

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **221932**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **398270**

(22) Data zgłoszenia: **29.02.2012**

(51) Int.Cl.

C22F 1/04 (2006.01)

C23C 14/22 (2006.01)

C23C 16/44 (2006.01)

(54)

Sposób polepszania właściwości mechanicznych stopów aluminium

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

02.09.2013 BUP 18/13

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

30.06.2016 WUP 06/16

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, Łódź, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:

ŁUKASZ KACZMAREK, Łódź, PL
MARIUSZ STEGLIŃSKI, Rąbień, PL
JACEK SAWICKI, Łódź, PL
PIOTR KULA, Łódź, PL
KAROL KYZIOŁ, Wolbrom, PL
DAMIAN BATORY, Łódź, PL
DANIEL KOTTFER, Košice, SK
LESZEK KLIMEK, Pabianice, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Ewa Kaczur-Kaczyńska

PL 221932 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób polepszania właściwości mechanicznych stopów aluminium utwardzanych wydzieleniowo, zwłaszcza podwyższania odporności na zmęczenie stykowe oraz obniżania współczynnika tarcia.

W przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, zbrojeniowym niezbędne jest stosowanie elementów wykonanych z materiałów lekkich i jednocześnie o wymaganych właściwościach mechanicznych, zwłaszcza o wysokiej odporności na zmęczenie stykowe i niskim współczynniku tarcia.

Z opisów patentowych US 5028393 i US 6790407 jest znany sposób podwyższania właściwości mechanicznych stopów aluminium w drodze optymalizacji składu chemicznego, pod kątem zmniejszania wielkości ziarna i wytworzenia koherentnych faz umacniających, podwyższających odporność na zmęczenie oraz odporność na zacieranie.

Znany jest sposób podwyższenia właściwości mechanicznych stopów aluminium polegający na poddaniu stopu przesycaniu oraz trójstopniowemu starzeniu w temperaturach 190–230 F, 230 F i 315–380 F (opis patentowy US 4431467), bądź na przesycaniu i dwustopniowym starzeniu w temperaturach 250 F i 315 F (opis patentowy US 7214281).

Znane są także sposoby podwyższania właściwości mechanicznych stopów aluminium w drodze obróbki plastycznej polegające na:

- przeciskaniu stopu przez zagięty kanał, opisane w czasopismach: *Reviews on Advanced Materials Science*, 8, 2004, s. 107), *Applied Mathematical Modelling* (2010). 34. 1901–1917, *International Journal Advanced Manufacturing Technology* (2010). 46. 411–421. *Materials Science Engineering* (2010). 527. 2831–2844,
- hydrostatycznym wyciskaniu, opisany w czasopiśmie *Archives of Metallurgy and Materials* 52, 29–34,
- cyklicznym wyciskaniu ściskającym, opisane w czasopismach: *International Journal of Material Forming* 1 479–482 i *Archives of Metallurgy and Materials* 52. 49–54,
- skręcaniu pod wysokim ciśnieniem, opisany w czasopiśmie *Materials Science and Engineering A*, (2001) 877–88,
- nagniataniu powierzchniowym, opisany w czasopiśmie *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 222. 947–952,
- udarowym umacnianiu laserowym, opisany w czasopiśmie *Inżynieria Materiałowa* 5, 619–621 i 622–624,
- śrutowaniu, opisany w czasopiśmie *International Journal of Fatigue* 25 (2003) 59–66,
- nagniataniu, wskazany w czasopiśmie *Journal of Materials Processing Technology* 186 (2007) 272–278.

Z opisu patentowego US 4412870 jest znany sposób podwyższania właściwości mechanicznych stopów aluminium w drodze obróbki cieplno-plastycznej, pod kątem zmniejszenia wielkości ziarna i wytworzenia międzymetalicznych faz umacniających na bazie Al -Fe-Si, Al -Fe-Mn, Al -Fe-Mn-Si o wysokiej dyspersji w ośrodku ciągłym.

Znane są także sposoby podwyższania odporności na zużycie stopów aluminium w drodze osadzania powłok o obniżonym współczynniku tarcia, metodami takimi jak

- fizyczne osadzanie z fazy gazowej PVD,
 - chemiczne osadzanie z fazy gazowej wspomagane plazmą PACVD,
- obie opisane w czasopiśmie *Thin Solid Films*, 515, 2006. s.1480,
- rozpylanie magnetronowe, implantacja jonowa, opisana w czasopiśmie *Surface and Coatings Technology*, 180–181, 2004, s. 118.
 - impulsowe osadzanie laserowe powłok tribologicznych typu BN, SiC, TiN, AlN-(PLD), opisane w czasopismach: *Surface and Coatings Technology* 97, 1997, s. 448, *Archives of Metallurgy and Materials*, 50, 2005, s. 35, *Applied Surface Science*, 127–129, 1998, s. 726, *Inżynieria Materiałowa* 5 (112), 1999, s. 339,
 - osadzanie w złożu fluidalnym, opisane w czasopiśmie *Surface and Coatings Technology* 142–144, 2001, s. 235.
 - natryskiwanie termiczne, opisane w czasopiśmie *Surface and Coatings Technology* 201, 2001, s. 1995 oraz *Surface and Coatings Technology* 180–181, 2004, s. 429,

– technologia duplex, polegająca na naniesieniu na stop PA6 relatywnie grubej warstwy w układzie Ni-P/TiN, gdzie warstwę pośrednią stanowi Zn, opisana w czasopiśmie Inżynieria Materiałowa 5 (153), 2006, s. 875.

Z czasopisma Inżynieria Materiałowa 5 (153), 2006, s. 868 jest znane osadzanie powłok gradientowych Ti/TiC/C, charakteryzujących się niskim współczynnikiem tarcia na stali.

Sposób polepszania właściwości mechanicznych stopów aluminium, polegający na: przesycaniu stopu w temperaturze 500–520°C w czasie 17 godzin z schłodzeniem w wodzie lub oleju, dwustopniowym starzeniu, w którym pierwszy stopień prowadzi się w temperaturze 60–160°C w czasie 1–60 minut, zaś drugi w temperaturze 20–200°C w czasie 60–240 minut, obróbce plastycznej metodą zgniotu objętościowego lub powierzchniowego oraz nakładaniu powłoki metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, **według wynalazku** charakteryzuje się tym, że stop poddaje się obróbce plastycznej przed procesem dwustopniowego starzenia lub pierwszy stopień starzenia prowadzi się z obróbką plastyczną, zaś w trakcie drugiego stopnia starzenia na powierzchni stopu osadza się powłokę gradientową Ti/TiC/C, Al/AlC/C lub N/SiCNH, o grubości 7 pm–20 nm. Obróbkę plastyczną metodą zgniotu objętościowego prowadzi się poprzez dwukrotne przeciskanie materiału przez kanał o kącie zagięcia 90° z prędkością 0,16–3 mm/s i w temperaturze 40–80°C, zaś obróbkę metodą zgniotu powierzchniowego prowadzi się poprzez kulowanie powierzchni materiału śrutem stalowym o średnicy 0,26 mm, przy ciśnieniu 0,4–0,8 MPa, odległości dyszy od powierzchni 50–90 mm i w temperaturze pokojowej. Nakładanie powłoki gradientowej metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, prowadzi się z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody tytanowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża 150–600 V, lub z wykorzystaniem mieszaniny gazów SiH₄, CH₄, N₂ i Ar użytych w proporcji 1:7:160:200.

W wyniku zastosowania sposobu według wynalazku uzyskuje się stop aluminium o małej masie i równocześnie o gradiencie twardości od podłoża do powierzchni w zakresie 2 GPa–25 GPa, podwyższonej o 10–15% odporności na zmęczenie stykowe i o współczynniku tarcia na poziomie 0,04.

Sposób według wynalazku ilustrują poniższe przykłady.

Przykład I

Stop aluminium zawierający: 1,6% Cu, 2,5% Mg, 0,3% Mn, 0,4% Si, 0,23% Cr, 5,6% Zn, 0,5% Fe poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie pierwszy stopień starzenia stopu prowadzono z obróbką plastyczną metodą zgniotu objętościowego, polegającą na dwukrotnym przeciskaniu przez kanał zagięty pod kątem 90° z prędkością 0,16 mm/s w czasie 60 minut, w temperaturze 60°C. Podczas drugiego stopnia starzenia, który prowadzono w temperaturze 180°C w czasie 240 minut, osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Ti/TiC/C metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody tytanowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża równej 600 V.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 25 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 15% oraz współczynniku tarcia równym 0,04.

Przykład II

Stop aluminium jak w przykładzie I poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie pierwszy stopień starzenia stopu prowadzono z obróbką plastyczną metodą zgniotu objętościowego, polegającą na dwukrotnym przeciskaniu przez zagięty kanał zagięty pod kątem 90° z prędkością 3 mm/s w czasie 2 minut, w temperaturze 160°C. Podczas drugiego stopnia starzenia, który prowadzono w temperaturze 160°C w czasie 240 minut, osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Al/AlC/C metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody aluminiowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża równej 600 V.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 24 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 15% oraz współczynniku tarcia równym 0,04.

Przykład III

Stop aluminium jak w przykładzie I poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie pierwszy stopień starzenia stopu prowadzono z obróbką plastyczną metodą zgniotu objętościowego, polegającą na dwukrotnym przeciskaniu przez kanał zagięty pod kątem 90° z prędkością 0,16 mm/s w czasie 60 minut, w temperaturze 60°C. Podczas drugiego stopnia starzenia, który prowadzono w temperaturze 180°C w czasie 240 minut, osadzano na powierzchni

stopu powłokę gradientową N/SiCNH metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z wykorzystaniem mieszaniny gazów SiH₄, CH₄, N₂ i Ar użytych w proporcji 1:7:160:200.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 8 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 10% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Przykład IV

Stop aluminium jak w przykładzie I poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie pierwszy stopień starzenia stopu prowadzono z obróbką plastyczną metodą zgniotu objętościowego, polegającą na dwukrotnym przeciskaniu przez kanał zagięty pod kątem 90°C z prędkością 0,16 mm/s w czasie 5 minut, w temperaturze 160°C. Podczas drugiego stopnia starzenia, który prowadzono w temperaturze 100°C w czasie 240 minut, osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Al/AlC/C metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody aluminiowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża równej 150 V.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 11 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 10% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Przykład V

Stop aluminium zawierający: 5,23% Cu, 0,695% Mg, 0,026% Mn, 0,7% Si, 0,012% Ni, 0,164% Fe, 0,05% Zn, 0,019% Ti, 0,01% Cr, 2,0% Li poddano przesycaniu w temperaturze 500°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie pierwszy stopień starzenia stopu prowadzono z obróbką plastyczną metodą zgniotu objętościowego, polegającą na dwukrotnym przeciskaniu przez kanał zagięty pod kątem 90° z prędkością 0,16 mm/s w czasie 5 minut, w temperaturze 160°C. Podczas drugiego stopnia starzenia, który prowadzono w temperaturze 100°C w czasie 240 minut, osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Al/AlC/C metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody aluminiowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża równej 150 V.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 12 GPa. o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 10% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Przykład VI

Stop aluminium zawierający: 5,23% Cu, 0,695% Mg, 0,026% Mn, 0,7% Si, 0,012% Ni, 0,164% Fe, 0,05% Zn, 0,019% Ti, 0,01% Cr, 2,0% Li poddano przesycaniu w temperaturze 500°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie wykonano zgniot powierzchniowy stopu poprzez kulowanie w temperaturze pokojowej śrutem stalowym o średnicy 0,26 mm, przy ciśnieniu 0,4 MPa i odległości dyszy od powierzchni 7 cm, a następnie prowadzono pierwszy stopień starzenia w temperaturze 60°C w czasie 30 minut, po którym prowadzono drugi stopień starzenia w temperaturze 100°C w czasie 240 minut, podczas którego osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Al/AlC/C metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody aluminiowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża równej 150 V.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 15 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 12% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Przykład VII

Stop aluminium zawierający: 5,0% Mg, 1,0% Mn, 0,8% Sc, 0,4% Zr poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie wykonano zgniot powierzchniowy stopu poprzez kulowanie w temperaturze pokojowej śrutem stalowym o średnicy 0,26 mm, przy ciśnieniu 0,8 MPa i odległości dyszy od powierzchni 7 cm, a następnie prowadzono pierwszy stopień starzenia stopu w temperaturze 60°C w czasie 30 minut, po którym prowadzono drugi stopień starzenia w temperaturze 100°C w czasie 240 minut, podczas którego osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową N/SiCNH metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z wykorzystaniem mieszaniny gazów SiH₄, CH₄, N₂ i Ar użytych w proporcji 1:7:160:200.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 15 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 12% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Przykład VIII

Stop aluminium zawierający: 2,7% Cu, 2,2% Li, 0,4% Ag, 0,12% Zr poddano przesycaniu w temperaturze 500°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie pierwszy stopień starzenia stopu prowadzono z obróbką plastyczną metodą zgniotu objętościowego, polegającą na dwukrotnym przeciskaniu przez kanał zagięty pod kątem 90° z prędkością 0,2 mm/s w czasie 50 minut, w temperaturze 60°C. Podczas drugiego stopnia starzenia, który prowadzono w temperaturze 180°C w czasie 240 minut, osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową N/SiCNH metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z wykorzystaniem mieszaniny gazów SiH₄, CH₄, N₂ i Ar użytych w proporcji 1:7:160:200.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 9 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 10% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Przykład IX

Stop aluminium zawierający: 2,45% Li, 0,12% Zr, 1,3% Cu, 0,95% Mg poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie pierwszy stopień starzenia stopu prowadzono z obróbką plastyczną metodą zgniotu objętościowego, polegającą na dwukrotnym przeciskaniu przez kanał zagięty pod kątem 90° z prędkością 0,16 mm/s w czasie 60 minut, w temperaturze 60°C. Podczas drugiego stopnia starzenia, który prowadzono w temperaturze 180°C w czasie 240 minut, osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Ti/TiC/C metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody tytanowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża równej 600 V.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 25 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 15% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Przykład X

Stop aluminium zawierający: 2,45% Li, 0,12% Zr, 1,3% Cu, 0,95% Mg poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie wykonano zgniot powierzchniowy stopu poprzez kulowanie w temperaturze pokojowej śrutem stalowym o średnicy 0,26 mm, przy ciśnieniu 0,4 MPa i odległości dyszy od powierzchni 9 cm, a następnie prowadzono pierwszy stopień starzenia stopu w temperaturze 60°C w czasie 30 minut, po którym prowadzono drugi stopień starzenia w temperaturze 100°C w czasie 240 minut, podczas którego osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Ti/TiC/C metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody tytanowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża równej 600 V.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 24 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 14% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Przykład XI

Stop aluminium zawierający: 4,5% Cu, 1,37% Mg, 0,6% Mn, 0,07% Si, 0,27% Fe, 0,02% Zn, 0,02% Ti poddano przesycaniu w temperaturze 500°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie pierwszy stopień starzenia stopu prowadzono z obróbką plastyczną metodą zgniotu objętościowego, polegającą na dwukrotnym przeciskaniu przez kanał zagięty pod kątem 90° z prędkością 3 mm/s w czasie 2 minut, w temperaturze 160°C. Podczas drugiego stopnia starzenia, który prowadzono w temperaturze 100°C w czasie 240 minut, osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Al/AlC/C w drodze chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody aluminiowej, z wykorzystaniem CH₄ i przy polaryzacji podłoża równej 600 V.

Uzyskano stop aluminium o małej masie, o twardości powierzchni równej 24 GPa, o wysokiej dyspersji faz umacniających, o odporności na zmęczenie stykowe podwyższonej o 15% oraz współczynnika tarcia równym 0,04.

Do celów porównawczych stop aluminium zawierający: 1,6% Cu, 2,5% Mg, 0,3% Mn, 0,4% Si, 0,23% Cr, 5,6% Zn, 0,5% Fe poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin, i po schłodzeniu w wodzie prowadzono pierwszy stopień starzenia stopu w temperaturze 60°C w czasie 60 minut, a następnie drugi stopień starzenia w temperaturze 200°C w czasie 180 minut, podczas którego osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Ti/TiC/C w drodze chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy zastosowaniu

katody tytanowej, z wykorzystaniem CH_4 i polaryzacji podłoża równej 150 V. Stop po tej obróbce charakteryzował się małą masą, twardością powierzchni równą 10 GPa, wysoką dyspersją faz umacniających, odpornością na zmęczenie stykowe podwyższoną o 10% oraz współczynnikiem tarcia równym 0,04.

Również dla celów porównawczych stop aluminium zawierający: 11% Zn, 1,1% Cu, 2,3% Mg poddano przesycaniu w temperaturze 520°C w czasie 17 godzin i po schłodzeniu w wodzie prowadzono pierwszy stopień starzenia stopu w temperaturze 60°C w czasie 60 minut, a następnie drugi stopień starzenia w temperaturze 200°C w czasie 180 minut, podczas którego osadzano na powierzchni stopu powłokę gradientową Ti/TiC/C metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody tytanowej, z wykorzystaniem CH_4 i przy polaryzacji podłoża równej 150 V. Stop po tej obróbce charakteryzował się małą masą, twardością powierzchni równą 10 GPa, wysoką dyspersją faz umacniających, odpornością na zmęczenie stykowe podwyższoną o 11% oraz współczynnikiem tarcia równym 0,04.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób polepszania właściwości mechanicznych stopów aluminium, polegający na: przesycaniu stopu w temperaturze 500–520°C w czasie 17 godzin z schłodzeniem w wodzie lub oleju, dwustopniowym starzeniu, w którym pierwszy stopień prowadzi się w temperaturze 60–160°C w czasie 1–60 minut, zaś drugi w temperaturze 20–200°C w czasie 60–240 minut, obróbce plastycznej metodą zgniotu objętościowego lub powierzchniowego, oraz nakładaniu powłoki metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, **znamienny tym**, że stop poddaje się obróbce plastycznej przed procesem dwustopniowego starzenia lub pierwszy stopień starzenia prowadzi się z obróbką plastyczną, zaś w trakcie drugiego stopnia starzenia na powierzchni stopu osadza się powłokę gradientową Ti/TiC/C, Al/AlC/C lub N/SiCNH, o grubości 7 nm–20 nm.

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że obróbkę plastyczną metodą zgniotu objętościowego prowadzi się poprzez dwukrotne przeciskanie materiału przez kanał o kącie zagięcia 90° z prędkością 0,16–3 mm/s i w temperaturze 40–80°C, zaś obróbkę metodą zgniotu powierzchniowego prowadzi się poprzez kulowanie powierzchni materiału śrutem stalowym o średnicy 0,26 mm, przy ciśnieniu 0,4–0,8 MPa, odległości dyszy od powierzchni 50–90 mm i w temperaturze pokojowej.

3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że nakładanie powłoki gradientowej metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą – PACVD, prowadzi się z rozpylaniem magnetronowym przy użyciu katody tytanowej, z wykorzystaniem CH_4 i przy polaryzacji podłoża 150–600 V, lub z wykorzystaniem mieszaniny gazów SiH_4 , CH_4 , N_2 i Ar użytych w proporcji 1:7:160:200.