnicy 2,032 mm. Bazą pomiaru koła zębatego 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 – bicia promieniowe uzębienia, $f_{u\ max}$ – maksymalna nierównomierność sąsiednich podziałek, R_p – zakres zmian podziałek [12]. 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 przez przeciwległe kulki o średnicy 7,0993 mm, według AGMA 239.03. Chropowatość powierzchni koła mierzono profilometrem Mahr MFW250, końcówką pomiarową o promieniu 2 μm 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, typ A, przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia 1,96.

Badania odporności na kruche pękanie dokonano na dwu próbkach walcowych typu 1a.1 z częścią chwytową gwintowaną, mocowaną w uchwycie pierścieniowym, przy stałym obciążeniu 29629 N [1]. Przeprowadzono je maszyną wytrzymałościową serwohydrauliczną do badań zmęczeniowych INSTRON, typ 8801. Próbkę wykonaną ze stali Pyrowear 53 toczono i szlifowano papierem ściernym. Średnica przewężenia wynosiła 4,46-4,47 mm. Wysokość chropowatości $Ra=0,6\ \mu\text{m}$, była zbliżona do chropowatości powierzchni podstaw zębów kół daszkowych. Próbkę poddano obróbce cieplnej, cieplno-chemicznej i wygładzaniu w pojemniku z masą ścierną i kołami daszkowymi.

3. WYNIKI BADAŃ

Parametry badanego koła daszkowego wyszczególniono w tabelicy 1. Wartości wskaźników odchyłek koła zawarto w tabelicy 2. Oznaczono przez L i P odpowiednio lewy i prawy kierunek pochylenia linii zęba. Drugi symbol L to lewy bok zębów oraz P prawy bok zębów. Wygładzanie w pojemniku z masą ścierną wspomaganie chemicznie, 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 $f_{pt\ max}$. Wygładzanie w pojemniku z masą ścierną kształtuje nową strukturę geometryczną powierzchni uzębienia – ze struktury anizotropowej po szlifowaniu na strukturę izotropową. Wysokości chropowatości powierzchni Ra i Rz zamieszczono w tabelicy 3. W wyniku dodatkowego wygładzenia, wstępnie szlifowanych powierzchni boków zębów, ulega zmniejszeniu ich wysokość chropowatości Ra i Rz , o wartość względną 68-71%. Wręby zębów zmniejszą względną wysokość chropowatości o 49-63%. Badana technologia wygładzania zapewnia usunięcie

średniego naddatku obróbkowego, wyrażonego zmianą średnicy koła przez przeciwległe kulki o $\Delta M=0,0105$ mm (tablica 2). Wzdłuż zarysu zęba, w porównaniu z linią zęba, ma miejsce większa nierównomierność usuniętego naddatku materiału. Usunięta warstwa materiału na powierzchni głowy zębów, w porównaniu ze stopą, jest większa o 1,5-2 μm (rys. 4 i 5). Z kolei usunięta warstwa materiału wzdłuż linii zębów koła wygładzanego jest większa o około 0,5 μm , w obszarze boków wieńca zębatego. Wynika to ze wskaźników: nacisku jednostkowego i predyspozycji obróbki [5, 7]. Spowodowane jest to siłą normalną i styczną wywieraną przez kształtki.

Tablica 1

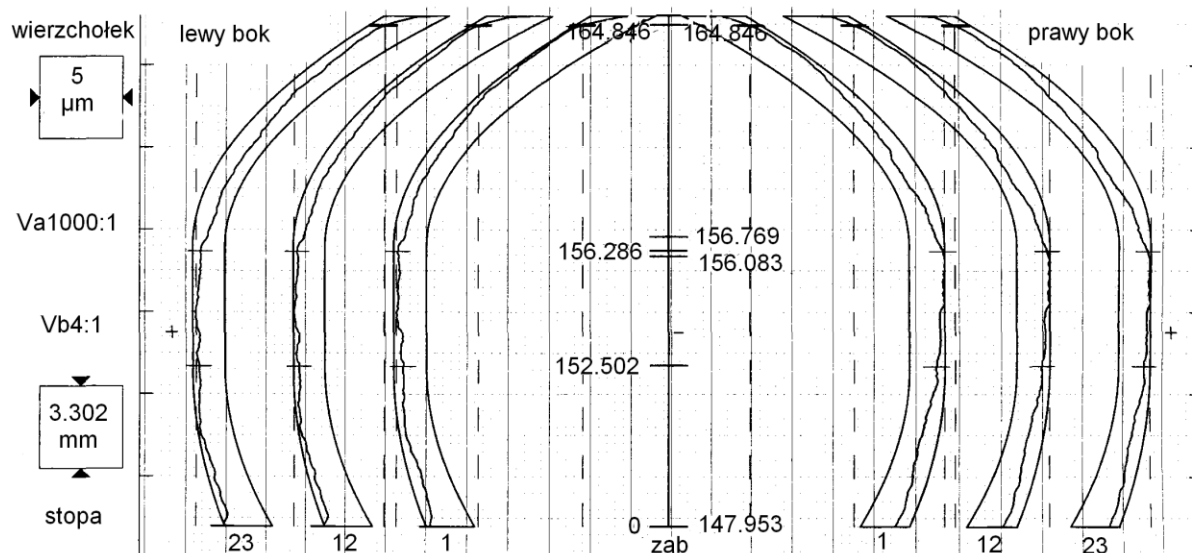
Wybrane parametry geometryczne koła daszkowego

Liczba zębów, z [-]	33
Moduł nominalny, m_n [mm]	3,9214
Kąt pochylenia linii zęba, β [°]	34
Kąt pochylenia linii zęba na walcu zasadniczym, β_b [°]	31,106
Kąt zarysu w przekroju czołowym, α_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

Tablica 2

Wartości odchyłek koła dla wybranej klasy dokładności – wartość średnia i niepewność rozszerzona pomiaru, przy poziomie ufności 95%

Odchyłka	Wartość odchyłek koła i ich odchylenie średnie, [μm]		Numer klasy dokładności, [-]	Wartość dopuszczalna, [μm]
	Szlifowanie	Wygładzanie		
$f_{pt\ max}$	LL 0,60±0,12; LP 0,62±0,13 PL 0,67±0,10; PP 0,69±0,10	LL 0,65±0,11; LP 0,68±0,14 PL 0,65±0,13; PP 0,64±0,15	0; 0	±1,1
F_p	LL 1,97±0,57; LP 2,82±0,64 PL 2,80±0,90; PP 2,43±0,45	LL 3,04±0,91; LP 4,75±1,42 PL 4,50±1,82; PP 3,61±1,24	0; 1	±4,5; ±6,5
F_r	L 1,82±0,59; P 2,30±0,54	L 3,31±0,78; P 3,25±1,23	1; 1	3,5
$f_{u\ max}$	LL 0,58±0,04; LP 0,51±0,13 PL 0,47±0,08; PP 0,60±0,08	LL 0,61±0,07; LP 0,56±0,13 PL 0,45±0,06; PP 0,69±0,12	-	2,0
R_p	LL 0,79±0,12; LP 0,84±0,16 PL 0,86±0,15; PP 0,98±0,13	LL 0,98±0,19; LP 1,32±0,31 PL 1,14±0,34; PP 1,19±0,23	-	2,0
M	L 166,5268±0,0040	P 166,5230±0,0039	-	166,5834- 166,4716



Rys. 2. Odchylenie zarysu zębów – koło szlifowane

Tablica 3

Wysokość chropowatości powierzchni bocznych i podstawy zębów po szlifowaniu i wygładzaniu – wartość średnia i niepewność rozszerzona pomiaru Ra , Rz

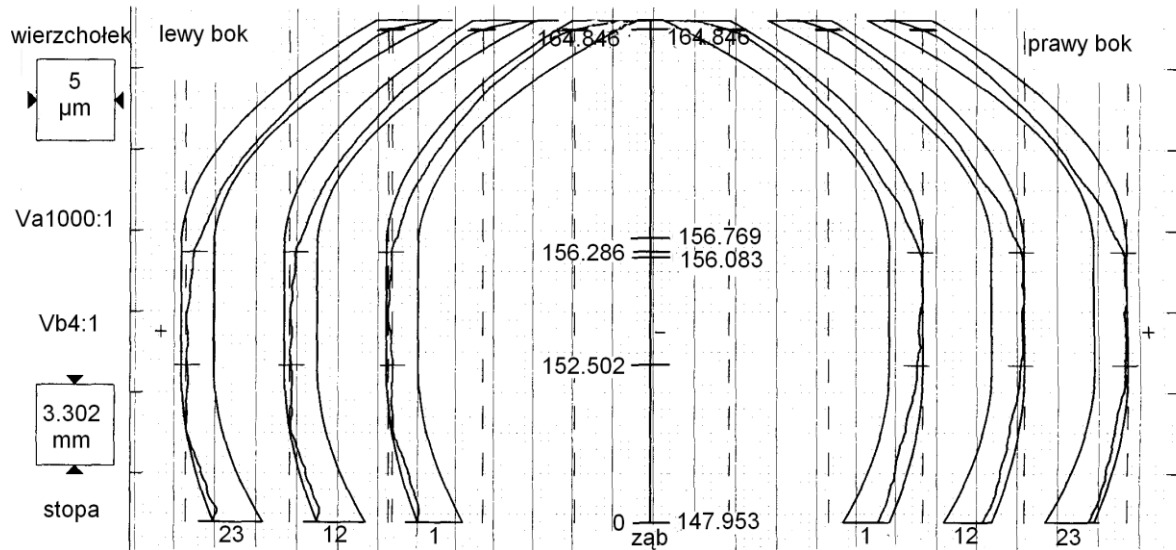
Koła szlifowane, [μm]			Koła wygładzane, [μm]		
Profil obu odcinków daszkowych		Podstawy	Profil obu odcinków daszkowych		Podstawy
Lewe boki	Prawe boki		Lewe boki	Prawe boki	
$Ra=0,250\pm0,016$	$Ra=0,252\pm0,017$	$Ra=0,585\pm0,036$	$Ra=0,074\pm0,012$	$Ra=0,072\pm0,014$	$Ra=0,271\pm0,016$
$Rz=1,618\pm0,100$	$Rz=1,670\pm0,115$	$Rz=3,054\pm0,161$	$Rz=0,519\pm0,072$	$Rz=0,521\pm0,079$	$Rz=1,563\pm0,103$

Wytrzymałość doraźna na rozciąganie dwu próbek 1a.1 wynosiła 2517-2519 MPa. Po 200-godzinnej próbie odporności na kruche pękanie nie stwierdzono wad w karbie – tablica 4.

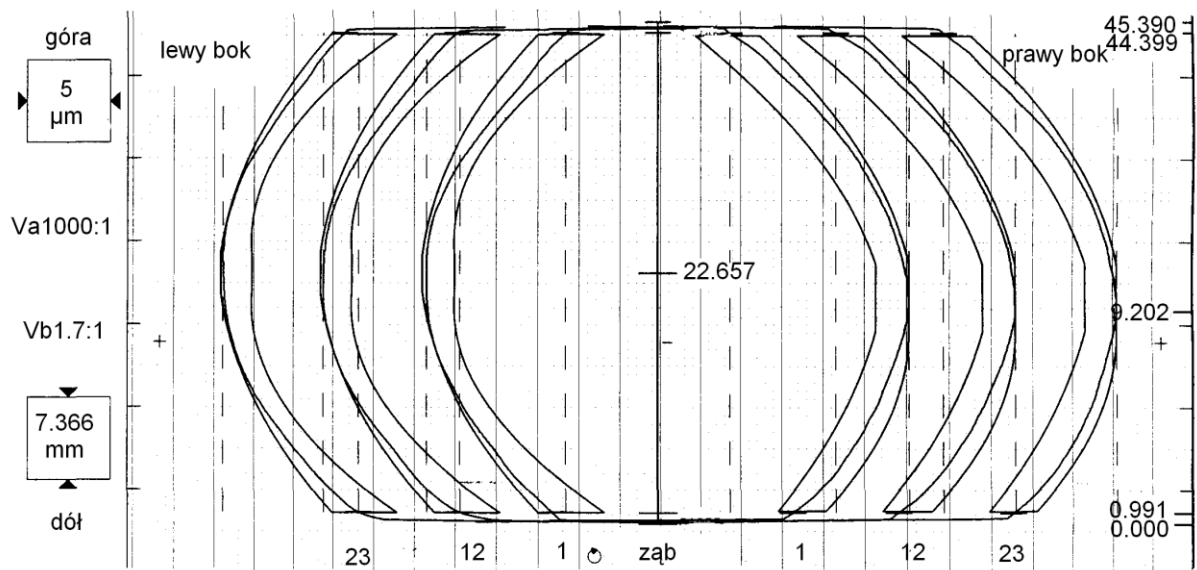
Tablica 4

Wyniki próby na kruche pękanie dwu próbek

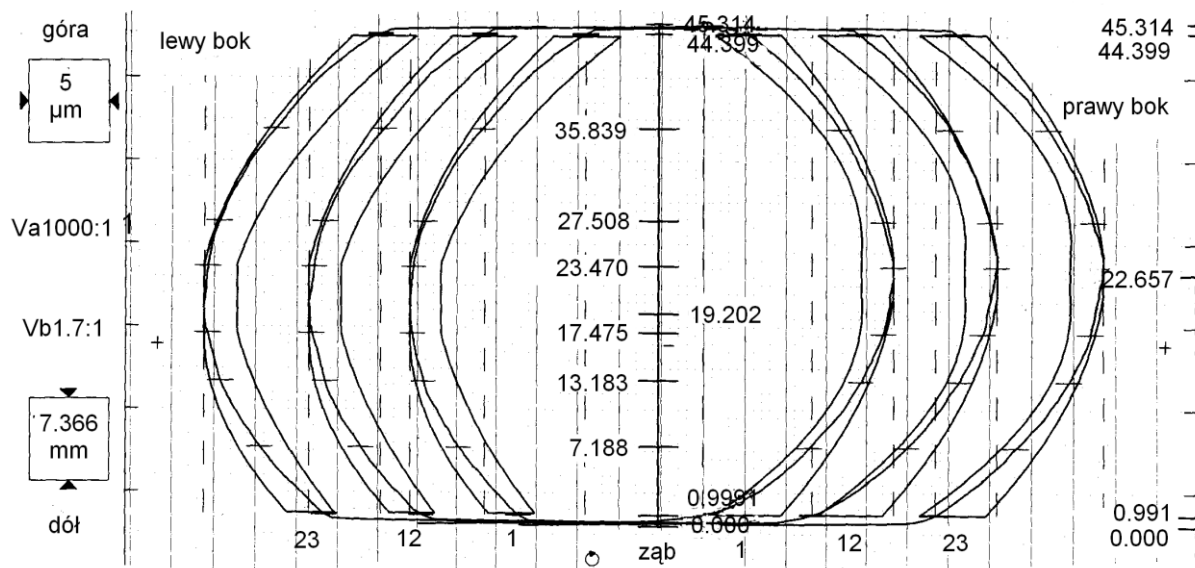
Napężenie w próbce σ , [MPa]	Obciążenie podczas próby, [N]	Procent wytrzymałości, σ/Rm [%]	Czas obciążenia, [h]	Uwagi
1888,0	29629,0	75,00	200	Po próbie nie stwierdzono wad w karbie
1896,5		75,34		



Rys. 3. Odchylenie zarysu zębów – koło wygładzone



Rys. 4. Odchylenie linii zębów – koło szlifowane



Rys. 5. Odchylenie linii zębów – koło wygładzone

4. WNIOSKI

Wygładzanie, w pojemniku z masą ścierną stosowaną technologią, kół zębatach daszkowych szlifowanych zapewnia wytwarzanie kół zębatach najwyższej klasy dokładności, jednak powoduje duże zwiększenie względne wskaźników odchyłek uzębienia Fr , Rp , Fp o 26-59%. W niewielkim stopniu, 2-7%, zwiększają się odchyłki $f_{pt\ max}$ i $F_{u\ max}$. Grubość usuniętego materiału wzdłuż linii zęba jest zwiększona o około $0,5\ \mu\text{m}$ w kierunku powierzchni bocznych wieńca zębatego, natomiast wzdłuż zarysu zęba jest nierównomierna, większa na powierzchni głowy zębów o $1,5\text{-}2\ \mu\text{m}$. Wymaga to odpowiedniej modyfikacji ściernicy i nastaw szlifierki. Zarys i linia zęba mają zmniejszoną wysokość falistości, charakteryzują się także geometrycznie mniejszą krzywizną nierówności powierzchni. Następuje zmiana struktury geometrycznej powierzchni na lustrzaną izotropową, o małej wysokości nierówności. Średnia wysokość Ra boków zębów wynosi $0,07\ \mu\text{m}$ oraz wrębów międzyzębnych $0,22\ \mu\text{m}$. Nie stwierdzono, w próbie przy stałym obciążeniu, kruchości wodorowej po wygładzaniu wibracyjnym wspomaganym chemicznie w pojemniku z masą ścierną.

References

1. ASTM F519-05. *Standard test method for mechanical hydrogen embrittlement evaluation of plating processes and service environments*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2005.
2. Brinksmeier E, A. Giwierzew. 2005. "Hard gear finishing viewed as a process of abrasive wear". *Wear* 258: 62-69.
3. Blicharski M. 2012. *Inżynieria powierzchni*. Warszawa: Wydawnictwo WNT. [In Polish: *Surface engineering*].
4. Fernández A., M. Iglesias, A. De-Juan, P. García, R. Sancibrián, F. Viadero. 2014. "Gear transmission dynamic: Effects of tooth profile deviations and support flexibility". *Applied Acoustics* 77: 138-149.
5. Kabir A., M. Lovell, C.F. Higgs. 2008. "Utilizing the explicit finite element method for studying granular flows". *Tribology Letters* 2: 85-94.

6. Kula P. 1994. "Sorpcja wodoru w warstwie azotowanej oraz jej wpływ na tarcie i zużycie". *Zeszyty naukowe* 691. *Rozprawy naukowe* 197. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. [In Polish: „Sorption of hydrogen in nitrided layer and its influence on friction and wear”].
7. Marciniak M., A. Stefko, W. Szyrle. 1983. *Podstawy obróbki w wyłazarkach pojemnikowych*. Warszawa: WNT. [In Polish: *Basics of machining in container temper mill*].
8. Markowski T. 1996. *Wiórkowanie: podstawy procesu*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. [In Polish: *Shaving: the basics of the process*].
9. Michalczewski R. 2012. *Właściwości tribologiczne smarowanych, wysokoobciążonych elementów maszyn pokrytych cienkimi powłokami niskotarciowymi*. Radom: Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy. [In Polish: *Tribological properties of lubricated, heavy duty machine parts coated with thin coatings niskotarciowy*].
10. Patent US 8109854 B2. *Superfinishing large planetary gear systems*. Michaud M., E.D. Summers. 28 maj 2004. Właściciel REM Technologies, Inc., OSRO GmbH.
11. Müller L, A. Wilk. 1996. *Zębate przekładnie obiegowe*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. [In Polish: *Toothed planetary gears*].
12. PN-ISO 1328-1:2015-01. Przekładnie zębate walcowe - Układ ISO tolerancji boków zębów - Część 1: Definicje i dopuszczalne wartości odchyłek boków zębów. Warszawa: Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości. [In Polish: *Helical gears - ISO tolerance system tooth flanks - Part 1: Definitions and these values sides of the teeth*].
13. PN-91/M-88506. *Reduktory i motoreduktory ogólnego przeznaczenia - Uszkodzenia kół zębatach - Terminologia*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości. 1991. [In Polish: *Gearboxes and gear motors general-purpose - Damage gears - Terminology*].
14. Raga K. 2013. „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. Rzeszów: Politechnika Rzeszowska. Promotor: prof. Jan Sieniawski. [In Polish: „Influence of process vacuum carburizing and high pressure gas quenching properties of carburized layer and the substrate of AISI 9310 and Pyrowear 53 gears gear airline”. PhD thesis].
15. Silva S.P., S.L.M.R. Filho, L.C. Brandão. 2014. „Particle swarm optimization for achieving the minimum profile error in honing process”. *Precision Engineering* 38(4): 759-768.
16. Wójcik Z. 1991. Obróbka uzębień. In *Poradnik inżyniera - obróbka skrawaniem. Tom 3*, Górski E. (koordynator). Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. [In Polish: Treatment of teeth. In *Explained engineer - machining. Volume 3*].
17. Patent US 7641744 B2. *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*. Winkelmann L.W. Zgłoszono 6 kwiecień 2006. Właściciel Rem Technologies, Inc.
18. Xiao L., B.-G Rosen, Naser Amini, P.H. Nilsson. 2003. “A study on the effect of surface topography on rough friction in roller contact”. *Wear* 254: 1162-1169.
19. Chandler Charles. *Innovations in Turbine Engines*. Available at: <http://www.aviationpros.com/article/10617063/turbine-technology-innovations-in-turbine-engines>.

Received 21.04.2015; accepted in revised form 13.08.2015



Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License