

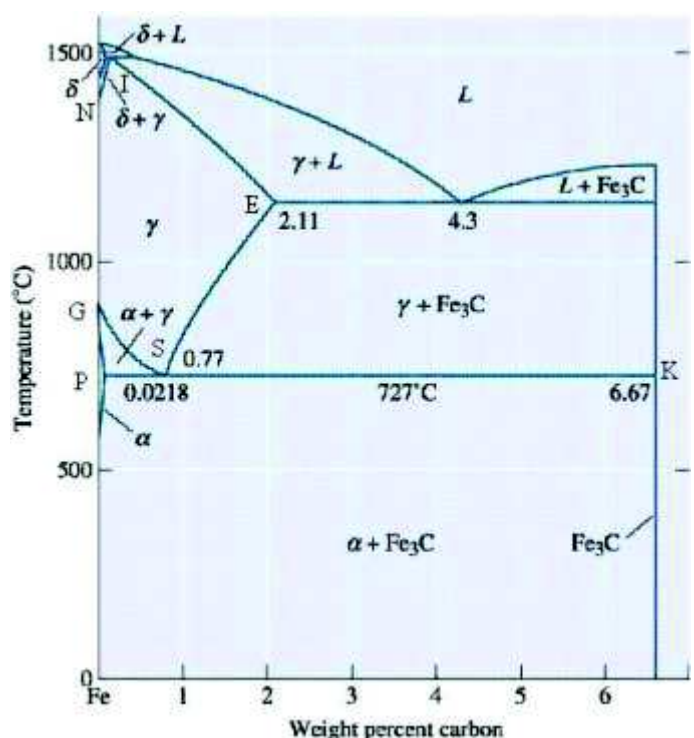
Austenit szczątkkowy w stalach węglowych i stopowych

prof. dr hab. inż. Jerzy Jeleńkowski, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa

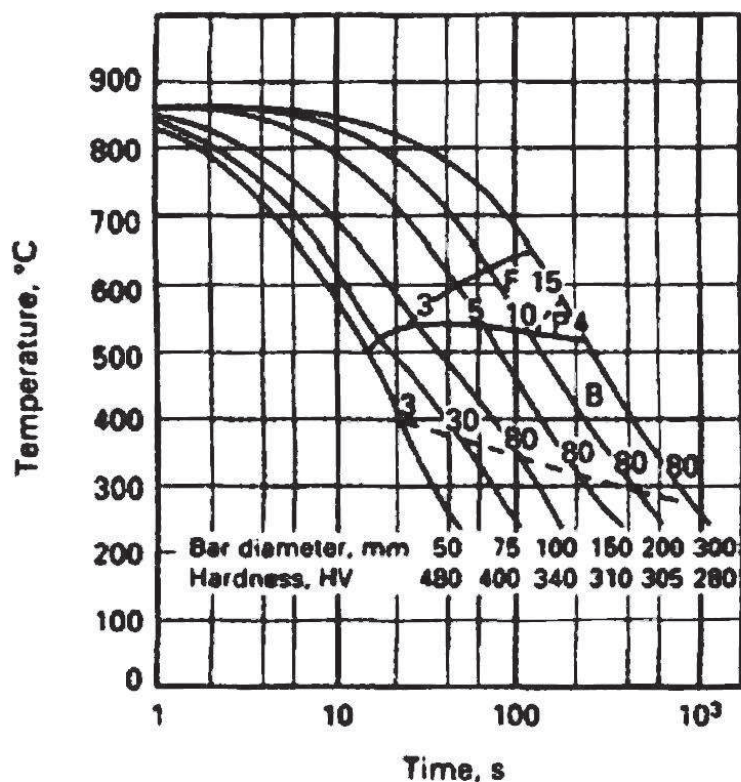
W artykule omówiono niektóre z przyczyn obecności austenitu szczątkowego w stalach stopowych, fazy będącej ubocznym produktem przemiany martenzytycznej. Stale stopowe zawierają zawsze pewne ilości austenitu szczątkowego, więcej te spośród nich, w których austenit obok kinetyki atermicznej może się przemieniać izotermicznie w martenzyt. Niektóre z nich charakteryzują się unikatowym wpływem szybkości chłodzenia na stabilność austenitu. Nieprzemieniony, stabilizowany bardziej stopowy austenit rozmieszcza się na granicach ziaren.

Nazwą austenit określa się roztwór stały węgla w żelazie γ o sieci regularnej ściennie centrowanej. Struktura krystalograficzna warunkuje wszystkie jego właściwości, wśród których wymienia się dobrą plastyczność. Na wykresie Fe-C zajmuje obszar ograniczony liniami: GS, SE, EI, IN i NG.

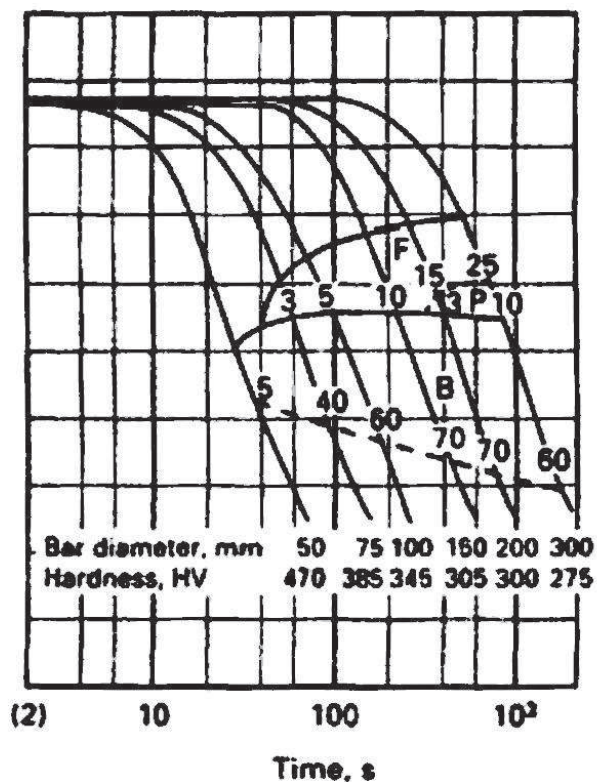
Nazwę austenit zaproponował G. Osmond dla uczczenia wybitnego metalurga W. C. Roberts-Austena. Austenit w stanie stabilnym, w niestopowej stali i niestopowym żeliwie, nie występuje poniżej linii PSK i przy wolnym chłodzeniu rozpada się na ferryt i cementyt (Fe_3C), a przy wystarczająco szybkim chłodzeniu na martenzyt. Standardowym celem hartowania jest zamiana austenitu w martenzyt, ale można otrzymać, i tak bywa najczęściej zwykle wbrew woli nieprawidłowego technologa, mieszane struktury o nieplanowanym składzie; z ferrytem, bainitem i martenzytem, jak to pokazano dla stali 40HM (rys. 2). Skład fazowy zahartowanej stali i jej twardość zależy od szybkości chłodzenia i naturalnie od gabarytu obrabianego cieplnie przedmiotu. Stal stopowa, w stanie zahartowanym i nie odpuszczonym, posiada w swojej strukturze niewielkie ilości austenitu nieprzemienionego podczas przemiany austenitu w martenzyt i/lub w bainit, który przyjęto nazywać austenitem szczątkowym. Zazwyczaj austenit szczątkowy, przy standardowych zastosowaniach stali, uważa się za szkodliwy fazowy



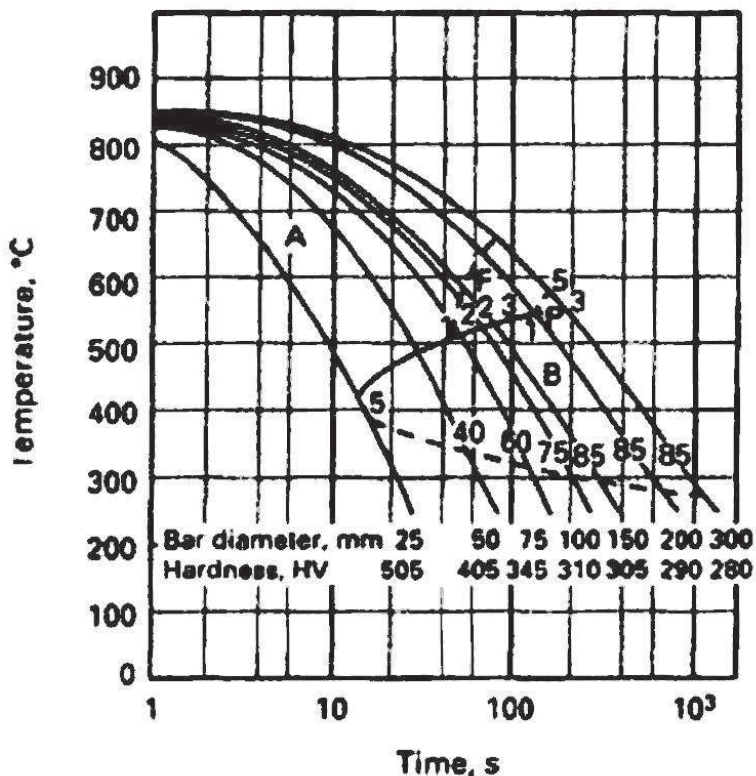
Rys. 1. Wykres Fe-Fe₃C



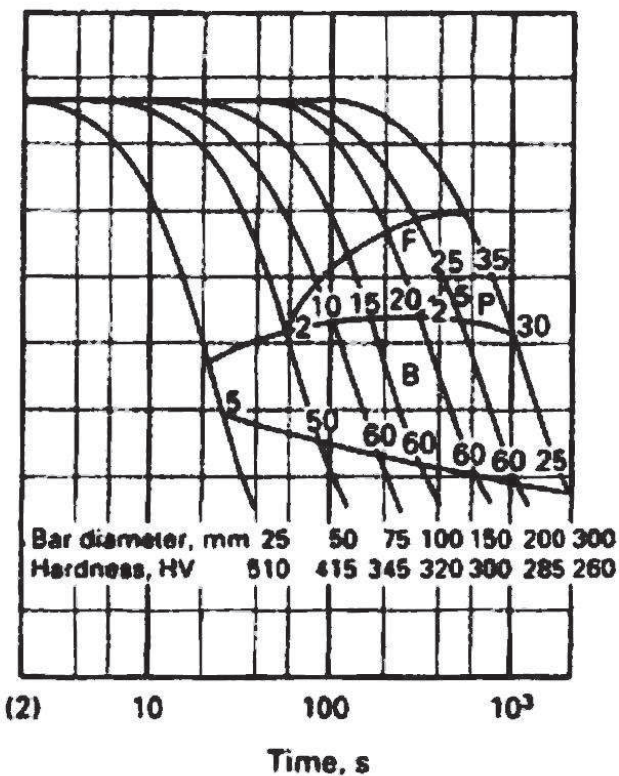
(a)



(b)



(c)



(d)

Rys. 2. Wykresy CTPc stali 40HM. Cyfry oznaczają zawartość w procentach, składników strukturalnych: F – ferryt; P – perlit; B – bainit. Resztę stanowi martenzyt w prętach o podanych średnicach po ich schłodzeniu i wynikowa twardość w HV

składnik struktury, który przy odpuszczaniu najpierw zamienia się w martenzyt odpuszczony, a następnie w sorbit.

Jak wspomniano w stalach konstrukcyjnych węglowych, austenitu w stanie stabilnym przy temperaturze pokojowej otrzymać nie można po żadnej z zastosowanych prędkości chłodzenia. Przez długie lata, wśród metaloznawców, istniało jednak takie przekonanie. Austenit szczątkowy, zawsze fazę metastabilną, łatwo otrzymuje się, gdy w stali są dodatki pierwiastków stopowych, a zwłaszcza Mn, Ni, Cr i Cu. Duże zawartości nie przemienionego austenitu otrzymuje się w stalach z dużą zawartością wymienionych pierwiastków, już przy niezbyt szybkim chłodzeniu w powietrzu, a nawet z piecem. We wszystkich standardowo hartowanych stalach średnio i wysokowęglowych stopowych, zawsze obok martenzytu obecny jest austenit szczątkowy i zawsze jest go więcej im wyżej węglowa i bardziej stopowa jest stal i więcej w stalach hartowanych w oleju. Obecność austenitu szczątkowego ma znaczny wpływ na fizyczne i mechaniczne właściwości stali, o czym przekonywać nie trzeba. Mniej doceniany jest jego wpływ pozytywny.

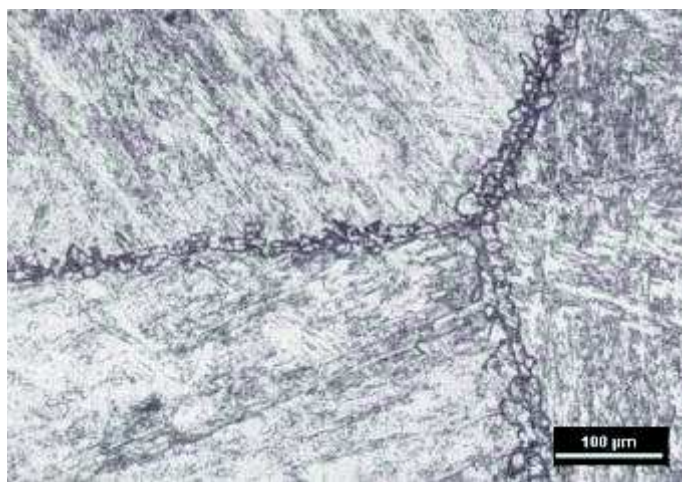
Najstarsze z badań dotyczyły wpływu różnych ośrodków chłodzących na zawartość austenitu szczątkowego i związane z jego obecnością paczanie się przedmiotów hartowanych. Zbadano wówczas zmiany względnej objętości przy przemianie austenit w perlit (~1%) oraz austenitu w martenzyt (~1,8%), w standardowych stalach konstrukcyjnych. W literaturze przedmiotu można znaleźć wzory wiążące wpływ pierwiastków stopowych na udział austenitu szczątkowego w strukturze różnych stali oraz na wynikowe właściwości fizyczne i mechaniczne, ale nie jest to przedmiotem tego artykułu.

Stabilizacja austenitu, jej przyczyny i skutki

Z braku kontroli warunków austenitacji i chłodzenia stali, wymienia się dwie przyczyny zwiększenia zawartości austenitu szczątkowego. Pierwszą jest stabilizacja austenitu powodowana powolnym chłodzeniem w temperaturowym przedziale przemiany martenzytycznej, tj. od temperatury M_s do temperatury M_f . Drugą, zbliżoną jest zmniejszenie prędkości chłodzenia w zakresie temperaturowym przemiany bainitycznej sprzyjające wzbogaceniu się austenitu w węgiel, kosztem węgla obecnego w produkcie jego przemiany - bainicie. Lokalne zwiększenie stężenia węgla w austenicie, w strefie przylegającej do granicy międzyfazowej, stabilizuje te obszary i powoduje, że temperatura M_s wzbogaconego w węgiel austenitu może, w zależności od gatunku stali, obniżyć się w nich nawet znacznie poniżej temperatury pokojowej. W takich przypadkach zawartość austenitu szczątkowego może wzrosnąć kilkakrotnie. Na przykład, w stalach konstrukcyjnych stosowanych na części maszyn, o zawartości 0,3–0,4% C, udział węgla we wzbogaconym austenicie może wzrosnąć do ok. 1,3–1,4%. Znaczne różnice wystąpią więc we właściwościach bainitu i martenzytu powstałego z austenitu o tak różnej zawartości węgla i lokalnie jeszcze inne właściwości struktury powstałej po odpuszczaniu wzbogaconego w węgiel martenzytu. Takie zróżnicowanie struktury jest na ogół niekorzystne.

Stabilizacja austenitu szczątkowego, jej przyczyny i skutki. Pamięć strukturalna

Możliwość „dotrwania” austenitu szczątkowego, podczas nagrzewania do temperatury A_{c1} , w której staje się on fazą stabilną, ma istotny wpływ na kinetykę i mechanizm zmian w strukturze zahartowanej i ponownie austenitizowanej stali i dalszej jej obróbce cieplnej. W stali zawierającej austenit szczątkowy grzanej w pobliżu temperatury A_{c1} , zanika konieczność ponownego zarodkowania austenitu. Ziarna austenitu szczątkowego stają się podłożem do wzrostu nowych (wtórnych) ziaren austenitu, przekazując im takie cechy struktury jak kształt, wymiar i orientację (rys. 3). Takie zjawisko zwane pamięcią strukturalną jest możliwe przy bardzo szybkim grzaniu stali zawierającej austenit szczątkowy, z pominięciem rozpadu martenzytu na ferryt i węgliki (sorbit). Przy austenitacji zahartowanych i nie odpuszczonych



Rys. 3. MŚ. Mikrostruktura stali 37HNS3 po hartowaniu grzanej następnie z szybkością 1000 K/s do temperatury 810°C, zahartowanej. Struktura martenzytu listwowego. Na byłych granicach ziaren austenitu pierwotnego siatka drobnoziarnistych równoosiowych ziaren martenzytu [1]

nych stali konstrukcyjnych, zachodzi zjawisko dziedziczenia ziaren austenitu bez przekształcenia związanego z przejściem przez temperaturowy przedział A_{c1} – A_{c3} . Dziedziczenie struktury austenitu szczątkowego, w różnych stalach, wymaga dużych szybkości grzania, zwykle dziesiątków i setek stopni na sekundę. Niewystarczająca szybkość narusza pamięć strukturalną. Efekt dziedziczenia łatwiej realizuje się, gdy w stanie wyjściowym jest więcej austenitu szczątkowego. Dziedziczenie ziaren nawet przy bardzo wysokich szybkościach grzania nie występuje, jeżeli podda się austenit szczątkowy odprężaniu.

Dziedziczenie obserwuje się także w stalach hartowanych izotermicznie, gdy pozostaje ok. 20–25% austenitu i stworzy warunki do przetrwania austenitu do temperatury A_{c1} . Niekiedy zjawisko to występuje, gdy austenitu szczątkowego jest niewiele. I w tym przypadku staje się on genem i nie jest ważne, jaka była jego zawartość. Dawno już dostrzeżono, że oddziedziczone ziarna austenitu posiadają zębaty kształt granic oraz, że austenit szczątkowy w wyniku zgniotu fazowego szybciej porządkuje strukturę sieciową i rekrytalizuje z tendencją do otrzymania bardzo drobnego ziarna.

Zazwyczaj już nieznaczne odkształcenie plastyczne zahartowanej stali likwiduje zdolność dziedziczenia. Efekty pamięci strukturalnej obrazowane mikroskopią uwidaczniają się w miejscach, gdzie pozostaje austenit szczątkowy, a więc w granicach ziaren (rys. 3). Wpływanie na wielkość ziaren i strukturę w obszarze granic ziaren jest jednym z zadań inżynierii materiałowej.

Destabilizacja austenitu, jej przyczyny i skutki

Odształcenie plastyczne austenitu, jako zabiegu wchodzącego w skład obróbki cieplnej i cieplno plastycznej, jeśli nie prowadzi do przemiany austenitu (szczątkowego) w martenzyt, najczęściej go stabilizuje. Odształcenie plastyczne podczas przemiany bainitycznej może zwiększyć zawartość austenitu szczątkowego, tzn. stabilizować austenit. Odształcenie stali natomiast, w stanie dwufazowym martenzytyczno-austenitycznym, prowadzi do destabilizacji austenitu, do zwiększenia zawartości martenzytu. Dzieje się tak w wielu przypadkach nie tylko w warunkach eksploatacji silnie obciążonych kół zębatych, walców do pracy na zimno, krótkotrwałych oddziaływaniach np. zderzaniu się ciał, platerowaniu, detonacji, itd. Przypadki pierwszy i trzeci, z wymienionych wyżej, są często spotykane w praktyce.

W nawęglanej warstwie kół zębatych dużą uwagę udziela się obecności austenitu szczątkowego. W wielu badaniach potwierdzono jego pozytywny wpływ. Są jednak uwarunkowania dotyczące jego zawartości. W ilości 3–6%, obecność austenitu szczątkowego opóźnia rozwój pęknięć zmęczeniowych wskutek zmniejsza wrażliwości na działanie karbu. Przy małych cyklicznych obciążeniach, gdy szybkość wzrostu pęknięcia (da/dN) zależy liniowo od logarytmu różnicy z maksymalnej i minimalnej wartości współczynnika intensywności naprężenia ($\log \Delta K_I$), ta ilość austenitu szczątkowego osłabia proces niszczenia. Przy dużych amplitudach naprężenia i gdy maksymalna wartość współczynnika intensywności naprężenia zbliża się do wartości krytycznej K_{IC} , obecność austenitu szczątkowego hamuje katastroficzny rozwój pęknięć, co w porę pozwala przerwać eksploatację maszyny.

Wielu badaczy z nadmiaru ostrożności podziela pogląd, że obecność austenitu szczątkowego zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową, sprzyjając wzrostowi naprężeń własnych rozciągających. W kontrolowanych warunkach nawęglania zawartość, rozkład węgla w warstwie nawęglonej i jej twardość powierzchniową, utrzymuje się w węższym przedziale, gdy austenit szczątkowy jest korzystnie rozmieszczony w tej warstwie i pod wpływem zmieniającego się naprężenia przemienia się w martenzyt, co zwiększa trwałość kół zębatych nawet do 2 razy.

Warstwa nawęglona ma skład zbliżony ze składem stali narzędziowych, zawiera znaczną zawartość austenitu szczątkowego, dlatego dla jego skutecznego usunięcia wymagana jest obróbka podzerowa (hartowanie standardowo przy temperaturze -78°C), a nawet głębokie długookresowe wymrażanie.



TSCHORN®

czujnik 3d

CENA NOWOROCZNA **780,00** netto

obowiązuje do końca marca

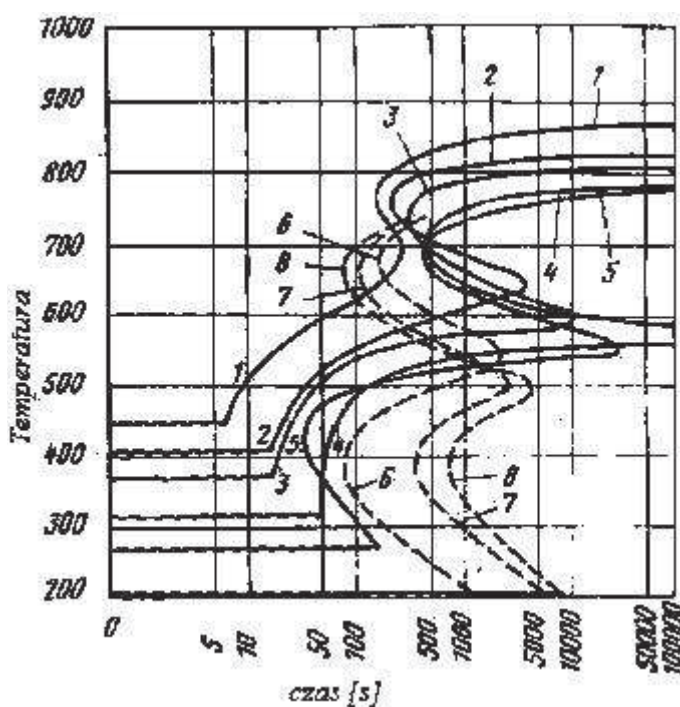
www.abc-tools.pl

58-100 Świdnica
ul. M. Kopernika 34

tel. 74 884 29 93
e-mail: info@abc-tools.pl
e-mail: biuro@abc-tools.pl

Głębokie długookresowe wymrażanie jest efektywne, gdy można spowodować dodatkową przemianę austenitu szczytkowego w martenzyt przy powolnym grzaniu od temperatury wymrażania (ok. -180°C) do temperatury pokojowej. Jest to możliwe, gdy dodatkowa przemiana austenitu ma cechy przemiany izotermicznej z maksymalną szybkością przy temperaturze ok. -100°C . Maksymalna szybkość tej przemiany jest znacznie mniejsza niż przy zwykłym odpuszczaniu, dlatego głębokie wymrażanie jest zabiegiem długotrwałym. Wymrażanie sprzyja korzystnemu zwiększeniu objętości i relaksacji naprężeń nie tylko w warstwie dyfuzyjnej.

Innym przykładem korzystnej obecności austenitu szczytkowego w strukturze są stale z niestabilnym mechanicznie austenitem w rodzaju (0,3–1,0% C) Cr, Mo, Ni, Si. Na wykresie CTP, tych stali (rys. 4; stale 4–8), poniżej zakresu prze-



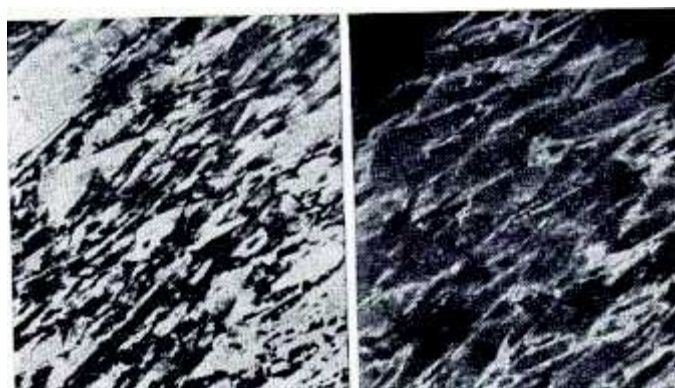
Rys. 4. Wpływ węgla na wykresy CTPi kilku stali o tej samej zawartości Cr (1%); (Mo+B) (0,5%) oraz zawartości węgla (w %): 1 – 0,12; 2 – 0,22; 3 – 0,32; 4 – 0,42; 5 – 0,55; 6 – 0,65; 7 – 0,82; 8 – 1,04 [2]

miany perlitycznej, ale nieco powyżej temperatury M_s występuje skrócenie okresu inkubacyjnego, po czym krzywe rozpadu przybierają znowu kształt C. Tak więc w stalach średnio węglowych przemiana martenzytyczna może rozpocząć się zanim ustanie przemiana austenitu w bainit (rys. 4), wskutek inicjującego wpływu na przemianę martenzytyczną deformacji sieci krystalicznej przez zarodki bainitu.

Z dalszym spadkiem temperatury szybkość przemiany bainitycznej stopniowo się zmniejsza i zanika wskutek zmniejszania się termodynamicznej aktywności węgla. Na kształt krzywej CTP, tzn. na przebieg przemiany przechłodzonego austenitu ma wpływ głównie krzem utrudniający wydzielanie węglików żelaza. Krzem stymuluje izotermiczną przemianę bainityczną oraz wpływa na metastabilność termiczną

i niestabilność mechaniczną austenitu. Nieprzemieniony austenit przechłodzony do temperatury pokojowej i niższej, może być stabilny przez długi okres czasu. Po osiągnięciu pewnego progu temperaturowego lub pod wpływem obciążenia, ulega on przemianie martenzytycznej. Z austenitu nieprzemienionego, szczytkowego, powstaje martenzyt bardziej stopowy o większej twardości i przez to bardziej odporny na odpuszczanie i na zużycie przez tarcie. Niektóre gatunki tych stali poddawane są specyficznej obróbce cieplnej i uzyskują właściwości mechaniczne porównywalne wysokostopowymi, wysokowytrzymałymi, drogimi stalami typu maraging. Strukturę stali po specyficznej obróbce cieplnej pokazano na rys. 5.

Sumując, do rozwiązywania praktycznych zadań w obróbce cieplnej stali stopowych, w wielu przypadkach potrzebna jest szczegółowsza wiedza o wpływie szybkości chłodzenia na



Rys. 5. TEM z dyfrakcją elektronów. Mikrostruktura stali 40 HNSM austenityzowanej przy 1200°C , oziębionej do temperatury 870°C , następnie zahartowanej; a – pole jasne; b – pole ciemne w refleksie od austenitu. Grubość listw austenitu (listwy białe na zdjęciu prawym) ułożonych na przemian z listwami martenzytu mieści się w przedziale od ok. 0,1 do 0,2 μm [3]

przebieg przemiany austenitu w martenzyt i na końcową strukturę stali. Na ogół wystarczy znajomość krzywych termokinetycznych CTPc i CTPi. Istnieją metody obliczeniowe oparte o związki między kinetyką przemiany w warunkach izotermicznych i przy chłodzeniu ciągłym. Pozwalają one określić czas wytrzymywania austenitu przechłodzonego w określonej temperaturze przez część czasu jego okresu inkubacyjnego, albo już po rozpoczęciu przemiany. Jednak zgodność wyników obliczeniowych z eksperymentalnymi obserwuje się tylko w przypadku przemiany perlitycznej i obliczenia zawodzą, gdy przemiany poprzedzane są wydzielaniem ferrytu lub węglików. Podstawowe przyczyny tej niezgodności zostały zasygnalizowane w artykule.

Literatura

1. W. D. Sadowski, E. A. Fokina: Austenit szczytkowy w stalach zahartowanych, Wyd. Nauka, 1986.
2. F. B. Pickering, w Physical Metallurgy and Design of Steels, 1978.
3. V. F. Zackay, E.R. Parker: Alloy Design, Berkeley, California, 1977.