

Bainityczna stal stopowa, sposób wytwarzania bainitycznej stali stopowej oraz zastosowanie bainitycznej stali stopowej

Przedmiotem wynalazku jest bainityczna stal stopowa średnio i wysokowęglowa, w której osnowę dla węglików stopowych stanowi bainit bezwęglkowy składający się z nanometrycznej bądź submikronowej wielkości listew ferrytu bainitycznego poprzedzielanych warstwami austenitu resztkowego. Powyższy skład fazowy stali zapewnia jej wysokie parametry mechaniczne i użytkowe. Wysokie parametry mechaniczne i użytkowe predysponują niniejszą stal do pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych, wynikających z dużych obciążeń mechanicznych i zanieczyszczeń, przyczyniających się do intensyfikacji zużycia ściernego. Z uwagi na skład chemiczny stali i jej główne przeznaczenie, stal tę należy zaliczyć do grupy stali narzędziowych.

Konwencjonalne stale narzędziowe charakteryzują się wysoką twardością, odpornością na ścieranie, niewielką odkształcalnością i niewrażliwością na przegrzanie. Cechy te osiąga się przez wysoką zawartość węgla i dodatków stopowych oraz odpowiednią obróbkę cieplną.

Konwencjonalną obróbką cieplną stali narzędziowych jest hartowanie martenzytyczne i odpuszczanie jedno bądź kilkukrotne. W wyniku hartowania martenzytycznego uzyskuje się twardą i kruchą strukturę martenzytyczną, stanowiącą osnowę dla węglików pierwotnych i/lub wtórnych. Aby nieco zmniejszyć kruchość stosuje się procesy odpuszczania. Odpuszczanie polega na nagrzaniu zahartowanego elementu do temperatury znajdującej się w przedziale od około 200°C do 550°C. Podczas odpuszczania dochodzi do wydzielania się węglików trzeciorzędowych. W wyniku takiej obróbki w stali znajduje się martenzyt odpuszczony jako osnowa, węgliki, które nie rozpuściły się podczas austenizacji oraz węgliki wydzielone z martenzytu.

Stale narzędziowe otrzymane w wyniku hartowania martenzytycznego i odpuszczania zostały przedstawione np. w opisach patentów polskich PL125293 oraz PL149328. Stale te wykazują wysoką twardość i odporność na ścieranie dzięki specjalnie dobranemu składowi chemicznemu oraz obróbce cieplnej. W opisie zgłoszenia patentowego WO2008084108 A1 ujawniono stal narzędziową o mikrostrukturze martenzytycznej lub częściowo martenzytycznej o dobrej spawalności i wysokiej twardości. Sposób otrzymywania takiej stali obejmuje hartowanie w warunkach chłodzenia ciągłego i jedno lub kilkukrotne odpuszczanie. W

rezultacie, w końcowej mikrostrukturze znajdują się węgliki stopowe w osnowie martenzytu, odpuszczonego martenzytu lub bainitu.

Stal po hartowaniu martenzytycznym cechuje się wysoką twardością, wytrzymałością i odpornością na ścieranie. Jednakże obecność martenzytu sprawia, że stale te są kruche i posiadają małą odporność na pękanie. Ponadto hartowanie martenzytyczne prowadzi do powstawania odkształceń bądź pęknięć hartowniczych obrabianego elementu stalowego, niezależnie od późniejszego odpuszczania.

W literaturze można znaleźć szeroko opisaną metodę hartowania izotermicznego stali, skutkiem którego jest uzyskanie mikrostruktury bainitycznej, wykazującej mniejszą wytrzymałość, lecz zwiększoną plastyczność i udarność w porównaniu do mikrostruktury martenzytycznej. Strukturę bainitu uzyskuje się na drodze hartowania z przystankiem izotermicznym w zakresie tworzenia bainitu. Operacja ta składa się z następujących zabiegów: (I) austenitizowanie, (II) chłodzenie z szybkością większą niż krytyczna, (III) wytrzymanie w temperaturze wyższej niż M_s do czasu ukończenia przemiany bainitycznej, (IV) dochładzanie do temperatury otoczenia z dowolną szybkością. W wyniku tej obróbki powstaje bainit dolny lub górny. Podczas przemiany bainitycznej w konwencjonalnych stalach zawierających mniej niż 1% C dochodzi do wydzielania cementytu. Mikrostruktura bainitu górnego składa się z płytek lub listew ferrytu bainitycznego, pomiędzy którymi znajdują się wydzielania cementytu. W przypadku bainitu dolnego w obrębie listew lub płytek ferrytu bainitycznego znajdują się wydzielania cementytu skierowane pod kątem 60° do osi listwy/płytki. Cementyt może również wydzielać się na granicach listew, tak jak to ma miejsce w przypadku bainitu górnego. O rodzaju wydzielonego bainitu decyduje skład chemiczny stali oraz warunki wytrzymania izotermicznego, a więc temperatura i czas przystanku izotermicznego.

Hartowanie izotermiczne oraz mikrostruktura bainityczna dają wiele korzyści w porównaniu do hartowania martenzytycznego. Jednak ze względu na obecność wydzielen cementytu na granicach ferrytu bainitycznego stal o takiej mikrostrukturze cechuje się małą udarnością i małą odpornością na kruche pękanie. Aby zachować korzystne cechy procesu bainityzacji i wykluczyć kruchość opracowane zostały stale o mikrostrukturze bainitycznej, która nie zawiera węglików (tzw. bainit bezwęglkowy), zawiera natomiast znaczny udział austenitu resztkowego wzbogaconego w węgiel. Bainit bezwęglkowy otrzymuje się w procesie, w którym etap wyżarzania izotermicznego w zakresie przemiany bainitycznej zostaje zakończony zanim rozpocznie się wydzielanie węglików. Zahamowanie wydzielania jest możliwe przy odpowiedniej zawartości krzemu i/lub aluminium ($Si+Al \geq 1,5\%$). Jednak przy

dłuższych czasach wytrzymania izotermicznego, pomimo dodatku tych pierwiastków, może dochodzić do zapoczątkowania procesów wydzieleniowych. Mikrostruktura bainitu bezwęglkowego składa się z ferrytu bainitycznego w postaci listew lub płytek złożonych z subpłytek oraz z austenitu resztkowego. Poszczególne subpłytki ferrytu oddzielone są od siebie bardzo cienką warstwą austenitu resztkowego. W przypadku, gdy listwy bainitu bezwęglkowego mają wielkość nanometryczną, mamy do czynienia z tzw. nanobainitem.

Obecnie na świecie strukturę nanobainitu wytwarza się głównie w stalach niskostopowych o zawartości węgla najczęściej w zakresie 0,4-1,1% wag. C. Dąży się przy tym do obniżenia zawartości składników stopowych oraz do skrócenia czasu wytrzymania izotermicznego. Wysoką odporność na pękanie zapewnia tym stalom austenit resztkowy, a wytrzymałość ferryt bainityczny i rozdrobnienie mikrostruktury do skali nanometrycznej. Twórcy teorii wytwarzania nanobainitu uważają, że aby zachować wysoką odporność na pękanie mikrostruktura nie powinna zawierać wydzielen, szczególnie w postaci wydłużonej [H. K. D. H. Bhadeshia: „Bainite in steels” 3rd edition. Maney Publishing on behalf of the Institute of Materials, Minerals and Mining. United Kingdom 2015 r.]. Z tego względu skład stali musi zawierać względnie dużą koncentrację $(Si + Al) > 1,5\%$, aby zapobiegać wydzielaniu się cementytu z ferrytu bainitycznego podczas wytrzymania izotermicznego – tworzenia się nanobainitu.

Opis składów chemicznych i obróbki cieplnej stali zbudowanych z ferrytu bainitycznego i austenitu resztkowego znajduje się w zgłoszeniach patentowych: WO2012031771, WO2010013054, WO1996022396. Skład chemiczny i metodę uzyskiwania struktury bainitycznej o wysokich właściwościach mechanicznych ujawniono również w opisach zgłoszeń patentowych i patentów: CN101586216, US20140102600, EP2714947.

Wynalazek opisany w zgłoszeniu WO2012031771 dotyczy stali superbainitycznej o następującym składzie (% wag.): węgiel: 0,4-1,1, mangan: 0,4-2,1, krzem: 0,15-1,2, aluminium: 0,0-2,0, chrom: 0,0-1,4, nikiel: 0,0-2,5, molibden: 0,0 -0,6, wanad: 0,0-0,3, kobalt: 0,0-3,0, fosfor: $<0,025$, siarka: $<0,025$, a resztę stanowi żelazo i nieuniknione zanieczyszczenia. Stal ma strukturę bainitu z austenitem resztkowym (do 30% wag.), przy zachowaniu równowagi płytek bainitu wolnych od węglików i płytek bainitu zawierających węgliki. Stal otrzymuje się wykorzystując hartowanie izotermiczne w temperaturze z zakresu 220°C-300°C.

Podobną mikrostrukturę ma stal nanobainityczna opisana w zgłoszeniu WO2010013054, która zawiera (w % wag.): węgiel od 0,6% do 1,1%, mangan od 0,3% do 1,8%, nikiel do 3%, chrom od 0,5% do 1,5%, molibden do 0,5%, wanad do 0,2%, oraz krzem i

aluminium w takiej ilości, aby otrzymać stal zasadniczo wolną od węglików. Udział austenitu reszkowego zawiera się w zakresie 10-50%.

W opisie europejskiego patentu EP2410070 opisano stal nanobainityczną o składzie chemicznym w procentach wagowych: węgiel od 0,6% do 1,1%, mangan od 0,3% do 1,8%, nikiel do 3%, chrom od 0,5% do 1,5%, molibden do 0,5%, wanad do 0,2%, krzem od 0,5% do 2,0%, gdzie resztę stanowi żelazo i przypadkowe zanieczyszczenia. Sposób wytwarzania bainitu w tej stali obejmuje etap przemiany w bainit przez schłodzenie stali w sposób wystarczająco szybki, aby uniknąć utworzenia perlitu, od temperatury powyżej temperatury przemiany austenitycznej do temperatury powyżej temperatury rozpoczęcia przemiany martenzytycznej, ale poniżej temperatury początku przemiany bainitycznej, i utrzymywanie stali w tym zakresie temperatur przez czas trwający do 3 dni. Czas wytrzymania zależy od temperatury wyżarzania izotermicznego. Zalecane temperatury wytrzymania izotermicznego w zakresie przemiany w bainit wynoszą 190°C lub więcej, najkorzystniej od 220°C do 260°C. Po takiej obróbce stal zawiera bainit w ilości pomiędzy 90% a 50%, a resztę stanowi austenit. Nadmiar węgla pozostaje wewnątrz ferrytu bainitycznego w stężeniu poza wartością odpowiadającą stanowi równowagi z częściowym przejściem węgla do austenitu reszkowego. Tak wytworzona stal nanobainityczna jest bardzo twarda, wykazuje wysoką odporność balistyczną i szczególnie nadaje się jako stal pancerna.

Składy chemiczne stali ujawnione w przedstawionym powyżej stanie techniki różnią się zawartością węgla i kluczowymi składnikami stopowymi, do których należą pierwiastki węglilotwórcze (Cr, Mo, V, W, Ti, Nb), natomiast we wszystkich przypadkach zastosowano hartowanie izotermiczne w zakresie tworzenia bainitu. Należy podkreślić, że autorzy przytoczonych zgłoszeń nie wykorzystują mechanizmu umocnienia mikrostruktury węglnikami stopowymi, lecz dążą do wytworzenia mikrostruktury bezwęglkowej.

Stale o strukturze nanobainitu w praktyce nie są wykorzystywane do zastosowań na narzędzia, ponieważ mają zbyt niską twardość ($HV < 700$), a w efekcie często niewystarczającą do wielu zastosowań odporność na ścieranie. Z kolei wysokowęglowe gatunki stali narzędziowych po konwencjonalnej obróbce hartowania i odpuszczania mogą osiągać twardość sięgającą 840HV, ale przy tym są bardzo kruche. W przypadku konwencjonalnych stali narzędziowych nie można zastosować hartowania izotermicznego celem wytworzenia nanobainitu bezwęglkowego jako osnowy dla węglików, gdyż nie zawierają odpowiedniej ilości Si i/lub Al. Brak dodatku Si i/lub Al sprawia, że podczas przystanku izotermicznego na granicach ferrytu bainitycznego wydziela się cementyt (węglik), powodując kruchość osnowy

tych stali, ponadto szerokość listew bainitu sięga kilku mikrometrów, a morfologia mikrostruktury osnowy jest typowa dla bainitu dolnego lub górnego.

Obecny wynalazek miał na celu opracowanie bainitycznej stali narzędziowej o nanokrystalicznej lub submikronowej mikrostrukturze osnowy, w której rozmieszczone będą węgliki stopowe. Stal taka cechuje się wysokimi parametrami mechanicznymi i użytkowymi, w tym dużą odpornością na pękanie i na zużycie ścierne.

Bainityczna stal stopowa według wynalazku składa się z osnowy zbudowanej z płytek lub listew bezwęglkowego ferrytu bainitycznego, w zakresie pomiędzy 85% a 50%, a resztę osnowy stanowi austenit. Osnowa ta otacza drobnodispersyjne węgliki stopowe. Stal według wynalazku zawiera następujące pierwiastki stopowe (w % wag.): węgiel od 0,60 do 2,30%, mangan od 0,40 do 2,50%, krzem od 0,50 do 3,00%, oraz przynajmniej jeden z następujących pierwiastków węglilotwórczych o zawartości: chrom do 17,00%, molibden do 10,00%, wanad do 4,00%, przy czym spełnione muszą być zależności: $(\%Cr + \%Mo + \%V) \geq 2,25\%$ wag. i $(\%Si + \%Al) \geq 1,5\%$. Resztę stanowi żelazo i nieuniknione domieszki. Pierwiastki węglilotwórcze mogą występować zamiennie w składzie chemicznym, w zależności od zastosowania, ale zawsze wśród nich musi znaleźć się przynajmniej jeden z grupy: Cr, Mo, V i spełniona musi być zależność: $(\%Cr + \%Mo + \%V) \geq 2,25\%$. W zależności od przeznaczenia w skład stali mogą wchodzić również inne dodatki stopowe: wolfram do 18,00%, tytan do 0,2%, niob do 0,1%, aluminium do 2,00%, nikiel do 4,50%, kobalt do 10,00%, miedź do 1,20%.

Sposób wytwarzania stali bainitycznej według wynalazku polega na tym, że stal o składzie zdefiniowanym powyżej nagrzewa się do temperatury powyżej temperatury przemiany austenitycznej i chłodzi z szybkością większą od krytycznej do temperatury powyżej temperatury rozpoczęcia przemiany martenzytycznej, ale poniżej temperatury rozpoczęcia przemiany bainitycznej i utrzymuje się w tym zakresie temperatury przez czas umożliwiającą wytworzenie co najmniej 50% struktury bainitycznej bądź do chwili zapoczątkowania procesów wydzieleniowych w osnowie w danej temperaturze lub do momentu, gdy zawartość węgla w austenicie resztkowym osiągnie wartość zapewniającą stabilność temperaturową tego austenitu w temperaturze -40°C .

Korzystnie jest dobrać tak temperaturę austenitizacji, aby stopowość austenitu stanowiącego osnowę dla nierozpuszczonych węglików znajdowała się w zakresie: węgiel od 0,45% do 1,20 %, mangan od 0,4% do 2,5%, nikiel do 4,5%, krzem od 1,5% do 2,5%, udział pozostałych składników stopowych może być różny w zależności od zastosowanych dodatków stopowych.

Temperatura przystanku izotermicznego dobierana jest w zależności od składu chemicznego austenitu, uzyskanego podczas austenitzacji. Korzystnie przystanek izotermiczny realizuje się w temperaturze T_i poniżej 320°C . Temperatura rozpoczęcia przemiany martenzytycznej wykazuje duże różnice w zależności od konkretnego składu stopu oraz od zastosowanej temperatury austenitzacji.

Chłodzenie stali z temperatury austenitzacji do temperatury przystanku izotermicznego odbywa się z szybkością większą od krytycznej, aby uniknąć wejścia w zakres przemian dyfuzyjnych, nim temperatura w całej objętości próbki ustabilizuje się na poziomie temperatury zamierzonego przystanku izotermicznego. Dobór parametrów obróbki prowadzony jest w oparciu o wykresy CTPc i CTPi dla składu chemicznego austenitu uzyskanego w zadanej temperaturze austenitzacji.

W zależności od składu chemicznego stali oraz stawianych wymagań proponowana obróbka cieplna może być prowadzona zarówno bezpośrednio po przekuciu wlewków staliwnych, jak i po wszelkiego rodzaju zabiegach prowadzących do rozdrobnienia ziarna i/lub zwiększenia dyspersji wydzielen (m.in. przesycanie i starzenie; hartowanie i odpuszczanie, celem wydzielenia drobnodispersyjnych węglików stopowych).

Z uwagi na ryzyko utlenienia i/lub odwęglenia powierzchni wsadu spowodowanych wysoką temperaturą austenitzacji $>880^{\circ}\text{C}$ etap austenitzacji najlepiej jest prowadzić w piecu próżniowym lub z atmosferą ochronną z chłodzeniem gazem obojętnym pod ciśnieniem.

Stal według wynalazku stanowi nową generację stali narzędziowych łączących w sobie twardość i wytrzymałość stali narzędziowych z odpornością na pękanie i plastycznością stali nanobainitycznych. Połączenie tych korzystnych właściwości zapewnia niespotykana dotąd mikrostruktura nanobainitu bezwęglikowego z austenitem resztkowym, która stanowi podstawę dla drobnodispersyjnych węglików pierwotnych i/lub wtórnych. W celu zapewnienia odpowiedniej plastyczności i ciągliwości stali w mikrostrukturze musi pozostać powyżej 10% austenitu resztkowego.

Bainityczna stal narzędziowa o składzie chemicznym mieszczącym się w podanych zakresach składników stopowych, składa się z bardzo drobnych listew ferrytu bainitycznego (średnia grubości listew 200 nm lub mniej) poprzedzielanych austenitem resztkowym oraz węglików stopowych różnej wielkości, znajdujących się zarówno na granicach ziaren byłego austenitu, jak i w ich wnętrzu. Zalecane temperatury hartowania izotermicznego w zakresie przemiany bainitycznej mieszczą się w zakresie $220\div 360^{\circ}\text{C}$, przy czym im niższa temperatura

przystanku izotermicznego tym mniejsza grubość płytek bainitu i drobniejsza mikrostruktura osnowy. W przypadku stali o niskiej zawartości pierwiastków hamujących wydzielanie węglików ($(Al + Si) < 1,0\%$) zamiast struktury nanobainitycznej uzyskana zostanie struktura submikronowego bainitu dolnego z austenitem resztkowym jako osnową i węglnikami stopowymi rozłożonymi równomiernie w objętości stali.

Stal według wynalazku ma inny skład chemiczny i odmienną mikrostrukturę niż stale ujawnione w dokumentach stanowiących stan techniki, np. EP2410070. W osnowie znajdują się zarówno węgliki pierwotne, jak i wtórne. Węgliki te rozlokowane są na granicach ziaren byłego austenitu oraz w ich wnętrzu. Wytworzenie osnowy nanobainitycznej dla węglików pierwotnych i wtórnych poprawia odporność na pękanie i zmniejsza kruchość stali narzędziowych, w porównaniu do obecnie stosowanych rozwiązań. Dodatek Si i/lub Al w ilości $\geq 1,5\%$ zapobiega wydzielaniu się cementytu z ferrytu bainitycznego, w wyniku czego uzyskuje się odporną na pękanie osnowę nanobainityczną. Nadmiar węgla pozostaje wewnątrz ferrytu bainitycznego, w stężeniu poza wartością odpowiadającą stanowi równowagi. Obecność bardzo twardych węglików stopowych w osnowie bainityczno-austenitycznej pozwala na uzyskanie twardości sięgającej 800HV oraz bardzo dobrej odporności na ścieranie.

Podwyższenie odporności na ścieranie i wysoką twardość oraz wytrzymałość uzyskano dzięki mechanizmowi umocnienia wydzieleniowego węglnikami stopowymi oraz mechanizmowi umocnienia granicami ziaren. Umocnienie granicami ziaren uzyskuje się dzięki znacznym rozdrobnieniu mikrostruktury do wielkości nano lub submikronowych. Odpowiednią plastyczność i odporność na pękanie zapewnia obecność austenitu resztkowego w postaci nanometrycznych warstw. Z uwagi na liczne miejsca zarodkowania listwy ferrytu bainitycznego mogą zarodkować na granicach ziaren oraz na węglkach stopowych. Zarodkowanie listew ferrytu bainitycznego na węglkach stopowych dodatkowo rozdrabnia mikrostrukturę i może skutkować uzyskaniem morfologii mikrostruktury typu „acicular” (listwy ferrytu bainitycznego rozchodzą się promieniście wokół węglika na którym się tworzą). Uzyskanie powyższej morfologii dodatkowo podwyższa odporność na pękanie stali według wynalazku. Zastosowanie hartowania izotermicznego stali pozwala wytworzyć mikrostrukturę o nanometrycznej ($d < 100\text{nm}$) lub submikronowej ($100 < d < 1\mu\text{m}$) grubości płytek ferrytu bainitycznego, który nie zawiera wydzieleni cementytu i stanowi osnowę dla twardych węglików stopowych. Obecność twardych węglików stopowych znacznie podnosi odporność na ścieranie. W zależności od aplikacji i wymagań stawianych elementom wykonanym ze stali według wynalazku dobiera się skład chemiczny tak, aby uzyskać najkorzystniejsze właściwości

mechaniczne i użytkowe. Zmiana składu chemicznego skutkuje zmianą zawartości poszczególnych węglików stopowych w mikrostrukturze. Pierwiastki węglotwórcze mogą występować zamiennie w składzie chemicznym, w zależności od zastosowania. Podobnie zawartość poszczególnych dodatków stopowych zależeć będzie od zastosowania. Niezależnie od aplikacji, stal według wynalazku będzie mieć zawsze mikrostrukturę bainitu bezwęglkowego jako podstawę dla węglików stopowych.

Składem chemicznym austenitu przed hartowaniem izotermicznym można sterować podczas procesu austenizacji. Zwiększenie temperatury austenizacji skutkuje rozpuszczeniem większej objętości wtórnych węglików stopowych, co podnosi zawartość węgla i pierwiastków stopowych w austenicie. Zwiększenie stopowości austenitu wpływa na zmianę zakresu temperatur i czasu przemian fazowych w stali. Dlatego też parametry hartowania izotermicznego w dużej mierze zależą od warunków austenizacji. W zależności od tych warunków przystanek temperaturowy może znajdować się w zakresie: od temperatury M_s (temperatura zapoczątkowania przemiany martenzytycznej) do temperatury B_s (temperatura zapoczątkowania przemiany bainitycznej).

Stale według wynalazku mogą być stosowane do produkcji części maszyn i urządzeń, od których wymagana jest wysoka twardość i odporność na ścieranie, produkcji narzędzi do obróbki drewna, nożyc do cięcia blach, stempli, wykrojników, frezów, matryc, itp.

Wynalazek został bliżej przedstawiony w przykładach.

Przykład 1.

Stop według analizy chemicznej zawiera wagowo: 2,30% węgla, 0,80% manganu, 0,40% niklu, 2,00% krzemu, 11,95% chromu, 0,22% molibdenu, 0,17% wanadu, 0,20% wolframu, resztę stanowi żelazo i nieuniknione zanieczyszczenia. Stop przygotowano jako 5 kg wlewek wytopiony w próżniowym piecu indukcyjnym z użyciem surowców o wysokiej czystości. Po stopieniu w tyglu grafitowym z warstwą ceramiczną od strony stopu i odgazowaniu metal był wlewany do formy grafitowej, także z powłoką ceramiczną. Po wyjęciu wytopów i odcięciu części z dziurami usadowymi zostały one poddane wygrzewaniu we wspomnianym piecu w temperaturze 1200 °C przez 48 h. Zastosowano termoparę typu N. Przedmiotowy wytop umieszczony był w tulei ze stali kwasoodpornej, a ta nagrzewana była prądami wirowymi. Następnie materiał był poddany procesowi kucia na pręty o średnicy 16mm, przy użyciu młotka o sile opadającej 100kg. Po przekuciu materiał poddano powolnemu ochładzaniu. W tych warunkach pręty charakteryzowały się twardością 540 HV₂. Następnie pręty zostały zmiękczone w piecu z atmosferą ochronną azotu w procesie obróbki cieplnej:

- grzanie z prędkością 2C/min do 880C
- wytrzymanie izotermiczne w 880C przez 0,5h
- chłodzenie do 860C z szybkością 1C/min
- wytrzymanie izotermiczne w 860C przez 2h
- chłodzenie do 720C z szybkością 1C/min
- wytrzymanie izotermiczne w 720C przez 2h
- chłodzenie z piecem do temperatury pokojowej

Materiał po zmiękczeniu posiadał twardość 325 HV2. Z tak przygotowanych prętów wycięto próbki do badań. Próbki te poddano austenitzacji w temperaturze 950°C przez 30minut, a następnie przemianie bainitycznej poprzez obróbkę hartowania izotermicznego w temperaturze 260°C przez 19 godzin.

Tak obrobiona stal charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- mikrostruktura składa się z osnowy zbudowanej z listew bezwęglkowego ferrytu bainitycznego o szerokości od 60 do 250 nm, poprzedzielanych warstwami austenitu reszkowego o objętości względnej wynoszącej ok. 20%. Powyższa mikrostruktura stanowi osnowę dla równomiernie rozmieszczonych węglików stopowych typu M_7C_3 o owalnym kształcie, bogatych w chrom, których objętość względna wynosi 23%.
- twardość stali po tym procesie wynosi 660 HV2.

Przykład 2.

Przykład przedstawia stal o składzie chemicznym jak w przykładzie 1, ale obrobioną cieplnie przy zadaniu innych parametrów obróbki cieplnej. Próbki stalowe poddano austenitzacji w temperaturze 1000°C przez 30 minut, a następnie przemianie bainitycznej poprzez obróbkę cieplną polegającą na hartowaniu izotermicznym w temperaturze 260°C przez 12,5 godziny.

Tak obrobiona stal charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- mikrostruktura składa się z osnowy zbudowanej z listew bezwęglkowego ferrytu bainitycznego o szerokości od 60 do 250 nm, poprzedzielanych warstwami austenitu reszkowego o objętości względnej wynoszącej ok. 25%. Powyższa mikrostruktura stanowi osnowę dla równomiernie rozmieszczonych węglików stopowych typu M_7C_3 o owalnym kształcie, bogatych w chrom, których objętość względna wynosi 20%. Twardość stali po powyższym procesie wynosi 640 HV2.

Przykład 3.

Stop według analizy chemicznej zawiera wagowo: 1,65% węgla, 1,00% manganu, 0,35% niklu, 2,00% krzemu, 1,45% aluminium, 0,35% miedzi, 4,75% chromu, 1,00% molibdenu, 1,40%

wanadu, 1,90% wolframu, resztę stanowi żelazo i nieuniknione zanieczyszczenia. Stop przygotowano jako 5 kg wlewek wytapiany w próżniowym piecu indukcyjnym z użyciem surowców o wysokiej czystości. Po stopieniu w tyglu grafitowym z warstwą ceramiczną od strony stopu i odgazowaniu metal był wlewany do formy grafitowej, także z powłoką ceramiczną. Po wyjęciu wytopów i odcięciu części z dziurami usadowymi zostały one poddane wygrzewaniu we wspomnianym piecu w temperaturze 1200 °C przez 48 h.

Przedmiotowy wytop umieszczony był w tulei ze stali kwasoodpornej, a ta nagrzewana była prądami wirowymi. Następnie materiał poddano procesowi kucia na pręty o średnicy 16 mm, przy wykorzystaniu młotka o sile opadającej 100 kg. Po przekuciu materiał poddano powolnemu ochładzaniu. W tych warunkach pręty charakteryzowały się twardością 655 HV2. Pręty zostały zmiękczone w następującym procesie obróbki cieplnej:

- grzanie z prędkością 2°C/s do temperatury 930°C
- wytrzymanie izotermiczne w 930C przez 2h
- chłodzenie do 730C z szybkością 20C/min
- wytrzymanie izotermiczne w 730C przez 2h
- chłodzenie z piecem do temperatury pokojowej.

Materiał po zmiękczeniu posiadał twardość 340 HV2. Z tak przygotowanych prętów wycięto próbki do badań właściwości mechanicznych. Próbki te poddano austenitzacji w temperaturze 950°C przez 30 minut, a następnie przemianie bainitycznej poprzez obróbkę hartowania izotermicznego w temperaturze 260°C przez 19 godzin.

Tak obrobiona stal charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- mikrostruktura składa się z osnowy zbudowanej z listew bezwęglkowego ferrytu bainitycznego o szerokości od 70 do 280 nm poprzedzielanych warstwami austenitu resztkowego o objętości względnej równej 20%. Powyższa mikrostruktura stanowi osnowę dla równomiernie rozmieszczonych węglików wolframu, wanadu, chromu i molibdenu, których objętość względna wynosi 15%.
- twardość stali po procesie wynosi 670 HV2.

Przykład 4.

Przykład 4 przedstawia stal o składzie chemicznym jak w przykładzie 3, ale obrobioną cieplnie przy zadaniu innych parametrów obróbki cieplnej. Próbki stalowe poddano austenitzacji w temperaturze 950°C przez 30 minut, a następnie wytrzymaniu izotermicznemu w temperaturze 215°C przez 72 godziny.

Tak obrobiona stal charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- mikrostruktura składa się z osnowy zbudowanej z listew bezwęglkowego ferrytu bainitycznego o szerokości od 60 do 250 nm, poprzedzielanych warstwami austenitu resztkowego o objętości względnej równej 15%. Powyższa mikrostruktura stanowi osnowę dla równomiernie rozmieszczonych węglików wolframu, wanadu, chromu i molibdenu, których objętość względna wynosi 13%.
- twardość stali po procesie wynosi 695 HV2.