



(54)

**Sposób wytwarzania kół zębatach**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

**27.01.2020 BUP 03/20**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

**25.01.2021 WUP 02/21**

(73) Uprawniony z patentu:

**PATENTUS SPÓŁKA AKCYJNA, Pszczyna, PL  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA, Warszawa, PL  
SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ – INSTYTUT  
TECHNOLOGII EKSPLOATACJI, Radom, PL  
NANOSTAL SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ  
ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ, Kielce, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**ANDRZEJ WIECZOREK, Zabrze, PL  
ADAM GOŁASZEWSKI, Warszawa, PL  
KRZYSZTOF WASIAK, Siedlce, PL  
KAMIL WASILUK, Warszawa, PL  
SZYMON MARCINIAK, Warszawa, PL  
WIESŁAW ANDRZEJ ŚWIĄTNICKI,  
Warszawa, PL  
DAWID MYSZKA, Warszawa, PL  
EMILIA KATARZYNA SKOŁEK, Warszawa, PL  
WALDEMAR TUSZYŃSKI, Radom, PL**

(74) Pełnomocnik:

**rzecz. pat. Marian Małachowski**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania kół przeznaczonych do wysoko obciążonych przemysłowych przekładni zębatych pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych przejawiających się oddziaływaniem wysokich średniorocznych wahań temperatury w zakresie  $-35^{\circ}\text{C} \div +50^{\circ}\text{C}$  i obecności twardych zanieczyszczeń stałych w oleju smarującym.

Obecnie do wytworzenia kół zębatych przeznaczonych do wysoko obciążonych przemysłowych przekładni zębatych wykorzystuje się technologię, w której odkuwki stalowe lub pręty kute poddaje się obróbce cieplnej polegającej na wyżarzaniu normalizacyjnym i ulepszaniu cieplnym w przypadku dalszego utwardzania uzębienia metodami hartowania powierzchniowego lub azotowania, bądź wyżarzaniu zmiękczającemu w przypadku dalszego utwardzania uzębienia metodami nawęglania lub wysokotemperaturowego węglazotowania po czym metodami obróbki skrawaniem kształtuje się otoczki kół zębatych, w których następnie nacinane jest uzębienie metodami obwiedniowymi poprzez frezowanie, obwiedniowe frezem ślimakowym lub dłutowanie obwiedniowe dłutakami lub kształtowymi.

W znanych technologiach wytwarzania kół zębatych stosuje się do zwiększenia trwałości utwardzanie ich powierzchni za pomocą metod obróbki cieplno-chemicznej lub za pomocą powierzchniowych metod obróbki cieplnej. Znany jest sposób nawęglania lub węglazotowania wysokotemperaturowego w piecach z atmosferą nawęglającą powstałą z rozkładu gazu w generatorach endotermicznych lub rozkładu cieczy zawierających węgiel (metanol, toluen, nafta, octan etylu). W czasie procesu może dojść do odwęglania lub utlenienia powierzchni. W tej metodzie konieczne jest przeprowadzenie obróbki cieplnej końcowej polegającej na schłodzeniu wsadu pieca, z temperatury nawęglania do temperatury austenitizacji, wygrzaniu w tej temperaturze przez wymagany czas, zahartowaniu w oleju hartowniczym, oczyszczeniu powierzchni w myjkach natryskowych i odpuszczeniu, najkorzystniej w zakresie temperatur  $160 \div 200^{\circ}\text{C}$ .

Znany jest też sposób, w którym po nawęglaniu wsad się ochładza do temperatury otoczenia, przeprowadza się ewentualne usunięcie warstwy nawęglonej na powierzchniach nie przeznaczonych do utwardzenia, następnie przeprowadza się austenitizację wsadu w piecach atmosferycznych, dokonuje się pojedynczego lub podwójnego hartowania w oleju, oczyszcza się powierzchnię w myjkach natryskowych i odpuszcza się, najczęściej w zakresie temperatur  $1 \div 200^{\circ}\text{C}$ .

Znany jest również sposób nawęglania taki jak opisany powyżej, przy czym w technologii tej stosuje się piece próżniowe zamiast atmosferycznych i często hartowanie w sprężonych gazach obojętnych zamiast w oleju. Ten sposób dedykowany jest kołom o małych rozmiarach. W warstwie wierzchniej kół nawęglonych i utwardzonych metodami obróbki cieplnej dochodzi do zwiększenia jej twardości, a ponadto wprowadzane są ścisnąjące naprężenia własne, które oddziałują szczególnie korzystnie na właściwości eksploatacyjne. W rdzeniu takich kół zachowana jest struktura wielofazowa o twardości do 45 HRC. Jednakże w wyniku wymienionych metod utwardzania dochodzi do zmian kształtu i wymiarów koła, co z kolei bardzo istotnie wpływa negatywnie na współpracę z innymi elementami. W celu usunięcia skutków odkształceń termicznych, stosuje się pracochłonne szlifowanie powierzchni kół zębatych.

Znany jest także sposób wytwarzania kół, w którym koła zębate z naciętym uzębieniem, uprzednio normalizowane i ulepszone cieplnie, poddaje się azotowaniu gazowemu lub jarzeniowemu. W wyniku procesu powstaje twarda powierzchnia utwardzona o grubości do 0,6 mm. Twardość powierzchni po azotowaniu dla stali do ulepszania cieplnego dochodzi do 54HRC, natomiast dla specjalistycznych stali do azotowania – do 1000 HV. Po procesie azotowania, szlifowanie nie jest wymagane. Wadą metody jest uzyskanie cienkiej warstwy utwardzonej, często posiadającej grubość nie dostosowaną do dużych obciążeń, gdzie punkt maksymalnych naprężeń stycznych znajduje się w pewnej odległości od powierzchni i musi znajdować się w warstwie utwardzonej oraz niekorzystny bardzo długi czas procesu.

Znany, jest; sposób wytwarzania kół, w którym koła zębate z naciętym uzębieniem, uprzednio normalizowane i ulepszone cieplnie, poddaje się hartowaniu powierzchniowemu metodami indukcyjnymi. W wyniku procesu powstaje twarda powierzchnia utwardzona, o twardości dla stali do ulepszania cieplnego dochodzącej do 58 HRC. Po procesie hartowania powierzchniowego metodami indukcyjnymi, szlifowanie nie jest wymagane dla kół o docelowej klasie dokładności wyższej od 7 wg PN-ISO 1328 lub DIN 3962. W przypadku kół o wymaganej klasie dokładności niższej lub równej 7 wymagane jest szlifowanie metodami kształtowymi. Wadą metody jest nierównomierna grubość warstwy utwardzonej zęba, co często powoduje powstanie karbu strukturalnego w obszarze stopy zęba, który może doprowadzić do jego złamania zmęczeniowego.

Znany jest sposób hartowania powierzchniowego tak jak opisany wyżej, przy czym proces nagrzewania dokonuje się metodą płomieniową z użyciem palników gazowych. Wadą metody jest brak powtarzalności procesu.

Znany jest sposób hartowania powierzchniowego tak jak opisany wyżej, przy czym proces nagrzewania dokonuje się metodą laserową z użyciem ramienia robota i stołu obrotowego. Zaletą metody jest brak odkształceń hartowniczych i szybkość procesu. Z kolei wadą tego sposobu jest cienka warstwa utwardzona nie przekraczająca 1 mm oraz możliwość powstania karbu strukturalnego w obszarze stopy zęba.

Znany jest sposób zwiększenia trwałości polegający na zastosowaniu honowania, czyli obróbki powierzchniowej wykorzystującej specjalne narzędzie, ale metoda ta jest przeznaczona do małych kół.

Znany też jest sposób polegający na przeprowadzeniu wstępnego docierania kół zębatych w sposób kontrolowany, odtwarzający rzeczywiste warunki pracy, ale w sposobie tym dotarta jest tylko jedna flanka zęba, a ponadto czasie docierania może dojść do odkształcenia powierzchni poprzez kontakt wierzchołków nierówności powierzchni.

Znany jest z opisu EP 1646477 B1, sposób który polega na poddaniu oddziaływaniu znanych z patentu amerykańskiego US 7005080 B2 związków chemicznych z powierzchnią kół zębatych i kształtek gładzących, których ruch jest wymuszony poprzez drgania miski urządzenia dogładzającego. Metoda ta wymaga zastosowania stosunkowo drogich związków chemicznych, które następnie należy poddać procesowi neutralizacji. Proces ten ponadto charakteryzuje się długim czasem trwania.

Znany też jest sposób polegający na zastosowaniu obróbki powierzchniowej dynamicznej, najczęściej kulowania i następującego bezpośrednio po nim dogładzania polegającego na oddziaływaniu kształtek szlifujących, których ruch jest wymuszony poprzez drgania miski urządzenia dogładzającego. W sposobie tym można dogładzać tylko jedno koło naraz i sposób ten przeznaczony jest tylko do jednego typu koła walcowego o uzębieniu zewnętrznym. Proces ten ponadto charakteryzuje się długim czasem trwania.

Znany jest z opisu zgłoszenia wynalazku US20110126946 A1 sposób wytwarzania struktury nanobainitycznej, w którym poprzez zastosowanie precyzyjnie zaprojektowanej obróbki cieplnej z wyżarzaniem w zakresie bainitycznym uzyskane jest zredukowanie rozmiaru ziaren ferrytu bainitycznego do zakresu  $20 \div 100$  nm w stalach nisko i średniostopowych o zawartości węgla 0,6–1,1% wag. Uzyskiwana mikrostruktura składa się z nanometrycznych płytek bezwęglowego ferrytu bainitycznego, poprzedzielanych nanometrycznymi warstwami austenitu resztkowego stabilnego w temperaturze pokojowej. Preferowany udział austenitu resztkowego, niezbędny do zwiększenia odporności stali na pękanie, określony jest na poziomie 12–30%. Aby nie doprowadzić do całkowitej przemiany austenitu w bainit w składzie chemicznym stali znajduje się dodatek krzemu i/lub aluminium.

Znany jest z opisów patentowych WO 2010013054 A2, P.396431, US 6884306 B1 sposoby wytwarzania struktury nanobainitycznej w specjalnie projektowanych stalach o zawartości węgla powyżej 0,6% i podwyższonej zawartości krzemu lub aluminium. W takich stalach otrzymuje się bezwęglową strukturę nanobainityczną poprzez hartowanie z przystankiem izotermicznym w zakresie 190–300°C, najlepiej w 220–260°C.

Znany jest także proces niskociśnieniowego nawęglania próżniowego metodą iniekcijną według patentu, gdzie nawęglanie przeprowadza się w temperaturze 1000°C z 6 naprzemiennymi cyklami nawęglania – dyfuzja, przy czym łączny czas nawęglania wynosi 15 minut i 30 sekund, a łączny czas segmentów dyfuzji wynosi 2 godziny i 50 minut. Następnie nawęglane elementy są chłodzone do temperatury 900°C z wytrzymaniem w tej temperaturze przez 10 minut, po czym schładzane są do 650°C z przystankiem trwającym 20 minut celem perlityzacji. Następnie elementy poddawane są austenitacji w 850°C i ponownej perlityzacji zakończonej chłodzeniem z przystankiem w 450° przez 10 minut. W wyniku nawęglania uzyskuje się łagodny profil koncentracji węgla o stężeniu powierzchniowym równym 0,80%C [%wag.]. Zawartość węgla na głębokości 0,70 mm wynosi 0,62%C [%wag.], natomiast całkowita głębokość warstwy nawęglonej wynosi 2 mm. Po zakończeniu nawęglania elementy są schładzane do temperatury pokojowej w procesie ciągłym lub stopniowym prowadzonym, by nie doprowadzić do odkształceń hartowniczych koła i procesu odpuszczania. Następnie wykonywany jest proces mycia nawęglonych elementów.

W publikacjach „Otrzymywanie struktury nanokrystalicznej w stalach przy wykorzystaniu przemiany bainitycznej. Inżynieria Materiałowa, rok XXXIII, nr 6 (2012) str. 524–529 wykazano również, że strukturę nanobainityczną można wytworzyć w niektórych powszechnie dostępnych stalach handlowych

np. stalach narzędziowych typu X37CrMoV5-1/X40CrMoV5-1 i innych, w których podczas procesu nanostrukturyzacji nie wydziela się cementyt, czyli węgiel żelaza Fe<sub>3</sub>C. Ponieważ stale te mają mniejszą zawartość węgla niż 0.6% wag. dlatego posiadają też wyższą temperaturę Ms co wymusza zastosowanie podczas hartowania izotermicznego przystanku izotermicznego w wyższej temperaturze niż 300°C. Wyższa temperatura wygrzewania prowadzi jednak do zwiększenia udziału fazy austenitycznej w stali. Jest to faza zapewniająca stali nanobainitycznej wysokie właściwości plastyczne, jednak jej zbyt duża ilość ogranicza wytrzymałość stali i może prowadzić do niestabilności struktury, co wiąże się ze wzrostem kruchości w niskich temperaturach. Po nanostrukturyzacji stale posiadają wytrzymałość na rozciąganie w zakresie 1,5+2,5 GPa, odporność na pękanie rzędu 25–50 MPam<sup>1/2</sup> twardość do 700 HV i udarność do 50 J. Zalecany przedział temperaturowy, w którym należy realizować przystanek izotermiczny mieści się granicach 220–350°C, a czas potrzebny do zakończenia przemiany bainitycznej w tych temperaturach sięga od kilkunastu godzin do 3 tygodni.

Z kolei w opublikowanych pracach (F.C. Zhang, et al.: A novel method for the development of a low-temperature bainitic microstructure in the surface layer of low-carbon steel'

„1, Scripta, Mater. 59 (2008) str. 294–296; E. Skofekek al: Structure and properties of the carburised surface layer on 35CrSiMn5-5-4 steel after nanostructurization treatment”, *Materials and Technology Materials in Tehnologije* 49, (2015) str.933–939; Wasiluk Kamil et al: Microstructure and Properties of Surface Layer of Carburized 38CrAlMo6-10 Steel Subjected to Nanostructurization by a Heat Treatment Process, *Archives of Metallurgy and Materials*, 59. (2014) str. 1686–1690) wykazano, iż w nawęglonej warstwie stali nisko lub średniowęglowych, możliwe jest wytworzenie mikrostruktury nanobainitycznej o dużej twardości i dużej odporności na zużycie ściernie.

Metoda oparta o nanostrukturyzację bainityczną nie jest stosowana obecnie do wytwarzania kół zębatych.

Znane są z dotychczasowego stanu techniki wykorzystania powłok niskotarciowych typu a-C:H:W i CrN+a-C:H:W (powszechne określenie to powłoki typu DLC) wytwarzanych metodami PVD do zwiększenia twardości i odporności na zatarcie warstw wierzchnich. Koła zębate wykonane na gotowo są poddawane obróbce polegającej na nałożeniu powłok typu DLC wytwarzanych metodami PVD. Do zalet powłok należą między innymi: dobra adhezja do podłoża stalowego, wysoka twardość zapewniająca odporność na ścieranie, odporność na łuszczenie, odporność chemiczna, odporność na korozję oraz niewielka skłonność do tworzenia szczepień adhezyjnych ze stalą w warunkach ekstremalnych wymuszeń. W przypadku kół zębatych wyniki badań przeprowadzone na badawczych stanowiskach przekładniowych (koła walcowe i stożkowe) wskazują na liczne korzyści wynikające pokrycia kół zębatych tymi powłokami: wzrost odporności na zacieranie, zmniejszenie zużycia, obniżeni e temperatury pracy zazębień. Obecnie z zastosowaniem tej metody wytwarza się niskoobciążone i małogabarytowe koła do obrabiarek. Problemem utrudniającym zastosowanie metody do produkcji kół do wysokoobciążonych przemysłowych przekładni zębatych pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych jest przedwczesne wystąpienie powierzchniowego życia zmęczeniowego – pittingu po zastosowaniu powłok na elementach, w których występuje ruch toczny lub toczno-ślizgowy, W publikacji (W. Piekoszewski: Wpływ powłok na zmęczenie powierzchniowe smarowanych stalowych węzłów tarcia. Wyd. ITeE-PIB, Radom 2011) wykazano, że spadek odporności na pitting materiałów z powłokami typu DLC następuje w sposób drastyczny jeśli twardość powierzchni materiału, na którym naniesiona jest warstwa DLC jest mniejsza niż 60 HRC, Przeprowadzone próby na kołach zębatych wykazały, że nawęglone warstwy wierzchnie o początkowo dużej twardości – 60÷63 HRC, w wyniku przeprowadzonego nakładania powłoki typu DLC w temperaturze do 250°C ulegają odpuszczaniu, co powoduje zmniejszenie twardości, a w wyniku daje niewłaściwe podparcie dla powłoki, wywołując w niej pęknięcia przechodzące w głąb warstwy nawęglonej.

Stosowane obecnie technologie wytwarzania kół zębatych przekładni zębatych pracujących w trudnych warunkach pracy w powiązaniu z nowoczesnymi metodami inżynierii materiałowej i inżynierii powierzchni nie zapewniają osiągnięcia wymaganej wysokiej trwałości eksploatacyjnej, a także nie zapewniają zadawalającej sprawności uzębienia poprzez relatywnie wysokie straty mocy. Dodatkowymi utrudnieniami procesu eksploatacji przemysłowych przekładni zębatych jest często niska kultura techniczna obsługi, brak układów kondycjonowania systemu smarowania w zakresie filtracji i chłodzenia oraz monitoringu technicznego.

Celem wynalazku jest opracowanie sposobu wytwarzania kół zębatych przemysłowych przekładni zębatych charakteryzujących się zwiększoną trwałością eksploatacyjną i zmniejszeniem strat mocy generowanych w zazębieniach.

Sposób wytwarzania kół zębatach charakteryzuje się tym, że stale nisko – lub średniostopowe o zawartości o zawartości węgla od 0,15 [%wag.] do 0,55 [%wag.], zawartości krzemu od 0,9 [%wag.] do 3,0 [%wag.], zawartości manganu od 1 [%wag.] do 2 [%wag.] oraz niklu ok. 1,5 [%wag.] poddaje się procesowi w kolejnych następujących po sobie etapach technologicznych: austenitacji, którą przeprowadza się w temperaturze od 900°C do 930°C w czasie 30 minut do uzyskania struktury austenitu w całej objętości elementu, nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej, szlifowaniu powierzchni czołowych, otworu wewnętrznego oraz uzębienia oraz naniesienia na powierzchnię otoczki kół zębatach metodami PVD powłoki typu a-C:H:W i CrN+a-C:H:W.

Przy czym w jednej z odmian proces nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej otoczki kół zębatach przeprowadza się schładzając otoczkę koła zębatego do temperatury od 230°C do 235°C i wytrzymując izotermicznie przez okres od 4 godzin i 15 minut do 5 godzin i 15 minut, a po tym czasie element chłodzony jest na wolnym powietrzu do temperatury 25°C, po wyrównaniu temperatury w całej objętości elementu. Po czym ponownie umieszcza się go w piecu nagrzanym do temperatury od 230°C do 235°C i wytrzymuje izotermicznie przez okres od 1 godziny do 1 godziny i 15 minut, a po tym czasie element schładza się na wolnym powietrzu do temperatury 25°C, uzyskując warstwę nawęgloną mikrostruktury składającej się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego o zawartości 26%, twardości powierzchniowej 60HRC i twardości rdzenia równej 51 HRC oraz udarności 22J.

W kolejnej odmianie wynalazku proces nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej otoczki kół zębatach przeprowadza się przy niepełnym hartowaniu martenzytycznym w połączeniu z partycjonowaniem węgla, przy czym hartowanie odbywa się z przestankami izotermicznymi w temperaturze 340°C przez 3 min, następnie w temperaturze 230°C przez 3 godziny. Po czym następuje schładzanie do temperatury pokojowej i partycjonowanie w temperaturze 230°C przez 15 min, a następnie schładza się do temperatury 25°C, do uzyskania warstwy nawęglonej z mikrostrukturą składającą się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego, gdzie twardość powierzchniowa wynosi 540 HV (51 HRC), natomiast twardość rdzenia 370 HV (38,6 HRC), a udarność 58J.

W następnej odmianie proces nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej otoczki kół zębatach przeprowadza się poprzez pełną przemianę bainityczną, polegającą na hartowaniu izotermicznym z dwoma przystankami izotermicznymi, jednym w temperaturze 340°C trwającym 3 min oraz drugim przystankiem izotermicznym w temperaturze 300°C i wytrzymaniem izotermicznym przez 16 godzin. Następnie otoczka koła zębatego zostaje schłodzona do temperatury 25°C z zastosowaniem jednego lub kilku przystanków izotermicznych w temperaturach wyższych niż 350°C, z zakresu 500–600°C, gdzie czas trwania tych przystanków nie przekracza 100 sekund, aż do uzyskania warstwy nawęglonej z mikrostrukturą składającą się z mieszaniny ferrytu bainitycznego i austenitu resztkowego, którego udział objętościowy wynosi 21,5%, twardości powierzchniowej o wartości 550 HV (52,5 HRC), przy czym rdzeń otoczki koła ma twardość równą 410 HV (42,6 HRC), udarność 40J, a zawartość austenitu szczątkowego w rdzeniu wynosi 10%.

W kolejnej odmianie sposobu proces nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej otoczki kół zębatach przeprowadza się schładzając przy nadciśnieniu azotu 13,5 bara do temperatury 450°C, po czym zmniejsza się ciśnienie do 2 barów i schładza do temperatury 300°C i wytrzymuje się w tej temperaturze przez 1 godzinę i 45 minut. Następnie elementy stalowe schładza się do temperatury do 30°C, po czym nagrzewa się je do 245°C i wytrzymuje w tej temperaturze do 30 minut, następnie schładza się na wolnym powietrzu do temperatury 25°C, uzyskując warstwę nawęgloną mikrostruktury składającej się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego o twardości powierzchniowej 60,6 HRC, twardości powierzchni 60 HRC, twardości rdzenia 52,4 HRC i udarności rdzenia 17J.

W poszczególnych odmianach sposobu powierzchni czołowe, otwór wewnętrzny i uzębienie koła zębatego zostają poddane szlifowaniu aż do uzyskania chropowatości powierzchni bocznej zęba mierzonej zarówno wzdłuż jak i poprzecznie do kierunku linii zęba, nie wyższej niż  $Ra=0,35\ \mu\text{m}$ .

Natomiast w wyżej wymienionych odmianach sposób po oszlifowaniu uzębienia koła zębatego nanosi się metodami PVD powłoki typu a-G:H:W i CrN+a-C:H:W, przy temperaturze procesu nie wyższej od 250°C.

Sposób wytwarzania kół przeznaczonych do wysoko obciążonych przemysłowych przekładni zębatach pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych według wynalazku pozwala na uzyskanie nieoczekiwanego efektu technicznego w postaci kół zębatach o zwiększonej trwałości użytkowej i charakteryzujących się zmniejszonymi stratami mocy stosunku do tradycyjnych kół zębatach. Uzyskanie poprawy trwałości zmęczeniowej materiałów możliwe jest za pomocą obróbki cieplnej, polegającej na hartowaniu z przystankiem izotermicznym powyżej temperatury początku przemiany martenzytycznej

Ms, która umożliwia wytworzenie w stalach o odpowiednim składzie chemicznym struktury nanobainitycznej. Dzięki takiej obróbce stal, uzyskuje lepsze właściwości wytrzymałościowe i użytkowe przy jednoczesnej poprawie właściwości plastycznych w porównaniu do właściwości tej samej stali po konwencjonalnej obróbce ulepszania cieplnego składającej się z dwóch procesów: hartowania i odpuszczania. Obróbka nanostrukturyzacji poprzez hartowanie izotermiczne zastępuje dwa konwencjonalne procesy technologiczne (hartowania i odpuszczania). Pozwala na uzyskanie struktury nanobainitycznej w elementach o dużej objętości i jest stosowana jako ostatni etap procesu technologicznego wytwarzania elementów konstrukcyjnych, w tym kół zębatych.

Sposób wytwarzania kół zębatych według wynalazku, którego odmiany przedstawione są poniżej w przykładach wykonania, charakteryzuje się przeprowadzeniem kolejnych następujących po sobie etapów o ściśle określonych parametrach technologicznych.

### **P r z y k ł a d I**

#### **Etap 1.**

Pręty kute ze stali 35SiCrMn5-4-4 (wg EN) o zawartości węgla 0,35 [%wag.] i zawartości krzemu 1,20 [%wag.] poddawane są obróbce cieplnej polegającej na wyżarzaniu zmiękczającemu w temperaturze 680°C przez 4 godziny w atmosferze azotu, a następnie studzone są wraz z piecem do temperatury 400°C, po czym chłodzenie do temperatury pokojowej odbywa się na wolnym powietrzu.

#### **Etap 2.**

Następnie wykonuje się znaną obróbkę skrawaniem element koła zębatego w postaci otoczki, na której nacina się uzębienie metodą frezowania obwodniowego frezem ślimakowym lub poprzez dłutowanie obwodniowe dłutakami.

#### **Etap 3.**

Wytworzone w drugim etapie element koła zębatego poddaje się znanemu procesowi niskociśnieniowego nawęglania, który prowadzi się w temperaturze 1000°C z 6 naprzemiennymi cyklami nawęglania – dyfuzja, przy czym łączny czas nawęglania wynosi 15 minut i 30 sekund, a łączny czas segmentów dyfuzji wynosi 2 godziny i 50 minut. Element jest chłodzony do temperatury 900°C z wytrzymaniem w tej temperaturze przez 10 minut, po czym schładzany jest do 650°C z przystankiem trwającym 20 minut celem perlityzacji. Następnie element koła zębatego poddawany jest austenitizacji w 850°C i ponownej perlityzacji zakończonej chłodzeniem z przystankiem w 450°C przez 10 minut. W wyniku nawęglania uzyskuje się łagodny profil koncentracji węgla o stężeniu powierzchniowym równym 0,80%C [%wag.], zawartości węgla na głębokości 0,70 mm wynosi 0,62%C (%wag.) oraz całkowitej warstwy nawęglonej o głębokości 2 mm. Po zakończeniu nawęglania element jest schładzany do temperatury pokojowej w procesie ciągłym lub stopniowym prowadzonym tak, by nie doprowadzić do odkształceń hartowniczych i procesu odpuszczania. Następnie wykonywany jest proces mycia nawęglonego elementu.

#### **Etap 4.**

Nawęglony element koła zębatego poddawany jest austenitizacji w temperaturze 900°C i w czasie 30 minut, zapewniając uzyskanie struktury austenitu w całej objętości elementu nie dopuszczając do nadmiernego rozrostu ziarna austenitu w warstwie wierzchniej i w rdzeniu.

#### **Etap 5.**

Po austenitizacji element koła zębatego poddaje się procesowi nanostrukturyzacji, gdzie chłodzi się go do temperatury 235°C i wytrzymuje izotermicznie przez 4 godziny i 15 minut. Po tym czasie element chłodzony jest na wolnym powietrzu do temperatury 25°. Po wyrównaniu temperatury w całej objętości elementu ponownie umieszcza się obrabiany element w piecu nagrzanym do temperatury 235°C i wytrzymuje izotermicznie przez 1 godzinę. Po tym czasie element schładza się na wolnym powietrzu do temperatury 25°C. Poprzez proces nanostrukturyzacji uzyskuje się warstwę nawęgloną mikrostruktury składającej się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego o zawartości 26% o twardości powierzchniowej 60HRC, Twardość powierzchni na poziomie 60 HRC zapewnia odpowiednią wytrzymałość na zmęczeniowe wykruszanie warstwy wierzchniej pokrytej powłokami typu DLC. Twardość rdzenia jest równa 51 HRC, a udarność 22J.

#### **Etap 6.**

Po przeprowadzeniu procesu nanobainityzacji powierzchnie czołowe, otwór wewnętrzny i uzębienie elementu koła zębatego zostają poddane szlifowaniu. Przy czym chropowatość powierzchni bocznej zęba mierzona zarówno wzdłuż jak (poprzecznie do kierunku linii zęba, była nie wyższa niż  $Ra=0,35 \mu\text{m}$ .

**Etap 7.**

Kolejnym etapem procesu jest naniesienie na powierzchnię, elementu koła zębatego metodami PVD powłok typu a-C:H:W i CrN+a-C:H:W, przy czym temperatura procesu nanoszenia powłok wynosi ok 250°C.

**Etap 8.**

Po zakończeniu procesu nanoszenia powłok przeprowadza się badania kontrolne pęknięć hartowniczych z wykorzystaniem metody magneto-proszkowej z użyciem lampy UV w ciemni oraz badania geometrii uzębienia i dokładności wykonania uzębienia. Korzystne jest by dokładność wykonania uzębienia nie była wyższa niż 6 klasa dokładności wg norm PN-ISO 1328 lub DIN 3962.

W wyniku przeprowadzenia procesów określonych w etapach 1+8 wytworzono koło zębate z otoczką, którego warstwa powierzchniowa odznacza się zmniejszonymi stratami spowodowanymi tarciami, podwyższoną odpornością na zużycie adhezyjne i ściernie w stosunku do stosowanych obecnie technologii wytwarzania kół zębatych, a także odpornością na zmęczeniowe wykruszenie powierzchni (pitting) nie mniejszą niż w dotychczas stosowanych technologiach wytwarzania kół zębatych.

**Przykład II****Etap 1.**

Pręty kute ze stali 30NiSiMnCr6-4-4-4 (wg EN), o zawartości węgla 0,30 [%wag.] i zawartości krzemu 1,04 [%wag.], poddawane są wyżarzaniu zmiękczającemu w temperaturze 680°C przez 4 godziny w atmosferze azotu, następnie studzone wraz z piecem do temperatury 400°C, po czym chłodzenie do temperatury pokojowej odbywa się na wolnym powietrzu.

**Etap 2.**

Następnie wykonuje się znaną obróbkę skrawaniem elementu koła zębatego w postaci otoczki, na której nacina się uzębienie metodą frezowania obwodniowego frezem ślimakowym lub poprzez dłutowanie obwodniowe dłutakami.

**Etap 3.**

Wytworzone w drugim etapie element koła zębatego poddaje się znanemu procesowi niskociśnieniowego nawęglania próżniowego, gdzie nawęglanie prowadzi się w temperaturze 1000°C z 6 naprzemiennymi cyklami nawęglania – dyfuzja, przy czym łączny czas nawęglania wynosi 19 minut 30 sekund, a łączny czas segmentów dyfuzji wynosi 4 godziny i 10 minut, po czym schładzane są do 650°C z przystankiem trwającym 20 minut celem perlityzacji, następnie poddane austenityzacji w 850°C i ponownej perlityzacji zakończonej chłodzeniem z przystankiem w 450°C przez 10 minut. W wyniku nawęglania uzyskano łagodny profil koncentracji węgla o stężeniu powierzchniowym równym 0,70% C [%wag.], zawartość węgla na głębokości 0,70 mm wynosi 0,57% C [%wag.] oraz całkowitej warstwy nawęglonej o głębokości 2 mm. Po zakończeniu nawęglania element jest schładzany do temperatury pokojowej w procesie ciągłym lub stopniowym prowadzonym tak, by nie doprowadzić do odkształceń hartowniczych koła i procesu odpuszczania. Następnie wykonywany jest proces mycia nawęglonego elementu.

**Etap 4.**

Nawęglony element stalowy poddawany jest austenityzacji w temperaturze 930°C i w czasie 30 minut, zapewniając uzyskanie struktury austenitu w całej objętości elementu nie dopuszczając do nadmiernego rozrostu ziarna austenitu w warstwie wierzchniej i w rdzeniu.

**Etap 5.**

Po austenityzacji element koła zębatego poddaje się procesowi nanostrukturyzacji, gdzie chłodzi się go do temperatury 230°C i wytrzymuje izotermicznie przez 5 godzin i 15 minut, Po tym czasie element chłodzony jest na wolnym powietrzu do temperatury 25°C. Po wyrównaniu temperatury w całej objętości elementu ponownie umieszcza się element w piecu nagrzanym do temperatury 230°C i wytrzymuje się izotermicznie przez 1 godzinę i 15 minut. Po tym czasie element schładza się na wolnym powietrzu do temperatury 25°C.

Poprzez proces nanostrukturyzacji uzyskuje się warstwę nawęglonej mikrostruktury składającej się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego o twardości powierzchniowej 60HRC. Twardość rdzenia jest równa 41 HRC, a udarność 40J. Twardość powierzchni na poziomie 60 HRC pozwala na zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości na zmęczeniowe wykruszenie warstwy wierzchniej pokrytej powłokami typu DLC.

**Etap 6.**

Po przeprowadzeniu procesu nanobainityzacji powierzchnie czołowe, otwór wewnętrzny i uzębienie koła zębatego zostają poddane szlifowaniu. Przy czym chropowatość powierzchni bocznej zęba mierzona zarówno wzdłuż jak i poprzecznie do kierunku linii zęba, była nie wyższa niż Ra-0,35 μm.

**Etap 7.**

Kolejnym etapem procesu jest naniesienie na powierzchnię elementu koła zębatego metodami PVD powłok typu a-C:H:W i CrN+a-C:H:W, przy czym temperatura procesu nanoszenia powłok wynosi ok 250°C

**Etap 8.**

Po zakończeniu procesu nanoszenia powłok przeprowadza się badania kontrolne pęknięć hartowniczych z wykorzystaniem metody magneto-proszkowej z użyciem lampy UV w ciemni oraz badania geometrii uzębienia i dokładności wykonania uzębienia. Korzystne jest by dokładność wykonania uzębienia nie była wyższa niż 6 klasa dokładności wg norm PN-ISO 1328 lub DSN 3962.

W wyniku przeprowadzenia procesów określonych w etapach 1+8 wytworzono koło zębate, którego warstwa powierzchniowa odznacza się zmniejszonymi stratami spowodowanymi tarciem, podwyższoną odpornością na zużycie adhezyjne i ściernie w stosunku do stosowanych obecnie technologii wytwarzania kół zębatych, a także odpornością na złamanie i zmęczeniowe wykruszenie powierzchni (pitting) nie mniejszą niż dotychczas stosowane technologie wytwarzania kół zębatych. Twardość rdzenia odpowiada 41 HRC, a udarność 40J.

**Przykład III a****Etap 1.**

Pręty kute ze 42NiSiCrMo8-7-3-F (wg EN), o składzie w zakresie 0,39% C; 0,62% Mn; 1,54% Si; 0,72% Cr; 0,32% Mo; 1,66% Ni poddawane są wyżarzaniu zmiękczającemu w temperaturze od 700 do 750°C przez 12-14h i studzone z piecem do temperatury 500 stopni, a następnie chłodzone na powietrzu.

**Etap 2.**

Następnie wykonuje się znaną ze stanu techniki obróbkę skrawaniem otoczki kota zębatego, na której nacina się uzębienia metodą frezowania obwodniowego frezem ślimakowym lub poprzez dłutowanie obwodniowe dłutakami.

**Etap 3.**

Wytworzony w drugim etapie element koła zębatego poddane są nawęglaniu próżniowemu metodą infekcyjną, gdzie nawęglanie prowadzi się w temperaturze 1000°C z 5 naprzemiennymi cyklami nawęglanie – dyfuzja, zakończonymi 2 godzinną dyfuzją, po czym koła są schłodzone do 900°C i wytrzymane w tej temperaturze przez 10 minut, następnie schłodzone do 650°C celem perlityzacji przez 20 minut, po czym poddane austenityzacji w 850°C i ponownej perlityzacji zakończonej chłodzeniem z przystankiem w 450°C przez 10 minut. W wyniku procesu nawęglania uzyskano zawartość węgla ok. 0,75% wag przy powierzchni oraz łagodny profil koncentracji węgla w warstwie, zapewniającego twardość nie mniejszą niż 57 HRC, a całkowita głębokość warstwy nawęglonej wynosi 2 mm. Po zakończeniu nawęglania element jest schładzany do temperatury pokojowej w procesie ciągłym lub stopniowym prowadzonym tak, by nie doprowadzić do odkształceń hartowniczych i procesu odpuszczania. Następnie wykonywany jest proces mycia nawęglonego elementu.

**Etap 4.**

Nawęglony element stalowy poddawany jest austenityzacji w temperaturze 930°C i w czasie 30 min zapewniając uzyskanie struktury austenitu w warstwie nawęglonej i w rdzeniu elementu stalowego. Temperatura i czas procesu zostały tak dobrane, aby nie dopuścić do nadmiernego rozrostu ziarna austenitu w warstwie wierzchniej i w rdzeniu.

**Etap 5.**

Po austenityzacji elementu kota poddany jest procesowi nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej przy wykorzystaniu pełnej przemiany bainitycznej, który polega na hartowaniu izotermicznym z dwoma przystankami izotermicznymi: jednym w temperaturze 340°C trwającym 3 min oraz drugim przystankiem izotermicznym w temperaturze 300°C i wytrzymaniem izotermicznym przez 16 godzin. Następnie wsad zostaje schłodzony do temperatury 25°C. W celu redukcji ewentualnych odkształceń hartowniczych koła stosuje się podczas chłodzenia jednego lub kilku przystanków izotermicznych w temperaturach wyższych niż 350oC, z zakresu 500 – 600°C, ale czas trwania tych przystanków nie przekracza 100 sekund, aby nie nastąpiło wydzielanie cementytu, ferrytu lub bainitu górnego. Poprzez proces nanostrukturyzacji uzyskuje się warstwę nawęgloną z mikrostrukturą składającą się z mieszaniny ferrytu bainitycznego

i austenitu resztkowego, którego udział objętościowy wynosił 21,5%. Twardość powierzchniowa po procesie wynosi 550 HV (52,5 HRC). Rdzeń koła ma twardość równą 410 HV (42,6 HRC) a udarność 40J. Zawartość austenitu szczątkowego w rdzeniu wynosi 10%.

Etap 6.

Po przeprowadzeniu procesu nanobainityzacji powierzchnie czołowe, otwór wewnętrzny i użębienie elementu koła zębatego zostają poddane szlifowaniu. Przy czym chropowatość powierzchni bocznej zęba mierzona zarówno wzdłuż jak i poprzecznie do kierunku linii zęba, była nie wyższa niż  $Ra=0,35 \mu\text{m}$ .

Etap 7.

Po zakończeniu procesu nanoszenia powłok przeprowadza się kontrolę geometrii użębienia i dokładności wykonania użębienia, przy czym korzystne jest by dokładność wykonania użębienia nie była wyższa niż 6 klasa dokładności wg norm PN-ISO 1328 lub DIN 3962. Z kolei kontrola pęknięć hartowniczych odbywała się z wykorzystaniem metody magneto-proszkowej z użyciem lampy UV w ciemni.

W wyniku przeprowadzenia procesów określonych w etapach 1+8 wytworzono koła zębate, których rdzeń cechuje się dużą udarnością i odpowiednią twardością. Natomiast powierzchnie wierzchnie kół mają twardość (52,5 HRC).

### **Przykład III b**

W innej odmianie sposobu według wynalazku zastosowano dla stali 42NiSiCrMo8-7-3-F wykorzystano takie same etapy technologiczne jak w przykładzie III a, z tym że zastosowany został inny etap V dotyczący procesu nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej polegający na jednostopniowym hartowaniu izotermicznym w zakresie przemiany bainitycznej. Przystanek izotermiczny realizowany w temperaturze 300°C i trwa 16 godzin aż do zakończenia przemiany bainitycznej zarówno w rdzeniu, jak i w warstwie wierzchniej. Następnie wsad zostaje schłodzony do temperatury 25°C. Poprzez ten proces nanostrukturyzacji uzyskuje się warstwę nawęgloną mikrostruktury składającej się z ferrytu bainitycznego z austenitem szczątkowym, którego udział objętościowy wynosi 7,0%. Twardość powierzchniowa po procesie wynosi 570 HV 53,3 HRC. Rdzeń koła ma twardość równą 430 HV (44,1 HRC) a udarność 46J. Z kolei zawartość austenitu szczątkowego w rdzeniu wynosi 10%. W wyniku przeprowadzenia procesów określonych w etapach 1÷8 wykonano koła zębate, których rdzeń cechuje się dużą udarnością 46J i twardością powierzchni kół 53,3 HRC.

### **Przykład III c**

W kolejnej odmianie sposobu według wynalazku etapy technologiczne I - VIII wykonane są tak jak w I - szym przykładzie wykonania z tym, że w piątym etapie proces nanostrukturyzacji polega na niepełnym hartowaniu martenzytycznym w połączeniu z partycjonowaniem węgla. Parametry temperatury i czasu tego procesu są następujące: hartowanie z przerwaniem izotermicznym w 340°C przez 3 min, następnie przerwanie izotermiczne w 230°C przez 3 godziny, hartowanie do temperatury pokojowej i partycjonowanie w 230°C przez 15 min. Następnie element zostaje schłodzony do temperatury 25°C. Poprzez proces nanostrukturyzacji uzyskuje się warstwę nawęgloną mikrostruktury składającej się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego, gdzie twardość powierzchniowa po procesie wynosi 540 HV (51 HRC), natomiast twardość rdzenia jest stosunkowo niska 370 HV (38,6 HRC), a udarność rdzenia jest bardzo duża i wynosi 58J.

### **Przykład IV**

Etap 1.

Proces obróbki cieplnej przeprowadzono na prętach kutyh ze stali X37CrMoV5-1 (wg EN) o zawartości węgla 0,37 [%wag.] i zawartości krzemu 1,0 [%wag.] dostarczonych w stanie zmiękczonym o twardości nie większej niż 230HB.

Etap 2.

Następnie wykonuje się znaną ze stanu techniki obróbkę skrawaniem otoczki koła zębatego, na której nacina się użębienia metodą frezowania obwodniowego frezem ślimakowym lub poprzez dłutowanie obwodniowe dłutakami.

Etap 3.

Wytworzony w drugim etapie element koła zębatego poddaje się procesowi niskociśnieniowego nawęglania próżniowego metodą iniekcijną w temperaturze 930°C. W wyniku nawęglania uzyskuje się nawęgloną warstwę wierzchnią o grubości 0,80 mm. Po zakończeniu nawęglania element, schładzany jest do temperatury pokojowej w procesie ciągłym lub stopniowym prowadzonym, by nie doprowadzić do odkształceń hartowniczych i procesu odpuszczania. Następnie wykonywane są procesy mycia nawęglonego elementu.

#### Etap 4.

Nawęglony element stalowy poddawany jest austenitzacji w temperaturze do 1030°C z dwoma przystankami w temperaturze 650°C w czasie 30 minut oraz w temperaturze 850°C w czasie 30 minut, a następnie wyżarzony w temperaturze austenitzacji przez 1 godzinę celem uzyskania struktury austenitu w całej objętości elementu.

#### Etap 5.

Po austenitzacji element koła poddaje się procesowi nanostrukturyzacji schładzając go przy nadciśnieniu azotu 13,5 bara do temperatury 450°C, po czym zmniejsza się ciśnienie do 2 barów i schładza do temperatury 300°C i wytrzymuje się w tej temperaturze przez 1 godzinę i 45 minut. W czasie wytrzymania izotermicznego w stali zachodzi przemiana bainityczna. Następnie elementy stalowe schładza się do temperatury do 30°C, dzięki czemu część pozostałego austenitu uległa przemianie martenzytycznej. Po czym nagrzewa się element do 245°C i wytrzymuje w tej temperaturze do 30 minut. W trakcie tego etapu następuje dyfuzja węgla z listew martenzytu do austenitu resztkowego i stabilizacja cieplna fazy austenitzycznej. Po tym czasie element schładza się na wolnym powietrzu do temperatury 25X. Zastosowane parametry procesu nanostrukturyzacji doprowadzają do uzyskania w warstwie nawęglonej mikrostruktury składającej się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego, gdzie uzyskuje się twardość powierzchniową 60,6 HRC. Twardość powierzchni na poziomie 60 HRC jest niezbędna dla zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości na zmęczeniowe wykruszenie warstwy wierzchniej pokrytej powłokami typu DLC. Twardość rdzenia jest równa 52,4 HRC, a udarność rdzenia 17J.

#### Etap 6.

Po przeprowadzeniu procesu nanostrukturyzacji, powierzchnie czołowe, otwór wewnętrzny i uzębienie elementu koła zębatego zostają poddane szlifowaniu. Przy czym jest korzystne, aby chropowatość powierzchni bocznej zęba, mierzona zarówno wzdłuż jak i poprzecznie do kierunku linii zęba, była nie wyższa niż  $Ra=0,35 \mu\text{m}$ .

#### Etap 7.

Kolejnym etapem jest naniesienie na powierzchnię elementu koła zębatego metodami PVD powłok typu a-C:H:W i CrN+a-C:H:W, przy czym temperatura procesu nanoszenia powłok wynosi 250°C.

#### Etap 8.

Po zakończeniu procesu nanoszenia powłok przeprowadza badania kontrolne pęknięć hartowniczych z wykorzystaniem metody magneto-proszkowej z użyciem lampy UV w ciemni oraz badania geometrii uzębienia i dokładności wykonania uzębienia. Korzystne jest by dokładność wykonania uzębienia nie była wyższa niż 6 klasa dokładności wg norm PN-ISO 1328 lub DIN 3962.

W wyniku przeprowadzenia procesów określonych w etapach 1÷8 wytworzono koło zębate, których warstwa powierzchniowa odznacza się zmniejszonymi stratami spowodowanymi tarcem, podwyższoną odpornością na zużycie adhezyjne i ściernie w stosunku do stosowanych obecnie technologii wytwarzania kół zębatych, a także odpornością zmęczeniową wykruszenie powierzchni (pitting) nie mniejszą niż dotychczas stosowane technologie wytwarzania kół zębatych.

## Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób wytwarzania kół zębatych polegający na poddaniu kutyh prętów obróbce cieplnej polegającej na wyżarzaniu zmiękczającym, obróbce mechanicznej kształtującej element otoczki kół zębatych, jej nawęglaniu myciu i odpuszczaniu oraz badaniu kontrolnemu pęknięć hartowniczych, **znamienny tym**, że stale niskie –lub średniostopowe o zawartości węgla od 0,15 [%wag.] do 0,55 [%wag.], zawartości krzemu od 0,9 [%wag.] do 3,0 [%wag.], zawartości manganu od 1 [%wag.] do 2 [%wag.] oraz niklu ok. 1,5 [%wag.] poddaje się procesowi w kolejnych następujących po sobie etapach technologicznych: austenitzacji, którą przeprowadza się w temperaturze od 900°C do 930°C w czasie 30 minut do uzyskania struktury austenitu w całej objętości elementu, nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej, szlifowaniu powierzchni czołowych, otworu wewnętrznego oraz uzębienia oraz naniesienia na powierzchnię otoczki kół zębatych metodami PVD powłoki typu a-C:H:W i CrN+a-C:H:W.
2. Sposób wytwarzania kół zębatych według zastrz. 1 **znamienny tym**, że proces nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej otoczki kół zębatych przeprowadza się schładzając otoczkę koła zębatego do temperatury od 230°C do 235°C i wytrzymując izotermicznie przez okres od

- 4 godzin i 15 minut do 5 godzin i 15 minut, a po tym czasie element chłodzony jest na wolnym powietrzu do temperatury 25°C, po wyrównaniu temperatury w całej objętości elementu, po czym ponownie umieszcza się go w piecu nagrzanym do temperatury od 230°C do 235°C i wytrzymuje izotermicznie przez okres od 1 godziny do 1 godziny i 15 minut, a po tym czasie element schładza się na wolnym powietrzu do temperatury 25°C, uzyskując warstwę nawęgloną mikrostruktury składającej się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego o zawartości 26%, twardości powierzchniowej 60HRC i twardości rdzenia równej 51 HRC oraz udarności 22J.
3. Sposób wytwarzania kół zębatach według zastrz. 1 **znamienny tym**, że proces nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej otoczki kół zębatach przeprowadza się przy niepełnym hartowaniu martenzytycznym w połączeniu z partycjonowaniem węgla, przy czym hartowanie odbywa się z przestankami izotermicznymi w temperaturze 340°C przez 3 min, następnie w temperaturze 230°C przez 3 godziny, a po czym następuje schładzanie do temperatury pokojowej i partycjonowanie w temperaturze 230°C przez 15 min, a następnie schładza się do temperatury 25°C, do uzyskania warstwy nawęglonej z mikrostrukturą składająca się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego, gdzie twardość powierzchniowa wynosi 540 HV (51 HRC), natomiast twardość rdzenia 370 HV (38,6 HRC), a udarność 58J.
  4. Sposób wytwarzania kół zębatach według zastrz. 1, **znamienny tym**, że proces nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej otoczki kół zębatach przeprowadza poprzez pełną przemianę bainityczną, polegającą na hartowaniu izotermicznym z dwoma przystankami izotermicznymi, jednym w temperaturze 340°C trwającym 3 min oraz drugim przystankiem izotermicznym w temperaturze 300°C i wytrzymaniem izotermicznym przez 16 godzin, następnie otoczka koła zębatego zostaje schłodzona do temperatury 25X z zastosowaniem jednego lub kilku przystanków izotermicznych w temperaturach wyższych niż 350°C, z zakresu 500–600°C, gdzie czas trwania tych przystanków nie przekracza 100 sekund, aż do uzyskania warstwy nawęglonej z mikrostrukturą składającą się z mieszaniny ferrytu bainitycznego i austenitu resztkowego, którego udział objętościowy wynosi 21,5%, twardości powierzchniowej o wartości 550 HV (52,5 HRC), przy czym rdzeń otoczki koła ma twardość równą 410 HV (42,6 HRC), udarność 40J, a zawartość austenitu szczątkowego w rdzeniu wynosi 10%.
  5. Sposób wytwarzania kół zębatach według zastrz. 1 **znamienny tym**, że proces nanostrukturyzacji warstwy wierzchniej otoczki kół zębatach przeprowadza się schładzając przy nadciśnieniu azotu 13,5 bara do temperatury 450°C, po czym zmniejsza się ciśnienie do 2 barów i schładza do temperatury 300°C i wytrzymuje się w tej temperaturze przez 1 godzinę i 45 minut, następnie elementy stalowe schładza się do temperatury do 30°C, po czym nagrzewa się je do 245°C i wytrzymuje w tej temperaturze do 30 minut, następnie schładza się na wolnym powietrzu do temperatury 25°C, uzyskując warstwę nawęgloną mikrostruktury składającej się z mieszaniny ferrytu bainitycznego, martenzytu i austenitu resztkowego o twardości powierzchniowej 60,6 HRC, twardości powierzchni 60 HRC, twardości rdzenia 52,4 HRC i udarności rdzenia 17J.
  6. Sposób wytwarzania kół zębatach według zastrz. 1 albo, 2 albo 3, albo 4, albo 5, **znamienny tym**, że powierzchnie czołowe, otwór wewnętrzny i uzębienie koła zębatego zostają poddane szlifowaniu aż do uzyskania chropowatości powierzchni bocznej zęba mierzonej zarówno wzdłuż jak i poprzecznie do kierunku linii zęba, nie wyższej niż  $Ra=0,35 \mu\text{m}$ .
  7. Sposób wytwarzania kół zębatach według zastrz. 1, albo 2, albo 3, albo 4, albo 5, albo 7 **znamienny tym**, że po oszlifowaniu uzębienia koła zębatego nanosi się metodami PVD powłoki typu a-C:H:W i CrN+a-C:H:W, przy temperaturze procesu nie wyższej od 250°C.