

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 243157 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **436264**

(22) Data zgłoszenia: **2020.12.08**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2022.06.13 BUP 24/2022**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2023.07.10 WUP 28/2023**

(51) MKP:

C22C 38/02 (2006.01)

C22C 38/04 (2006.01)

C22C 38/06 (2006.01)

C22C 38/14 (2006.01)

C21D 8/02 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, Wrocław, PL
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE,
Kraków, PL

(72) Twórca(-y) wynalazku:

BEATA BIAŁOBRZESKA, Brzezinka Średzka, PL
PIOTR BAŁA, Rzeszotary, PL
RAFAŁ DZIURKA, Pcim, PL

(74) Pełnomocnik:

Bartosz Kuriata, Wrocław, PL

(54) Tytuł:

Staliwo drobnoziarniste o podwyższonej odporności na ścieranie

PL 243157 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest staliwo drobnoziarniste o podwyższonej odporności na ścieranie, które przeznaczone jest do obróbki cieplnej i które znajduje zastosowanie przy wytwarzaniu elementów i części maszyn pracujących w warunkach zużywania ściernego i obciążeń dynamicznych.

Zużywanie ściernych elementów maszyn stanowi jeden ze współczesnych problemów inżynierskich, generujących wysokie koszty związane z ich eksploatacją. Z uwagi na trudne warunki pracy tych elementów, często dochodzi do ich wymiany, co pociąga za sobą wysokie koszty. Opracowywanie materiałów charakteryzujących się wysoką odpornością na ścieranie pozwoli ograniczyć koszty związane z eksploatacją maszyn wynikające z bezpośredniego zużycia elementów roboczych, jak przestojów pracy, a przy jednoczesnym zastosowaniu mniejszych przekrojów, kosztów związanych ze zużyciem energii, co ograniczy emisję szkodliwych związków chemicznych.

Obecnie można wyróżnić cztery główne grupy materiałów metalicznych charakteryzujących się podwyższoną odpornością za zużywanie ściernych:

- wysokomanganowe staliwo Hadfielda gatunku L120G13 wg normy PN-H-83160:1988, PN-EN 10349:2009 i jego modyfikacje zawierające dodatki pierwiastków węglotwórczych. W stanie lanym, staliwo to posiada niekorzystną strukturę ze względu na iglastą postać węglików żelaza i manganu, które dodatkowo rozłożone są na granicach ziaren. Jeszcze większy efekt segregacji pierwiastków i wydzielenia się węglików w postaci iglastej występuje w stopach, do których wprowadza się pierwiastki silnie węglotwórcze, takie jak chrom czy molibden, w celu poprawy odporności na ścieranie. Wprowadzenie tych pierwiastków prowadzi również do tego, że w odlewach, głównie na granicach ziaren, wydzielają się zwiększone ilości złożonych węglików. Z wyżej wymienionych powodów zachodzi konieczność poddania wytworzonych odlewów obróbce cieplnej, polegającej na przesycaniu w wodzie, która ma na celu uzyskanie struktury czysto austenitycznej bez wydzielenia węglików. Wadą tego staliwa jest to, że w warunkach ścierania bez udziału dużych obciążeń, na przykład ścieranie piaskiem, materiał ten ulega szybkiemu zużyciu, gdyż staliwo Hadfielda umacnia się pod wpływem dużych nacisków, powodujących wystąpienie efektu zgniotu na zimno;
- według normy PN-EN 10293:2015 dotyczącej staliw konstrukcyjnych można wyróżnić kilka gatunków staliw niskostopowych, średniowęglowych o zbliżonym składzie chemicznym pierwiastków podstawowych, takich jak C, Mn, Si czy Cr, które zostały przedstawione w poniższej pierwszej tabeli. Jeszcze bliższym przykładem staliwa znormalizowanego są pochodzące z nieaktualnych norm PN-H-83156:1997, PN-H-83160:1988, PN-EN 10349:2009 przedstawione w drugiej poniższej tabeli staliwa odporne na ścieranie. Staliwa te nie zawierają jednak w swoim składzie chemicznym typowych pierwiastków silnie hamujących rozrost ziarna, co stwarza ryzyko gruboziarnistości;

Wybrane staliwa z normy PN-EN 10293:2015.

| | C | | Si | Mn | | P | S | Cr | | Mo | | Ni | | Mo | |
|--------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| | min | max | max | min | max | max | max | min | max | min | max | min | max | min | max |
| G28Mn6 | 0,25 | 0,32 | 0,60 | 1,20 | 1,80 | 0,035 | 0,030 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| G34CrMo4 | 0,38 | 0,45 | 0,60 | 0,50 | 0,80 | 0,025 | 0,020 | 0,8 | 1,2 | 0,15 | 0,30 | - | - | - | - |
| G42CrMo4 | 0,38 | 0,45 | 0,60 | 0,60 | 1,00 | 0,025 | 0,020 | 0,8 | 1,2 | 0,15 | 0,30 | - | - | - | - |
| G42CrMoV6-4 | 0,27 | 0,34 | 0,60 | 0,60 | 1,00 | 0,025 | 0,020 | 1,3 | 1,7 | 0,30 | 0,50 | - | - | 0,05 | 0,15 |
| G35CrNiMo6-6 | 0,32 | 0,38 | 0,60 | 0,60 | 1,00 | 0,025 | 0,020 | 1,4 | 1,7 | 0,15 | 0,35 | 1,40 | 1,70 | - | - |

Skład chemiczny wybranych staliw odpornych na ścieranie według norm: PN-H-83156:1997, PN-H-83160-1988, PN-EN 10349:2009.

| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | V | Ti | Al | B |
|--------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|----|----|---|
| L30GS | 0,25 | 0,60 | 1,40 | max. | max. | max. | max. | - | max. | - | - | - | - |
| | 0,35 | 0,80 | 1,80 | 0,040 | 0,035 | 0,30 | 0,30 | - | 0,30 | - | - | - | - |
| L40GM | 0,35 | 0,20 | 1,40 | max. | max. | max. | max. | 0,15 | - | - | - | - | - |
| | 0,45 | 0,40 | 1,80 | 0,040 | 0,035 | 0,35 | 0,30 | 0,30 | - | - | - | - | - |
| L40HF | 0,35 | 0,20 | 0,50 | max. | max. | 1,00 | max. | - | - | 0,15 | - | - | - |
| | 0,45 | 0,50 | 0,80 | 0,040 | 0,040 | 1,40 | 0,30 | - | - | 0,30 | - | - | - |
| L35GSM | 0,32 | 0,60 | 1,20 | max. | max. | max. | max. | 0,30 | max. | - | - | - | - |
| | 0,40 | 0,80 | 1,40 | 0,030 | 0,030 | 0,30 | 0,30 | 0,40 | 0,30 | - | - | - | - |

- żeliwo wysokochromowe o zawartości chromu (zwykle powyżej 15%). Chrom poprzez tworzenie węgla typu M_7C_3 poprawia odporność na zużycie i obecnie żeliwo to jest głównym materiałem o wysokiej ścieralności, który jednak może pracować tylko w warunkach niskich obciążeń dynamicznych, ze względu na małą odporność na kruche pękanie; oraz
- niskostopowe martenzytyczne stałe z borem, typu Hardox. Jednym z ograniczeń w stosowaniu tych stali może być jednak trudność kształtowania wyrobów gotowych z wykorzystaniem konwencjonalnych technik obróbki ubytkowej. Wynika to z wysokiej twardości tych stali, a w konsekwencji potrzeby używania drogich narzędzi, które szybko ulegają zużyciu, co może być ekonomicznie nieopłacalne, jak również z możliwości wystąpienia w strefie wpływu ciepła, na przykład podczas cięcia palnikiem acetylenowo-tlenowym, problemu „warstwy rozhartowanej” („warstwy miękkiej”), która decyduje o wytrzymałości całej konstrukcji.

Amerykański dokument patentowy U2013299254B2 ujawnia odporny na ścieranie, wysoko wytrzymały i ciągliwy stop o następującym składzie chemicznym (% wag.): 0,22–0,35% węgla, 0,10–0,40% krzemu, 0,60–1,35% manganu, $\leq 0,015\%$ fosforu, $\leq 0,010\%$ siarki, 0,010–0,040% niobu, 0,010–0,080% aluminium, 0,0006–0,0014% boru, 0,005–0,050% tytanu, 0,0010–0,0080% wapnia, $\leq 0,080\%$ wanadu, $\leq 0,60\%$ chromu, $\leq 1,00$ wolframu, $\leq 0,0080\%$ azotu, $\leq 0,0060\%$ tlenu, $\leq 0,0004\%$ wodoru, 0,025% \leq niobu + tytanu $\leq 0,080\%$, 0,030% \leq aluminium + tytanu $\leq 0,12\%$, resztę stanowi żelazo i nieuniknione zanieczyszczenia. Proponowany stop jest stalą, która wymaga dodatkowych technik w procesie wytwórczym jak walcowanie, które zwiększają koszty wytwarzania.

Chiński dokument patentowy CN101775545B ujawnia odporną na ścieranie stal o następującym składzie chemicznym (% wag.): 0,15–0,27 węgla, 0,20–1,0 krzemu, 0,80–1,8 manganu, $\leq 0,030$ fosforu, $\leq 0,010$ siarki, 0,20–1,0 chromu, 0,10–0,40 molibdenu, 0,010–0,040 niobu, 0,0005–0,0040 boru, 0,020–0,060 aluminium, 0,004–0,030 tytanu, resztę stanowi żelazo i nieuniknione zanieczyszczenia.

Chiński dokument patentowy CN102965588B ujawnia wysokowytrzymałe staliwo o następującym składzie chemicznym (% wag.): 0,17–0,22% węgla, 0,20–0,60% krzemu, 0,80–1,20% magnezu, $\leq 0,020\%$ fosforu, $\leq 0,015\%$ siarki, 0,45–1,05% chromu, 0,4–0,9% niklu, 0,4–0,95% molibdenu i $\leq 0,30\%$ miedzi, resztę stanowi żelazo i nieuniknione zanieczyszczenia. Stop ten jednak nie zawiera pierwiastków silnie hamujących rozrost ziarna, co stwarza ryzyko gruboziarnistości.

Zgłoszenie patentowe CN100999803 ujawnia staliwo odporne na ścieranie o wysokiej zawartości boru i o zawartości takich dodatków stopowych jak (% wag.): 0,10%–0,50% węgla, 0,8%–5,0% boru, 0,3%–0,6% miedzi, 0,8%–2,0% manganu, 1,0%–2,5% chromu, do 1,5% krzemu, 0,08%–0,20% tytanu, 0,04%–0,12% ceru, 0,02%–0,18% magnezu, 0,06%–0,18% azotu, do 0,05% siarki, do 0,05% fosforu, resztę stanowi żelazo. Ze względu na obecność borków jego odporność na ścieranie jest wysoka, ale odporność na kruche pękanie niska. Ponadto staliwo nie zawiera w swoim składzie aluminium.

Ze zgłoszenia patentowego CN104313508 znany jest stop o wysokiej odporności na utlenianie i ścieranie, zawierający w procentach wagowych: 0,45–0,52% węgla, 0,01–0,03% grafitu, 0,24–0,25% krzemu, 0,3–0,35% manganu, 0,3–0,5% chromu, 0,6–1,0% niklu, 0,01–0,03% molibdenu, 0,04–0,06% kobaltu, 0,001–0,003% telluru, 0,001–0,003% azotu, 0,001–0,003% neodymu, 0,003–0,005% cyrkonu, 0,03–0,08% wanadu, 0,2–0,6% wolframu, 0,0001–0,0005% tytanu i 0,003–0,005% boru, reszta żelazo. Stop ten nie zawiera w swoim składzie aluminium oraz ma mniejszą niż stopowa zawartość tytanu. Zawiera ponadto drogi nikiel, którego obecność podwyższa koszty produkcji.

Tak więc, problemem jaki stoi do rozwiązania przed przedmiotowym wynalazkiem jest staliwo o składzie, który hamuje rozrost ziarna podczas austenitowania w wyższych temperaturach.

Mniejsze ziarno austenitu, charakteryzujące stal i staliwa drobnoziarniste rozszerza zakres temperatur austenitacji podczas zabiegu hartowania. Efektem struktury drobnoziarnistej są lepsze własności mechaniczne (reguła Halla-Petscha) i eksploatacyjne po normalizowaniu, hartowaniu i ulepszeniu cieplnym. Jeszcze silniej, niż na własności wytrzymałościowe, rozdrobnienie ziarna wpływa na udarność. W temperaturze pokojowej twardość, granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i udarność rosną wraz ze zmniejszeniem wielkości ziarna. Stopień rozdrobnienia ziarna (struktura materiału) wiąże się również z naprężeniami występującymi w materiale poddawanemu obróbce cieplnej. W tym przypadku mowa o naprężeniach II rodzaju, które powstają w wyniku niejednorodności budowy ciał metalicznych złożonych z ziaren oraz bloków ziaren, które wpływają na anizotropię właściwości sprężystych i plastycznych.

Celem wynalazku jest uzyskanie drobnoziarnistego staliwa przeznaczonego do obróbki cieplnej, z którego wykonane odlewy elementów maszyn mogłyby pracować w warunkach zużycia ściernego i obciążeń dynamicznych.

Staliwo drobnoziarniste o podwyższonej odporności na ścieranie, w którego skład wchodzi: węgiel w ilości 0,25–0,30% wag., krzem w ilości 0,30–0,50% wag., mangan w ilości 1,30–1,50% wag., chrom w ilości 0,8–1,00% wag., fosfor w ilości do 0,025% wag., siarka w ilości do 0,015%, miedź w ilości do 0,30% wag. oraz azot w ilości 100–200 ppm wag., reszta żelazo i nieuniknione zanieczyszczenia (domieszki), według wynalazku charakteryzuje się tym, iż w jego skład wchodzi również aluminium w ilości 0,30–0,40% wag. oraz tytan w ilości 0,050–0,060% wag.

W przeciwieństwie do staliw odtlenionych żelazomanganem, odtlenianie stopu za pomocą aluminium pozytywnie wpływa na rozdrobnienie ziarna. Drobnodispersyjne azotki AlN stanowią przeszkodę do rozrostu ziarna austenitu podczas procesów obróbki cieplnej, a rozpuszczają się dopiero w zakresie temperatur 950%–1000°C. W staliwach do pracy w temperaturach ujemnych dodatek aluminium powinien być stosowany w niewielkich ilościach lub przy obniżonych ilościach azotu, ponieważ azotki pogarszają ich udarność. Zawartość procentowa aluminium w celu odtlenienia materiału bywa skorelowana z zawartością węgla – dla większych ilości węgla należy zredukować ilość aluminium, gdyż zarówno węgiel, jak i związane w azotkach aluminium znacznie zmniejszają ciągliwość.

Węglik, jak i azotki tytanu, mają wpływ na rozdrobnienie ziarna. Tytan tworzy bardzo twarde węglik TiC, które są stabilne do temperatury 1050°C. Ogranicza także rozpuszczalność azotu w roztworze stałym wiążąc go w azotki typu TiN (rzadziej Ti₂N), które są częściowo formowane podczas krystalizacji w przestrzeniach międzydendrytycznych, a kolejno w austenicie, także w formie Ti(C,N), które charakteryzują się większą stabilnością niż VN czy AlN. Zarówno węglik, jak i azotki tytanu wyraźnie hamują rozrost ziarna austenitu w wysokich temperaturach, przy czym największy wpływ na stabilizację austenitu w wyższych temperaturach mają azotki tytanu TiN. Dopiero z braku azotu pojawiają się w strukturze głównie węglik TiC. Wraz ze wzrostem przechłodzenia uzyskuje się większe rozdrobnienie wydzielającej się fazy TiN. W porównaniu do innych popularnych mikrodotyków, tytan najsilniej wpływa na proces hamowania rozrostu ziarna (przez podwyższenie temperatury rozrostu ziarna nawet powyżej 1200°C), przy czym efekt ten jest większy, im więcej tytanu znajduje się w stopie. Dodatek tytanu obniża plastyczność materiału w wysokich temperaturach, czego efekt może być osłabiony przez zredukowanie ilości azotu lub domieszkowanie aluminium. A zatem tytan do stopu powinien być dodawany kompleksowo wraz z aluminium. W staliwie, będącym przedmiotem wynalazku zawartość tytanu określono na poziomie 0,05–0,06%.

Wprowadzenie w procesie metalurgicznym do ciekłego staliwa aluminium i tytanu w ilości według wynalazku powoduje wytworzenie azotków, które przeciwdziałają rozrostowi ziarna podczas austenitowania, nie tylko w niższych temperaturach. Umożliwia to stosowanie wyższych temperatur i poprawia właściwości po obróbce cieplnej, dzięki uzyskaniu drobnoziarnistej struktury. Zaznacza się, że tytan i aluminium muszą zostać wprowadzone kompleksowo, gdyż sama obecność jednego z pierwiastków nie zabezpiecza w pełni przed rozrostem ziarna.

Przedmiot wynalazku został bliżej objaśniony w oparciu o rysunek, na którym na fig. 1 pokazano średnie wartości średnic ziarna oraz wartości minimalne i maksymalne dla staliwa o składzie chemicznym z aluminium i tytanem oraz z samym aluminium bez tytanu w zależności od temperatury austenitacji, fig. 2 mikrostruktury wytopów z tytanem i bez tytanu z ujawnionym ziarnem austenitu po auste-

nityzacji w temperaturach 850, 1000 i 1100°C, fig. 3 wykres CTPc staliwa o składzie chemicznym zawartym w przykładzie pierwszym, fig. 4 wykres CTPc staliwa o składzie chemicznym zawartym w przykładzie drugim, a fig. 5 wykres CTPc staliwa o składzie chemicznym zawartym w przykładzie trzecim.

Dopuszcza się wahania zawartości procentowej pierwiastków w podanych w istocie wynalazku zakresach, gdyż nie ma to istotnego wpływu na krzywe początku i końca przemian oznaczone na wykresie CTPc, jak również twardości, a tym samym odporność na ścieranie. W przykładzie 1 przedstawiono reprezentatywny skład chemiczny wytopu wraz z wykresem CTPc, który został opracowany na drodze eksperymentu. W przykładach 2 i 3 przedstawiono wykresy CTPc opracowane na podstawie modeli komputerowych dla wytopów zawierających skrajne zawartości dodatków stopowych.

Przykład 1

Skład chemiczny według analizowanego wytopu wynalazku. Dla uzyskania wytopu według wynalazku wszystkie razem wskazane poniżej składniki miesza się w kadzi odlewniczej.

| Lp. | składnik | ilość | Lp. | składnik | ilość |
|-----|-------------|-------|-----|--------------|----------------|
| 1 | C [% wag.] | 0,30 | 8 | Al [% wag.] | 0,039 |
| 2 | Si [% wag.] | 0,47 | 9 | Cu [% wag.] | 0,110 |
| 3 | Mn [% wag.] | 1,45 | 10 | V [% wag.] | 0,013 |
| 4 | P [% wag.] | 0,017 | 11 | Ni [% wag.] | 0,112 |
| 5 | S [% wag.] | 0,010 | 12 | Mo [% wag.] | 0,029 |
| 6 | Cr [% wag.] | 1,00 | 13 | N [ppm wag.] | 161 |
| 7 | Ti [% wag.] | 0,059 | 14 | Fe [% wag.] | reszta do 100% |

W stopie dopuszcza się nieuniknione zanieczyszczenia (domieszki), wynikające z procesu metalurgicznego, jak w powyższym przykładzie: V, Ni, Mo. Zawartość domieszek nie przekracza granicznej zawartości stopowej, a do tych wartości nie obserwuje się ich wpływu na właściwości.

Wykres CTPc, wraz z twardościami po obróbce cieplnej obejmującej chłodzenie z szybkościami zaznaczonymi na wykresie, staliwa o składzie chemicznym zawartym w wyżej przedstawionej tabeli pokazano na fig. 3. Temperatura i czas austenizacji wynosiły odpowiednio 890°C i 20 minut. Jak widać z wykresu, uzyskanie struktury martenzytycznej, bądź martenzytyczno-bainitycznej o wysokiej twardości, jest możliwe po hartowaniu w ośrodkach, typu olej (50°C/s), które chłodzą wolniej niż woda (100°C/s), co ogranicza występowanie w staliwie naprężeń hartowniczych. Twardość staliwa w stanie lanym wyniosła 252 HBW.

Przykład 2

Skład chemiczny wytopu według wynalazku. Dla uzyskania wytopu według wynalazku wszystkie razem wskazane poniżej składniki miesza się w kadzi odlewniczej.

| Lp. | składnik | ilość | Lp. | składnik | ilość |
|-----|-------------|-------|-----|--------------|----------------|
| 1 | C [% wag.] | 0,30 | 7 | Ti [% wag.] | 0,060 |
| 2 | Si [% wag.] | 0,50 | 8 | Al [% wag.] | 0,40 |
| 3 | Mn [% wag.] | 1,50 | 9 | Cu [% wag.] | 0,30 |
| 4 | P [% wag.] | 0,005 | 10 | N [ppm wag.] | 200 |
| 5 | S [% wag.] | 0,005 | 11 | Fe [% wag.] | reszta do 100% |
| 6 | Cr [% wag.] | 1,00 | | | |

Wykres CTPc, wraz z twardościami po obróbce cieplnej obejmującej chłodzenie z szybkościami zaznaczonymi na wykresie, staliwa o składzie chemicznym zawartym w tabeli powyżej przedstawionej pokazano na fig. 4. Temperatura i czas austenitacji wynosiły odpowiednio 890°C i 20 minut.

Przykład 3

Skład chemiczny wytopu według wynalazku. Dla uzyskania wytopu według wynalazku wszystkie razem wskazane poniżej składniki mieszają się w kadzi odlewniczej.

| Lp. | składnik | ilość | Lp. | składnik | ilość |
|-----|-------------|-------|-----|--------------|----------------|
| 1 | C [% wag.] | 0,25 | 6 | Cr [% wag.] | 0,80 |
| 2 | Si [% wag.] | 0,30 | 7 | Ti [% wag.] | 0,050 |
| 3 | Mn [% wag.] | 1,30 | 8 | Al [% wag.] | 0,30 |
| 4 | P [% wag.] | 0,025 | 9 | N [ppm wag.] | 100 |
| 5 | S [% wag.] | 0,015 | 10 | Fe [% wag.] | reszta do 100% |

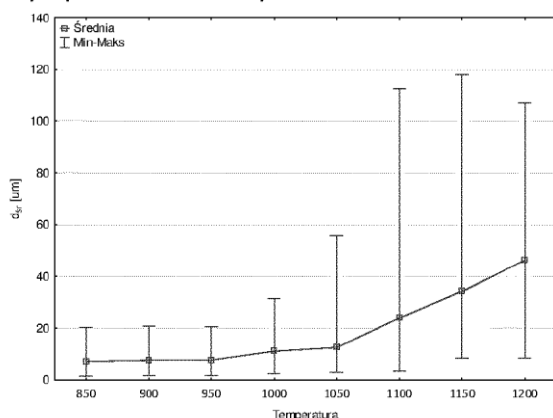
Wykres CTPc, wraz z twardościami po obróbce cieplnej obejmującej chłodzenie z szybkościami zaznaczonymi na wykresie, staliwa o składzie chemicznym zawartym w tabeli powyżej przedstawionej pokazano na fig. 5. Temperatura i czas austenitacji wynosiły odpowiednio 890°C i 20 minut.

Zastrzeżenie patentowe

1. Staliwo drobnoziarniste o podwyższonej odporności na ścieranie, w którego skład wchodzi wagowo: 0,25–0,30% węgla; 0,30–0,50% krzemu; 1,30–1,50% manganu; 0,80–1,00% chromu; do 0,025% fosforu; do 0,015% siarki; do 0,30%, miedzi; 100–200 ppm wag. azotu, oraz w pozostałej ilości żelazo wraz z zawartymi w nim nieuniknionymi zanieczyszczeniami czy domieszkami, **znamiennie tym**, że w jego skład wchodzi także 0,30–0,40% wag. aluminium i 0,050–0,060% wag. tytanu.

Rysunki

Wytop z aluminium i tytanem



Wytop z aluminium bez tytanu

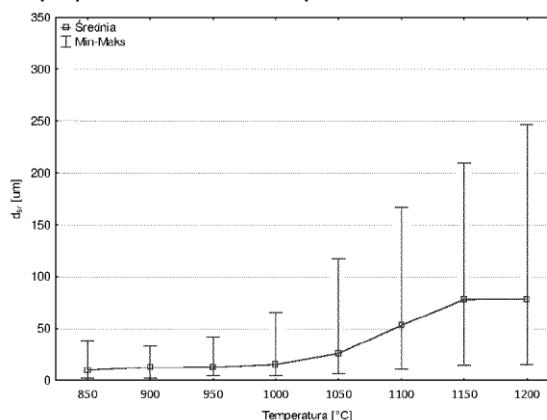


Fig. 1

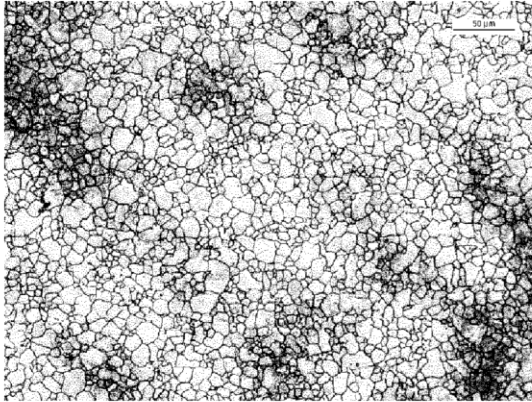
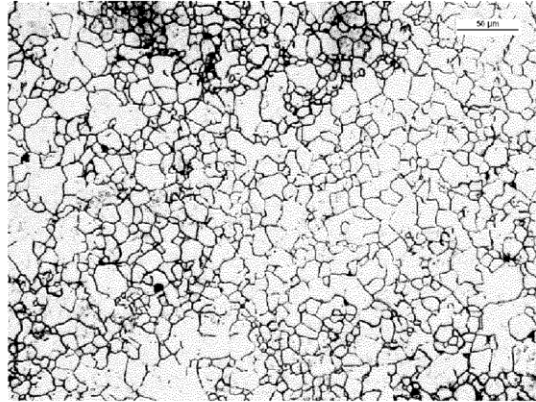
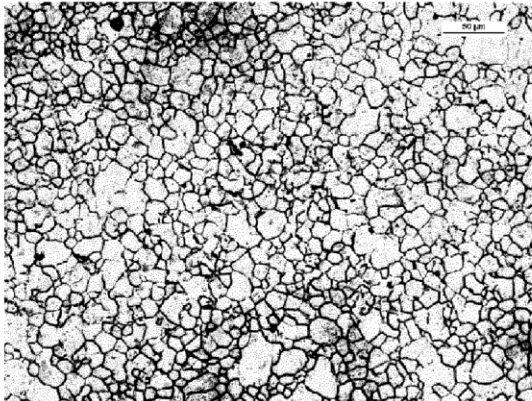
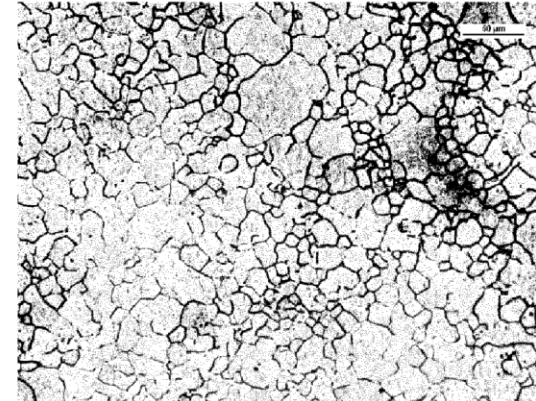
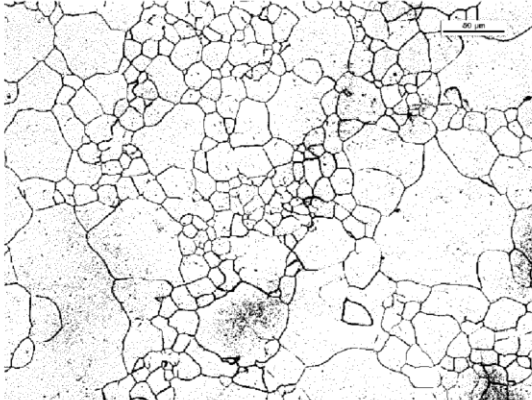
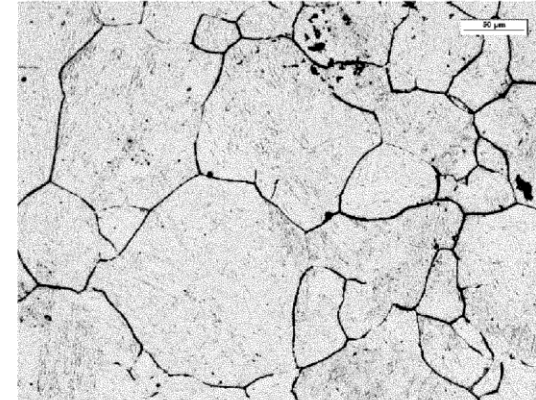
Wytop z aluminium i tytanem, $T_A=850\text{ }^\circ\text{C}$ Wytop z aluminium bez tytanu, $T_A=850\text{ }^\circ\text{C}$ Wytop z aluminium i tytanem, $T_A=1000\text{ }^\circ\text{C}$ Wytop z aluminium bez tytanu, $T_A=1000\text{ }^\circ\text{C}$ Wytop z aluminium i tytanem, $T_A=1100\text{ }^\circ\text{C}$ Wytop z aluminium bez tytanu, $T_A=1100\text{ }^\circ\text{C}$ 

Fig. 2

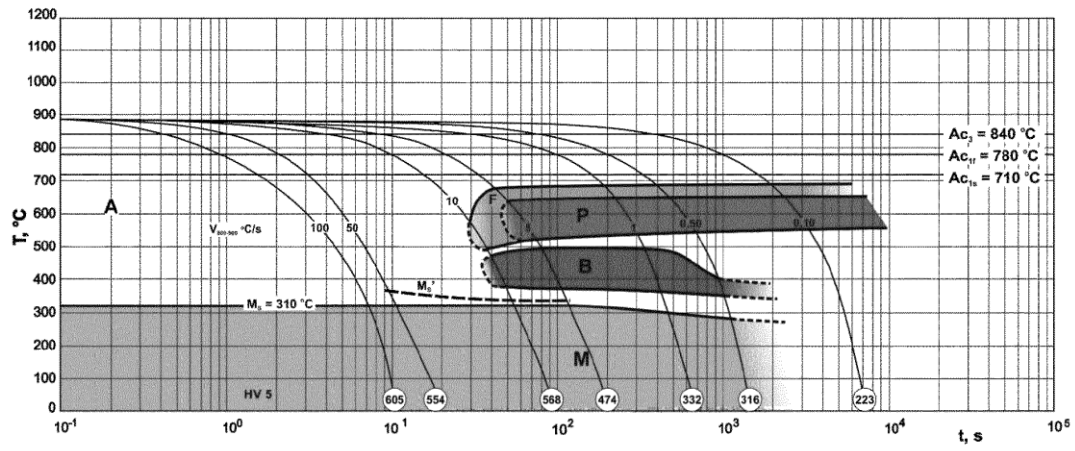


Fig. 3

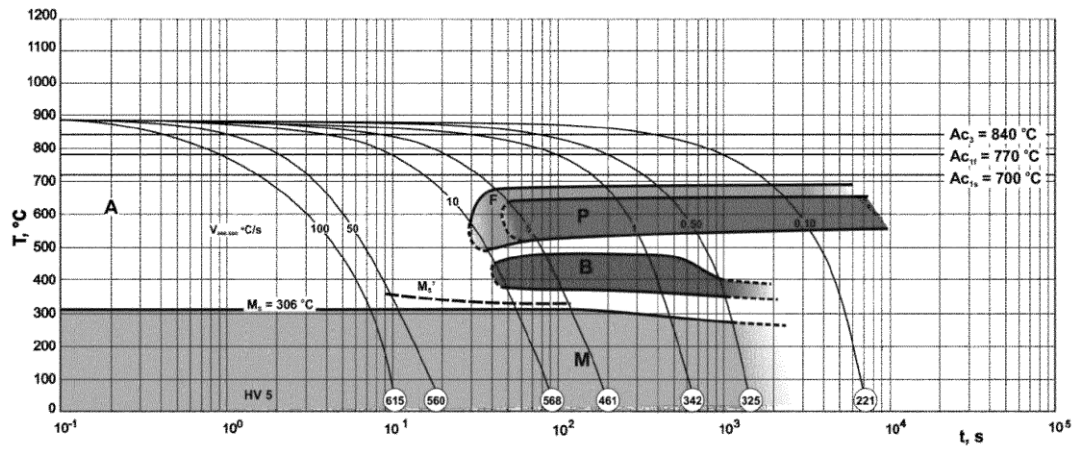


Fig. 4

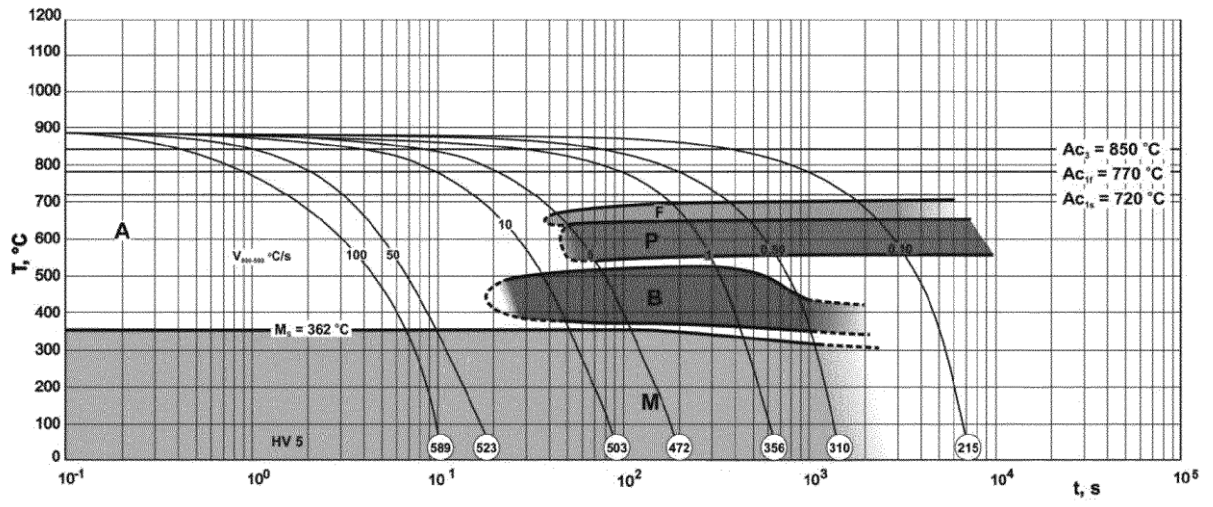


Fig. 5