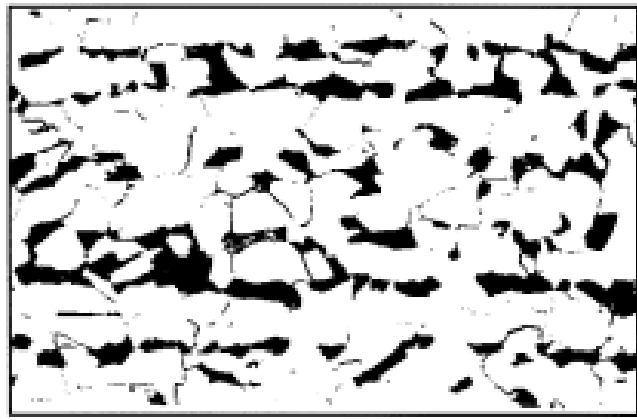


Nowoczesne stale bainityczne

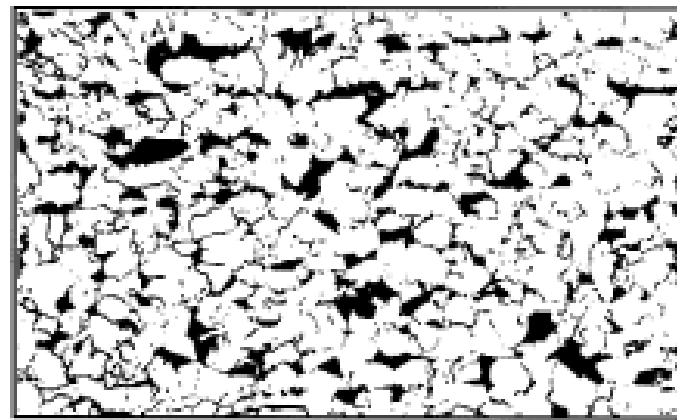
**Klasyfikacja, projektowanie, mikrostruktura,
właściwości oraz przykłady zastosowania**

Wykład opracował:
dr hab. inż. Zdzisław Ławrynowicz, prof. nadzw. UTP
Zakład Inżynierii Materiałowej,

Mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna



Standard



0,034%Nb

Zastosowanie:

- gazy i ropociągi ($R_m = 350-485$ MPa),
- urządzenia wiertnicze i platformy (345-415 MPa),
- statki (315-450 MPa),
- wysokie budynki (415-530 MPa),
- mosty (345-485 MPa).

Zalety tych stali to:

- niski koszt,
- spawalność, niezawodność.

Bainit-alternatywa dla mikrostruktur ferrytyczno-perlitycznych

Nr	C	Si	Mn	Mo	B	Rodzaj stali
1	0,100	0,25	0,50	0,55	0,0030	Wczesna stal bainityczna, (Irvine i Pickering)

Wczesne stale bainityczne

Stale o granicy plastyczności przekraczającej 1000 MPa mają znaczenie dla określonego zastosowania, lecz największe rynkowe zapotrzebowanie istnieje dla stali o mniejszej wytrzymałości, w których całkowita zawartość dodatków stopowych rzadko przekracza 2% masy. Stale niestopowe ulegają przemianie na mieszaninę ferrytu allotriomorficznego i bainitu, a poprawa hartowności zazwyczaj prowadzi do mikrostruktur częściowo martenzytycznych.

Dlatego rozwiązaniem, są niskostopowe, niskowęglowe stale zawierające małe ilości boru i molibdenu w celu zahamowania wydzielenia ferrytu allotriomorficznego (Irvine i Pickering). Stale te po normalizowaniu ulegają przemianie prawie całkowicie na bainit z małą ilością martenzytu lub innych faz.

Każdy rozwój nowoczesnych stali należy rozważać w kontekście stali już istniejących. Dlatego należy odnieść się do udanych stali ferrytyczno-perlitycznych, które są standardem w stosunku, do którego każde nowe stale muszą być oceniane.

Nowoczesne stale bainityczne

Klasyfikacja - wybrane przykłady

- 1. Stale bainityczne po kontrolowanym walcowaniu**
- 2. Stale bainityczne szybko chłodzone po kontrolowanym walcowaniu**
 - stale z dużą odkształcalnością,
 - stale z efektem TRIP,
 - ultraniskowęglowe stale bainityczne – ULCB
- 3. Bezwęglikowe wysokowytrzymałe stale bainityczne**
- 4. Wysokowytrzymałe stale bainityczne do obróbki cieplno-mechanicznej**
- 5. Bainit w stalach na szyny**

Stosunek $R_{0,2} / R_m$

$R_{0,2} / R_m$ znacznie mniejsze od 0,8 nawet gdy R_m jest wysokie.

$R_{0,2} / R_m$ 0,67 $\rightarrow$ 0,80 w zakresie temperatury 300 $\rightarrow$ 70 K

Stal używana w budownictwie w strefach aktywnych sejsmicznie.
Wtedy niski stosunek $R_{0,2} / R_m$ jest zaletą.

Dla stali na rurociągi, do transportu ropy lub gazu pod ciśnieniem minimalna wartość stosunku $R_{0,2} / R_m$ jest w granicach 0,85-0,90.

Stale szybko chłodzone po kontrolowanym walcowaniu

Bainityczną mikrostrukturę można uzyskać zwiększając albo hartowność stali albo szybkość chłodzenia, co jest preferowane gdyż wzrost hartowności pogarsza spawalność. Technologia szybkiego chłodzenia musi uwzględniać takie czynniki jak: wydajność produkcji, kinetykę przemiany, konieczność unikania odkształceń i nierównomiernego chłodzenia. Kontrolowana szybkość chłodzenia materiału o grubości 10 mm może dochodzić do 100 Ks^{-1} .

C	Si	Mn	Ni	Mo	Nb	Ti	B	Al	N
0,039	0,20	1,55	0,20	-	0,042	0,015	0,0013	0,024	0,0030
0,081	0,25	1,86	0,20	0,09	0,045	0,016	-	0,025	0,0028
0,110	0,34	1,51	-	-	0,029	-	-	-	-

Stale szybko chłodzone po kontrolowanym walcowaniu

Stale na rury i blachy

Nr	C	Si	Mn	Ni	Mo	Nb	Ti	B	Al	N
1	0,039	0,20	1,55	0,20	-	0,042	0,015	0,0013	0,024	0,0030
2	0,081	0,25	1,86	0,20	0,09	0,045	0,016	-	0,025	0,0028
3	0,110	0,34	1,51	-	-	0,029	-	-	-	-

- ułamek objętościowy bainitu zmienia się w granicach 0,2-1,0 w zależności od składu chemicznego i szybkości chłodzenia, gdzie stal 1 jest najniżej stopową posiadającą najmniejszą ilość bainitu,
- typowa wytrzymałość $R_m=700$ MPa, która jest około 50-70 MPa większa niż w stali po konwencjonalnym kontrolowanym walcowaniu i duża uderność 160-200 J w -20°C .

Stale na blachy wysokotłoczne

Lata 70-te doprowadziły do rozwoju stali dwufazowych w celu obniżenia ciężaru auta i zmniejszenia zużycia paliwa.

Nr	C	Si	Mn	Nb	Ti	Al	Rodzaj stali
4	0,100	0,25	1,00	-	-	-	Stal bainityczna dwufazowa
5	0,040	-	0,40	-	-	0,050	Stal trójfazowa
6	0,150	0,35	1,40	0,022	0,011	0,035	Stal bainityczna dwufazowa

Zastosowanie bainitycznych stali dwufazowych:

- wysokościowe budownictwo w obszarach zagrożonych trzęsieniami ziemi, gdzie wykorzystuje się ich cechę, tj. niski stosunek $R_{0,2}/R_m$ (stop 6 w tabeli), który wynosi około 0,7 w porównaniu do stali ulepszonych, gdzie $R_{0,2}/R_m = 0,9$,
- typowe własności dla grubości 12-80 mm wynoszą: $R_{0,2} = 460$ Pa, $R_m = 600$ MPa, $A = 35\%$ i $KV > 200$ J w temperaturze pokojowej.

Stale TRIP

Końcowa mikrostruktura:

- mieszanina ferrytu allotriomorficznego który jest fazą przeważającą,
- 30-40% bainitu, martenzytu,
- i wzbogaconego w węgiel austenitu szczątkowego, około 5%.

Nr	C	Si	Mn	Al	N	Rodzaj stali
7	0,120	1,50	1,50	0,045	0,0035	stal TRIP

Dwa rodzaje stali TRIP:

- w pierwszym przypadku taśma zimno walcowana jest szybko nagrzewana do obszaru dwufazowego,
- w drugim przypadku obróbka cieplna rozpoczyna się od walcowanej na gorąco taśmy o strukturze austenitycznej, która podczas chłodzenia uzyskuje strukturę ferrytyczno-bainityczną.

Ultraniskowęglowe stale bainityczne – ULCB

Nr	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	Nb	Ti	B	Al	N
8	0,020	0,20	2,00	0,30	0,30	-	0,050	0,020	0,0010	-	0,0025
9	0,028	0,25	1,75	0,20	-	0,30	0,100	0,015	-	0,030	0,0035

Stężenie węgla ograniczono do 0,01-0,03%C

Stale ULCB posiadają znakomitą kombinację ciągliwości, wytrzymałości i spawalności i są stosowane do rurociągów w arktycznym lub morskim środowisku.

Bainit w stalach szynowych

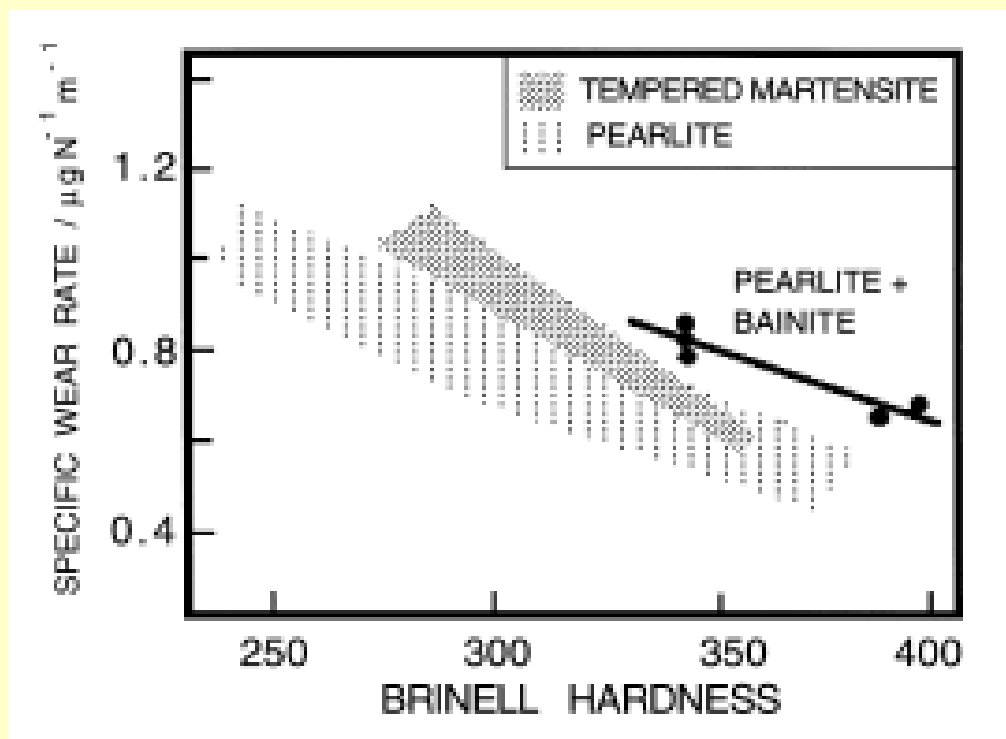
Zazwyczaj stale szynowe zawierają około 0,7%C i są perlityczne. Jednak specjalne gatunki stali przeznaczone są na tory do przewozu dużych ładunków lub szybkich pociągów.

Nr	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	Nb	Ti	B	Al
1	0,04	0,20	0,75	2,0	0,25	2,8	-	0,03	0,01	0,03
2	0,07	0,30	4,50	-	0,50	-	0,1	-	-	-
3	0,10	0,30	0,60	4,0	0,60	1,7	-	0,03	0,01	0,03
4	0,52	0,25	0,35	1,5	0,25	1,7	0,1	-	0,01	-

- stal 1 oprócz dobrej spawalności posiadała porównywalną lub nawet wyższą odporność na ścieranie od stali perlitycznych,
- nawet w przypadku takiej samej charakterystyki ścierania stali perlitycznych i bainitycznych, to niska zawartość węgla w stalach bainitycznych zapewnia lepszą ciągliwość, odporność na pękanie i spawalność,
- ostatnie badania odporności na ścieranie trzech stali bainitycznych o zawartości węgla od 0,07 do 0,52%C (stopy 2-4) wykazały, że posiadają one zbliżoną odporność na ścieranie do stali perlitycznych lecz lepszą ciągliwość.

Bainit w stalach szynowych

Odporność na ścieranie jest własnością złożoną materiału, jednak rośnie ze wzrostem twardości.

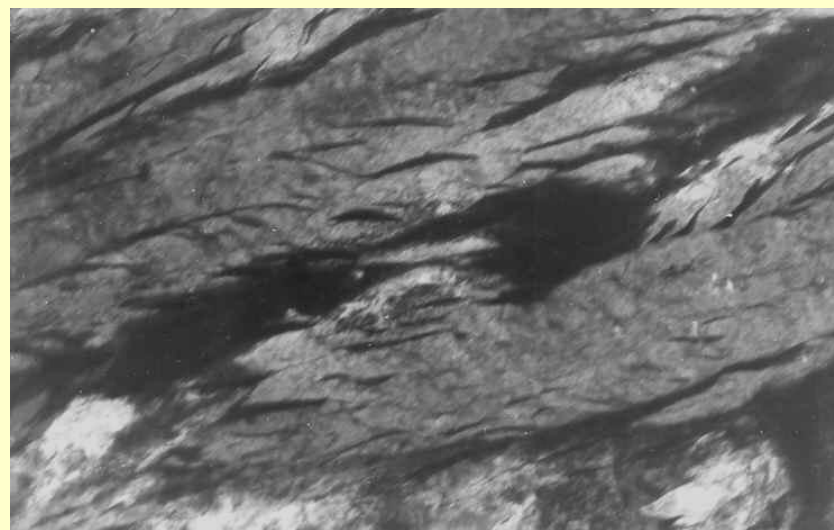


Wpływ twardości na ścieranie mikrostruktur perlitycznych, bainitycznych i martenzytycznych

Bainit w stalach szynowych



Bezwęglikowe wysokowytrzymałe stale bainityczne



Zalety takiej mikrostruktury:

- brak cementytu czyni mikrostrukturę bardziej odporną na kruche pękanie,
- rozdrobnienie listew ferrytu, których grubość jest mniejsza od $1\text{ }\mu\text{m}$,
jest to jedyny sposób, który jednocześnie poprawia wytrzymałość i udurowienie stali,
- ciągłe warstwy austenitu szczątkowego rozmieszczone między listwami ferrytu i
poprawiają ciągliwość poprzez zwiększenie pracy łamania,
- stale te nie zawierają kosztownych dodatków stopowych.

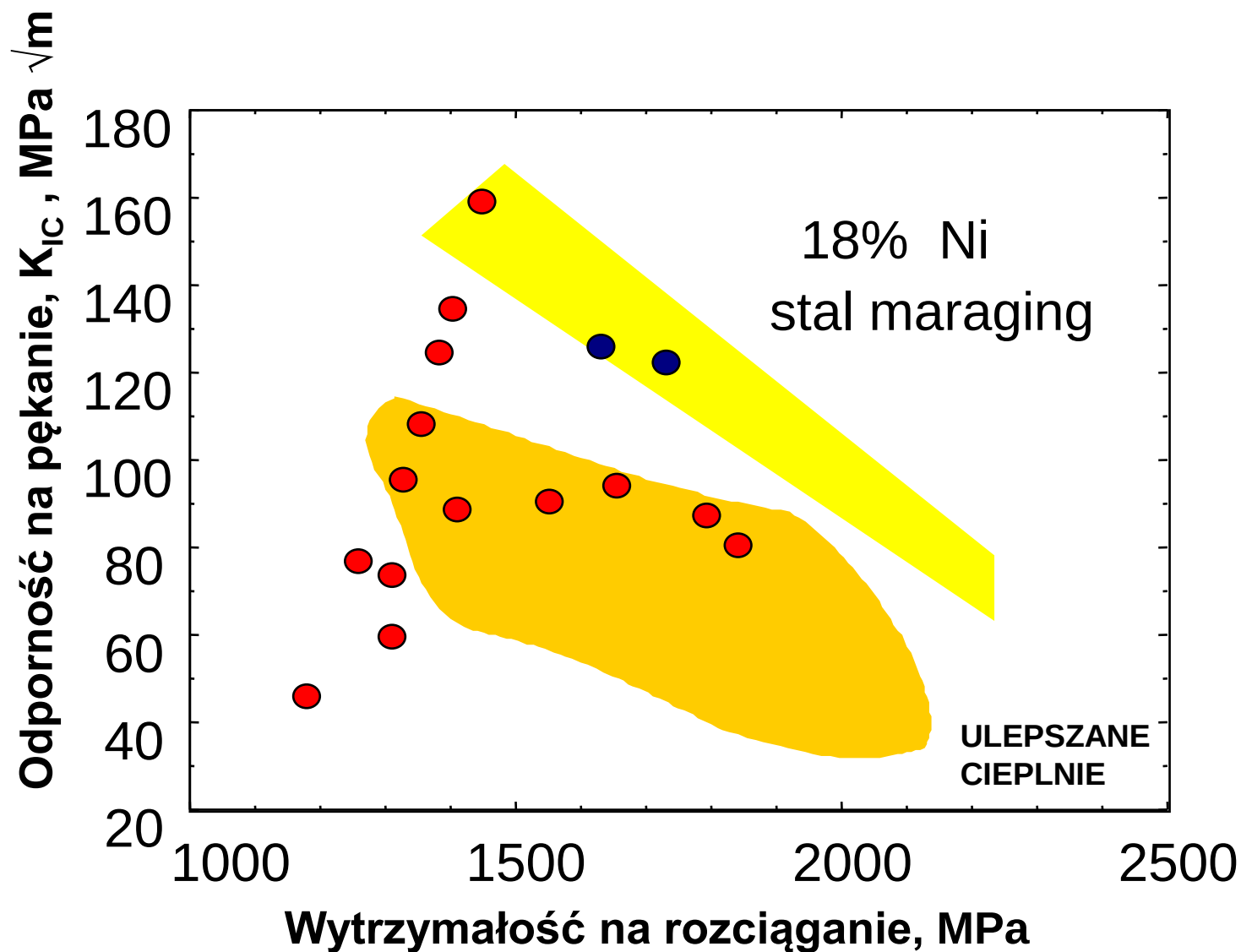
Bezwęglkowe stale bainityczne

Skład chemiczny w % masy

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	R _{0,2} /MPa	R _m /MPa
Mn	0,30	1,5	2,0	-	1,30	0,25	0,1	1170	1800
Ni1	0,30	1,5	-	3,5	1,44	0,25	0,1	1150	1730
Ni2	0,30	1,5	-	3,5	1,44	0,25	-	1100	1625

$$K_{IC} = 125-128 \text{ MPam}^{1/2}$$

Bezwęglkowe stale bainityczne



Bezwęglkowe stale bainityczne

Przykłady zastosowania



Przednie osie w samochodach ciężarowych (ponad pół miliona), wykonane ze stali bainitycznej



Pręty pomp olejowych

Konstrukcje inżynierskie



Bezwęglkowe stale bainityczne

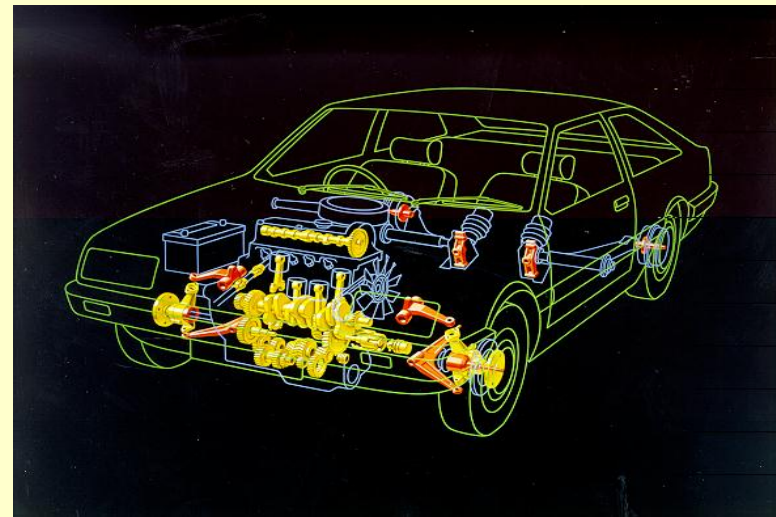
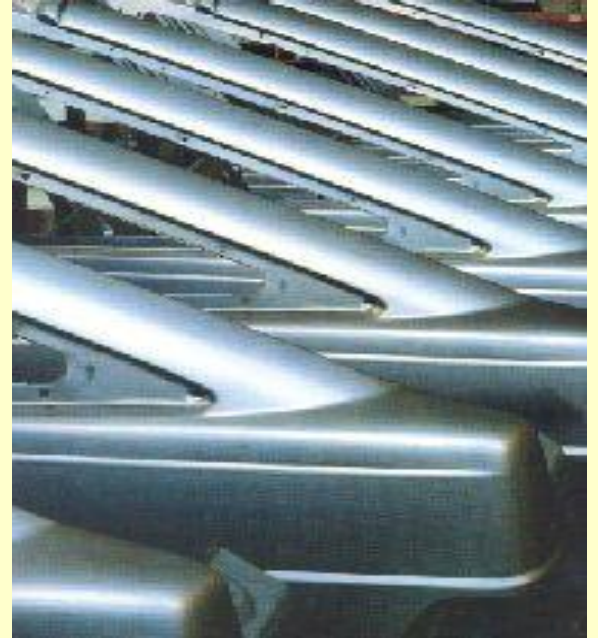
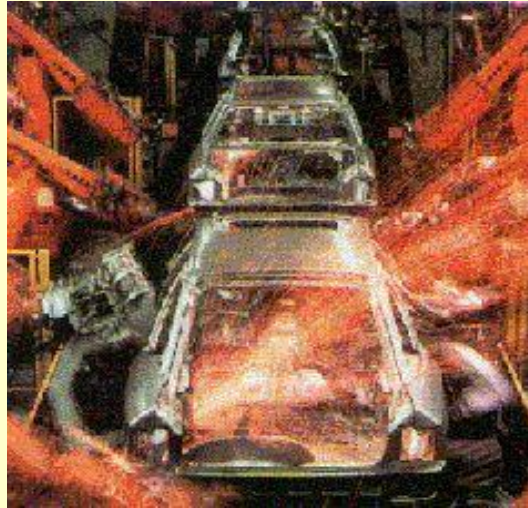
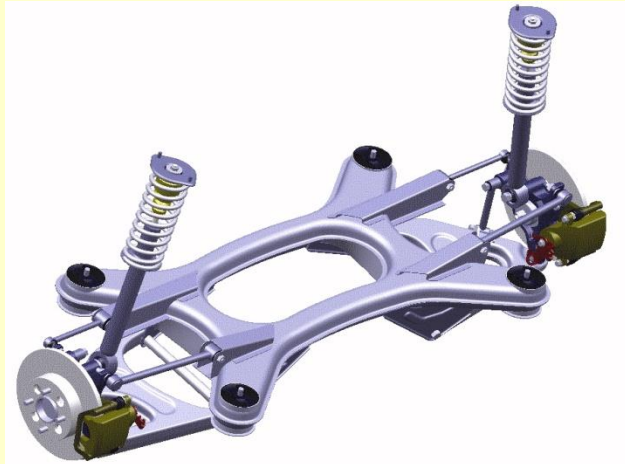
Przykłady zastosowania



Rury bez szwu ze stali bainitycznej
o wytrzymałości $R_m=1400$ MPa

Duże śruby ($R_m=1500$ MPa)
używane w porcie Hong Kong

Transport



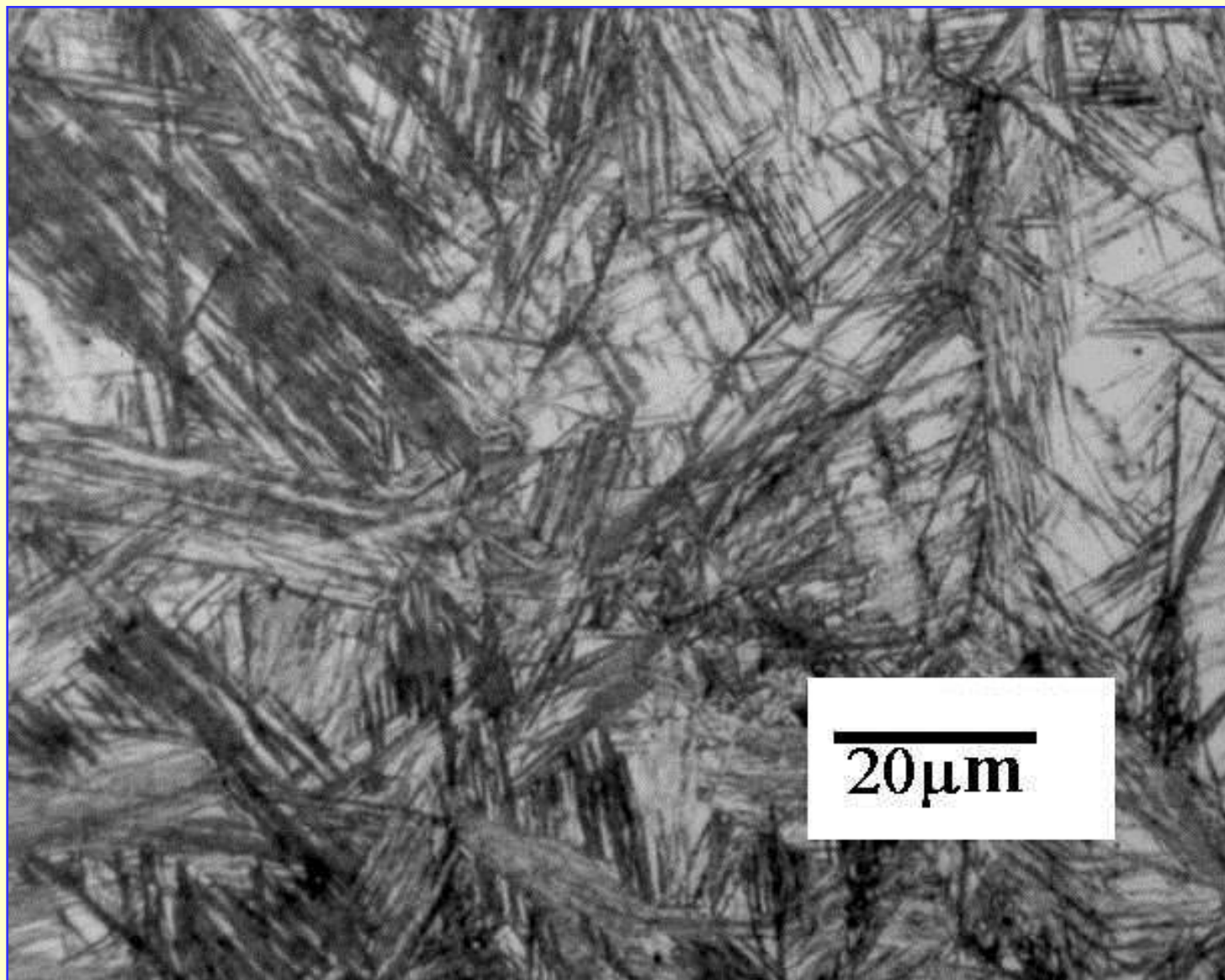
Bezwęglkowe stale bainityczne

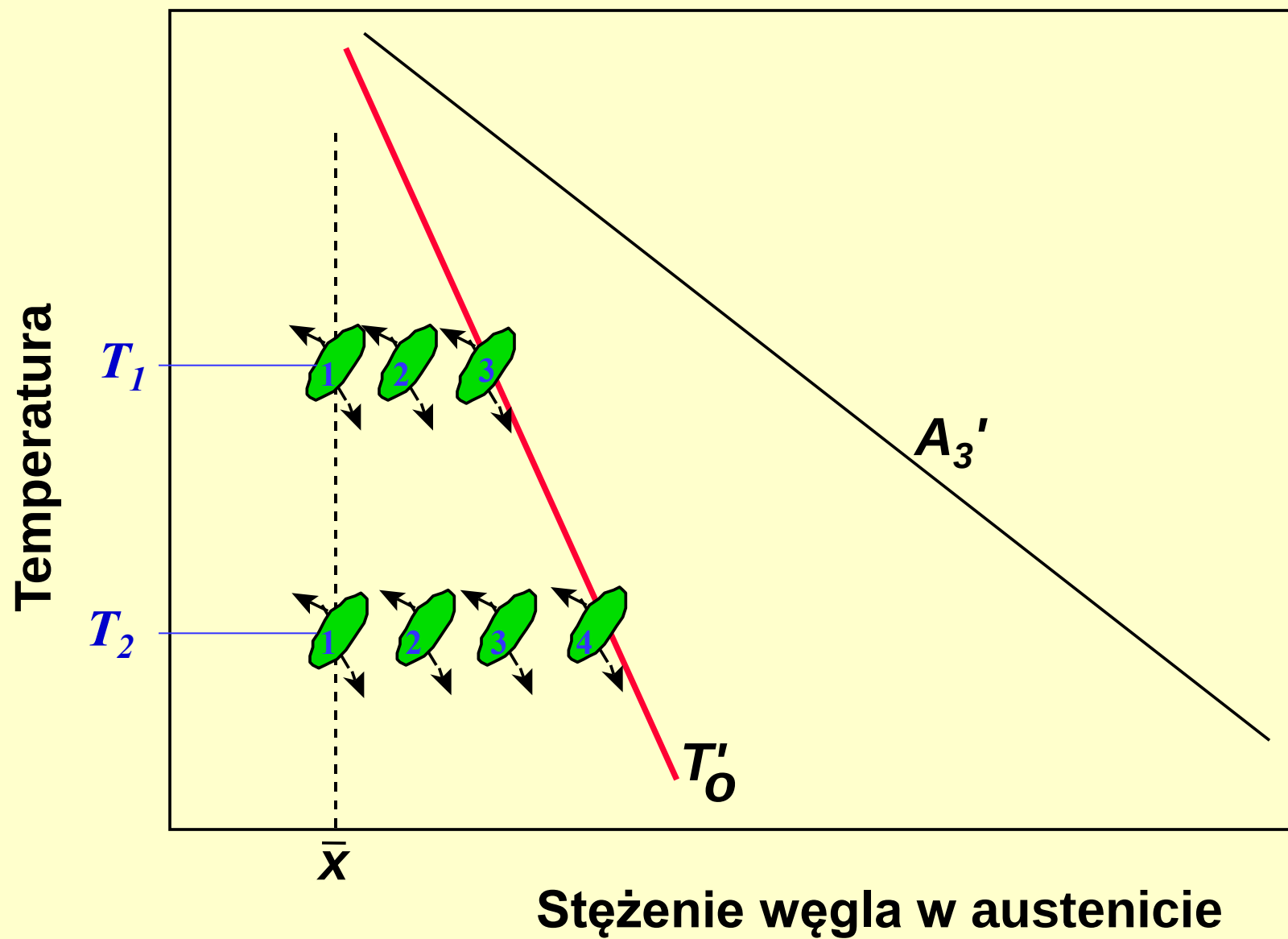
Zasady projektowania

Austenit blokowy można usunąć zwiększając stopień przemiany bez wydzielania węglików na trzy sposoby:

- obniżając temperaturę przemiany
co zwiększa jej stopień,
- redukując stężenie węgla w stali,
- przesuwając krzywe T_0 na wykresie fazowym do większego stężenia węgla.

Austenit o morfologii blokowej między wiązkami bainitu

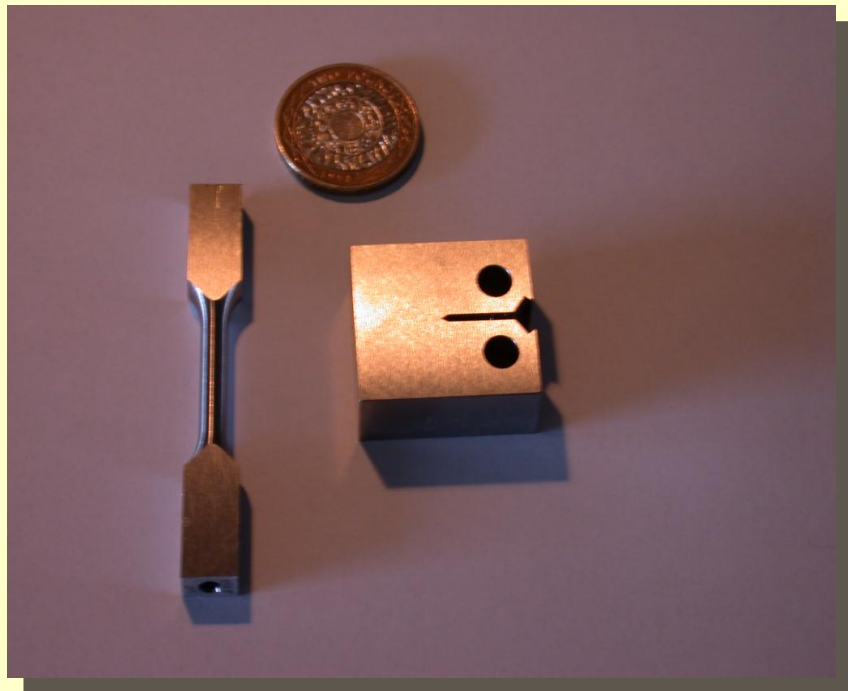




Bainit niskotemperaturowy

Skład chemiczny w % masy

Stale	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
A	0,79	1,59	1,94	1,33	0,30	0,10
B	0,98	1,46	1,89	1,26	0,26	0,09



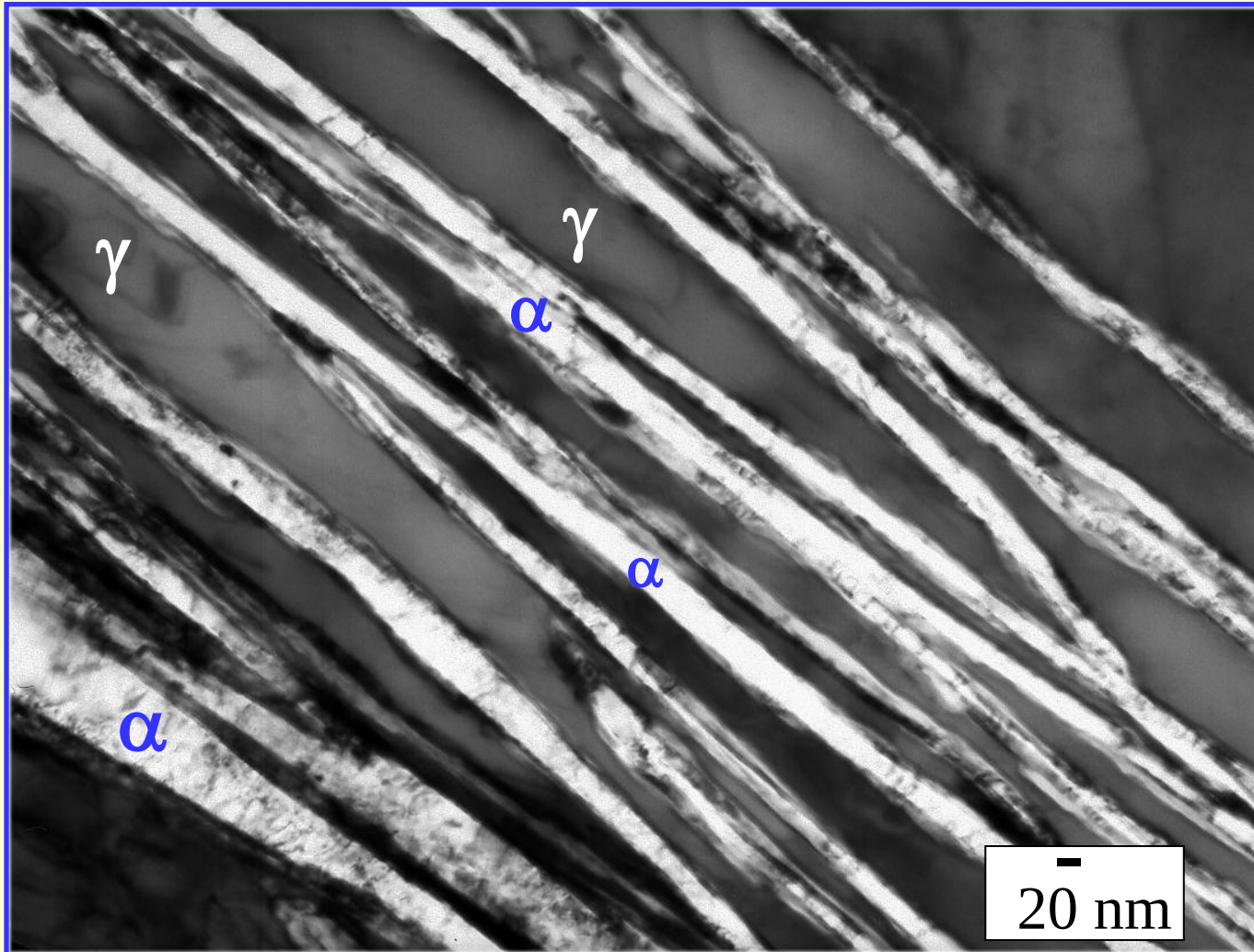
Stal A. Przemiana w 200 °C:

HV ~ 650

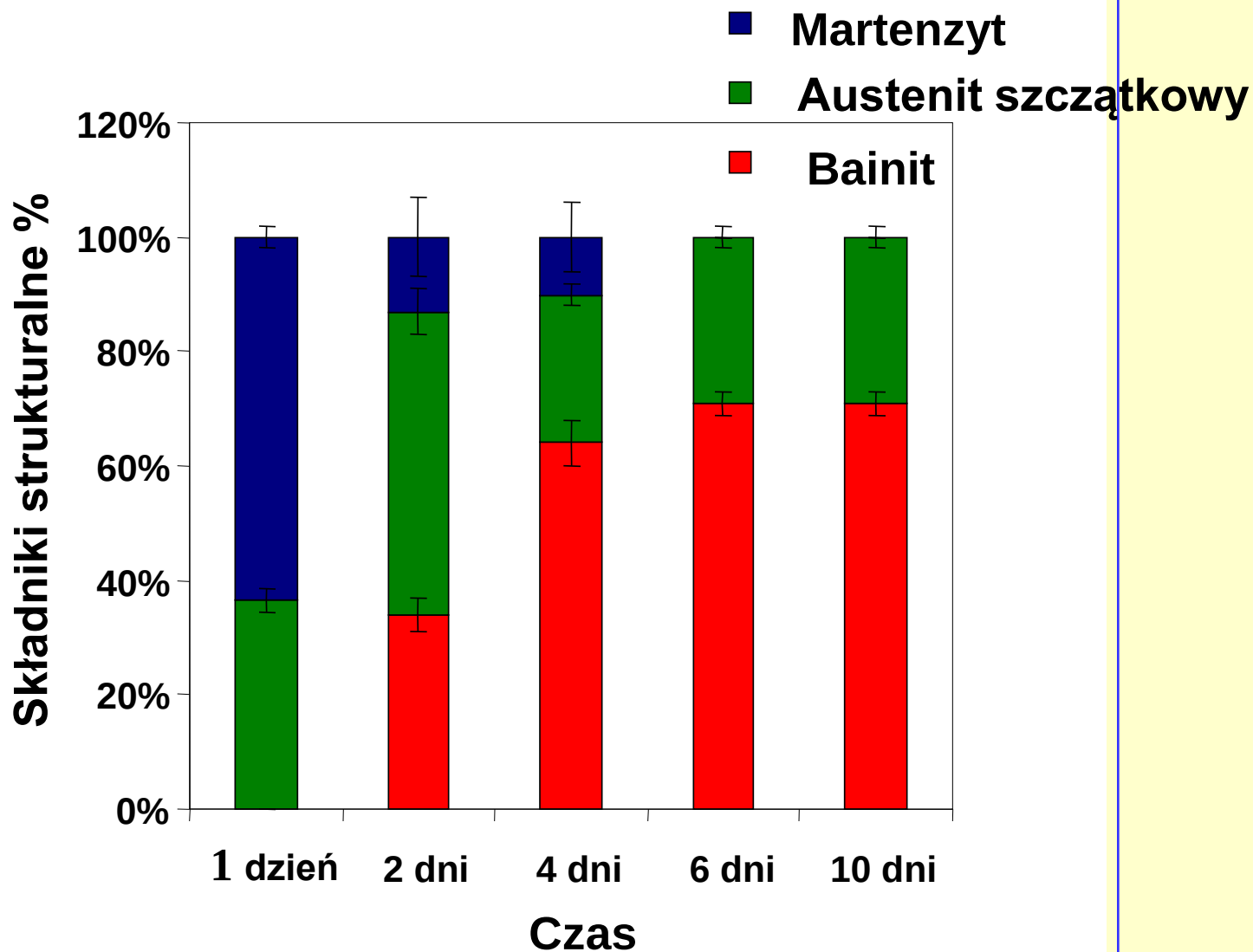
$R_{0,2} \sim 2000 \text{ MPa}$

$R_m \sim 2500 \text{ MPa}$

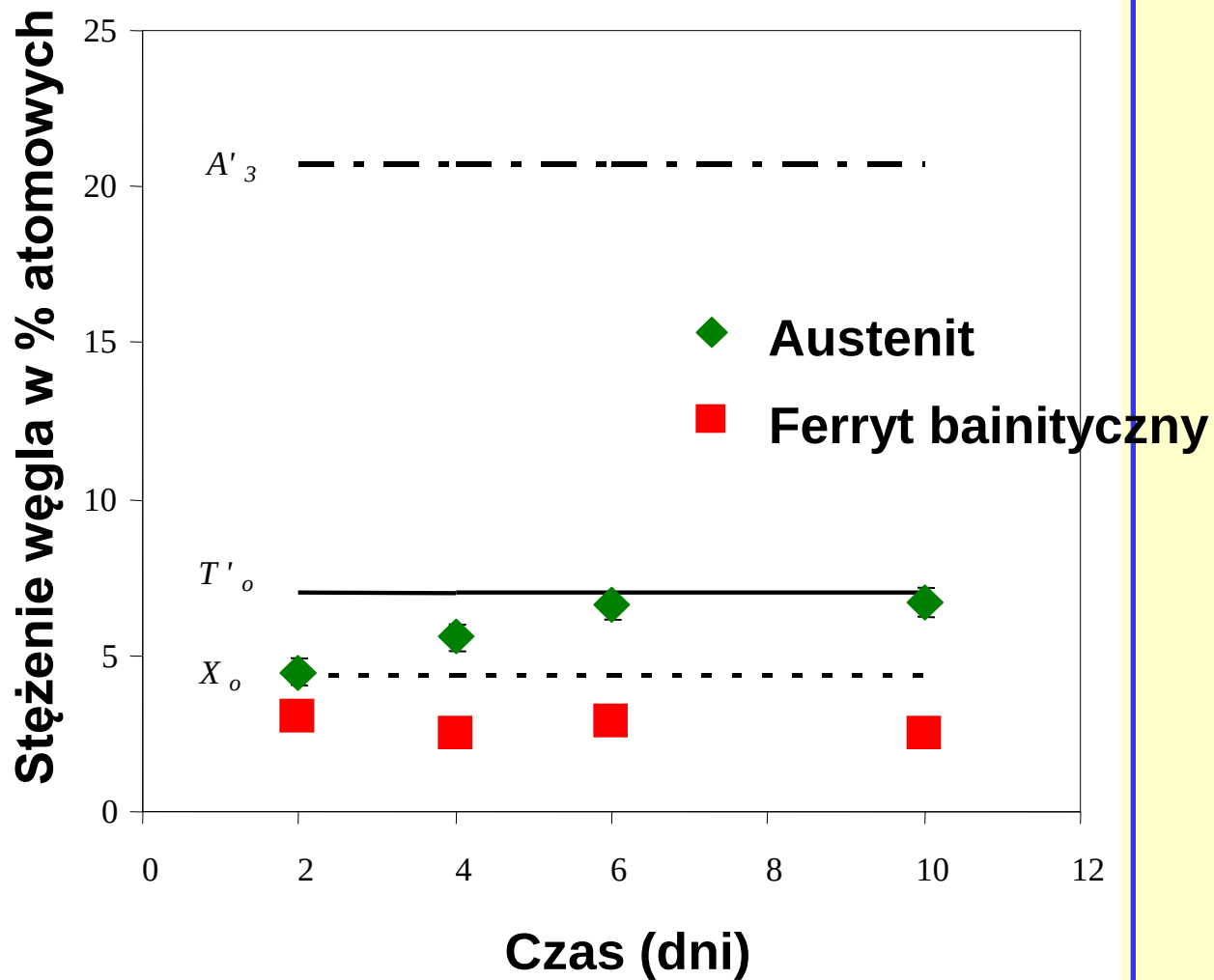
Bainit niskotemperaturowy



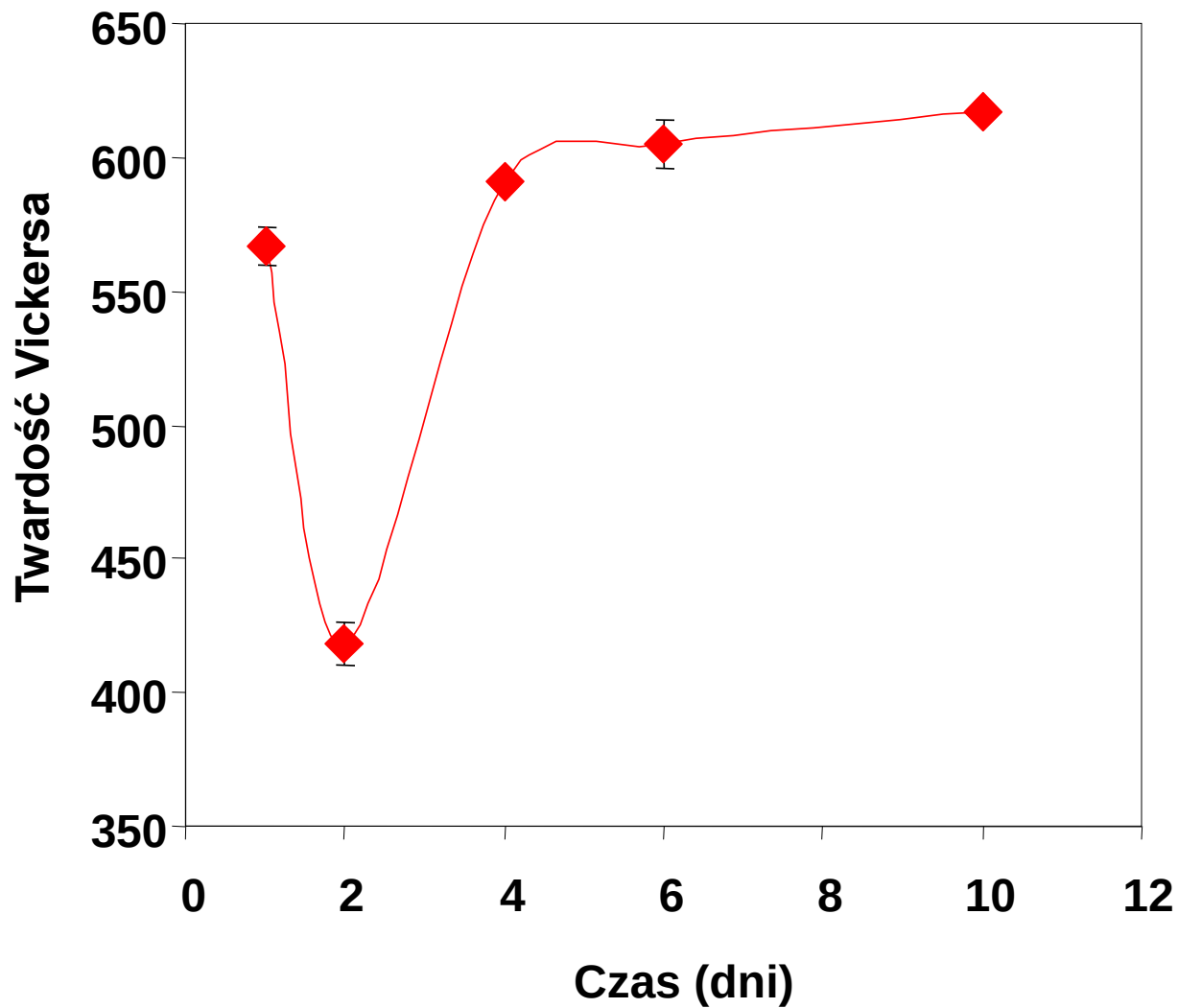
Stal B. Przemiana w 200 °C



Przemiana w 200 °C



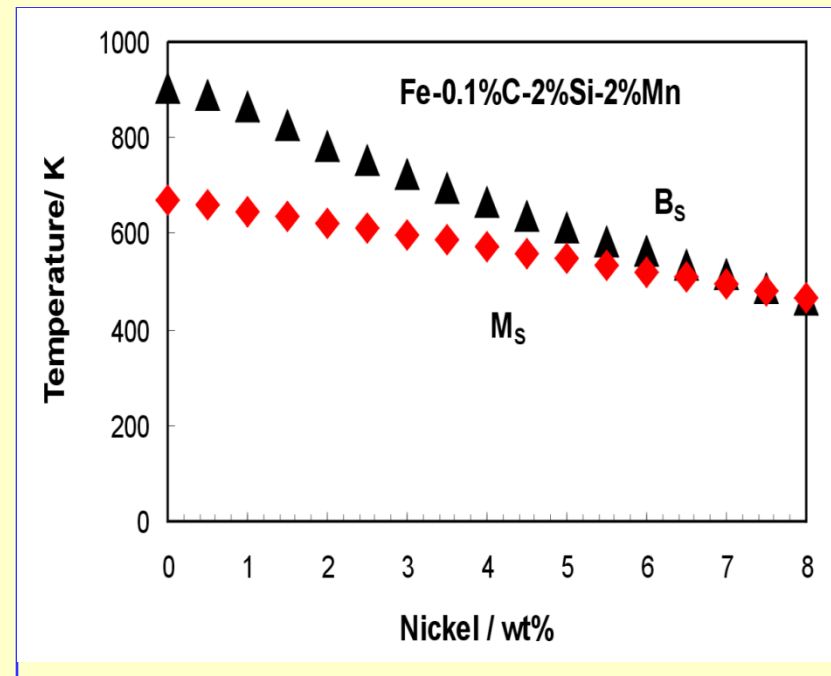
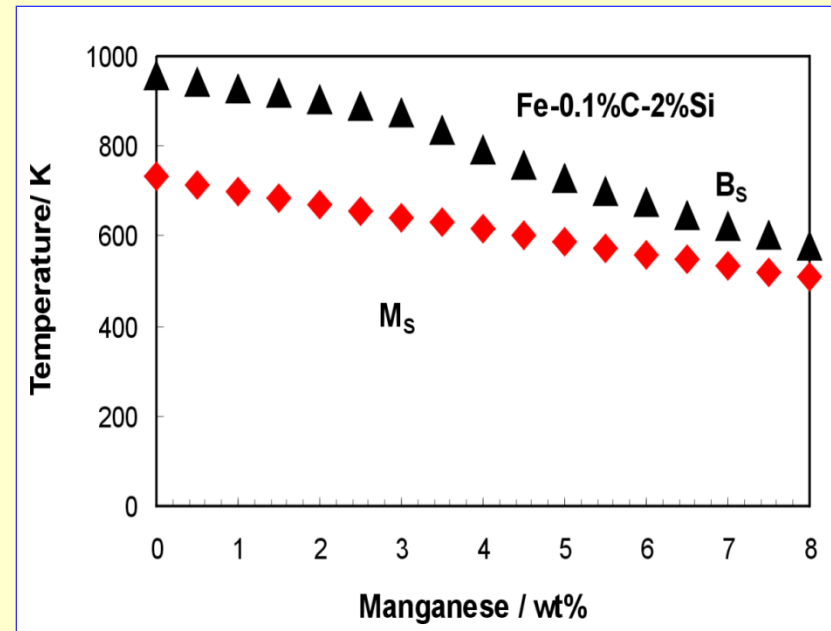
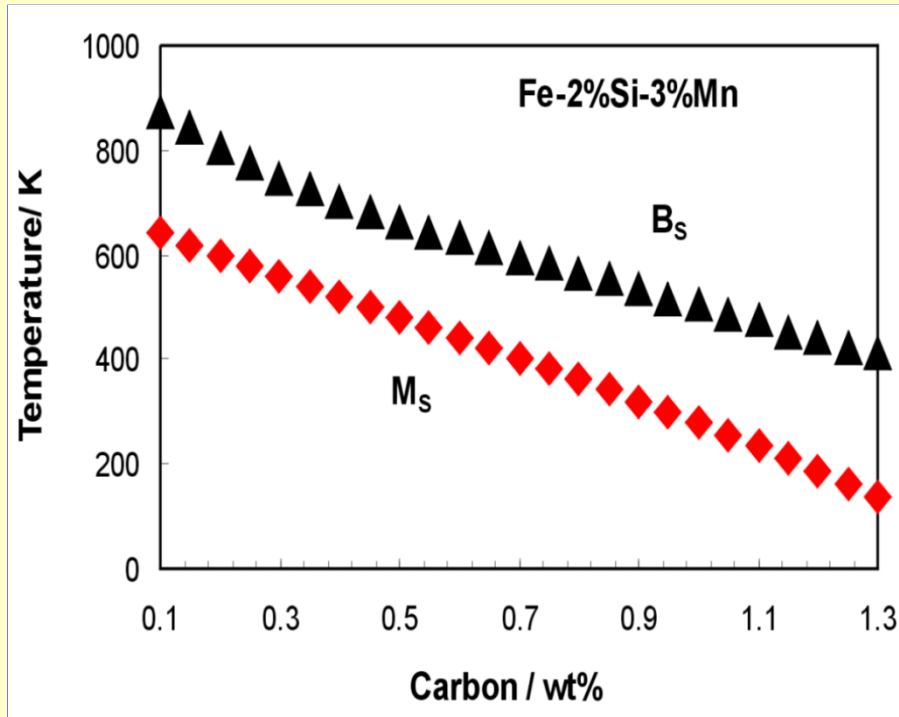
Przemiana w 200 °C





Stal bainityczna na pancerze

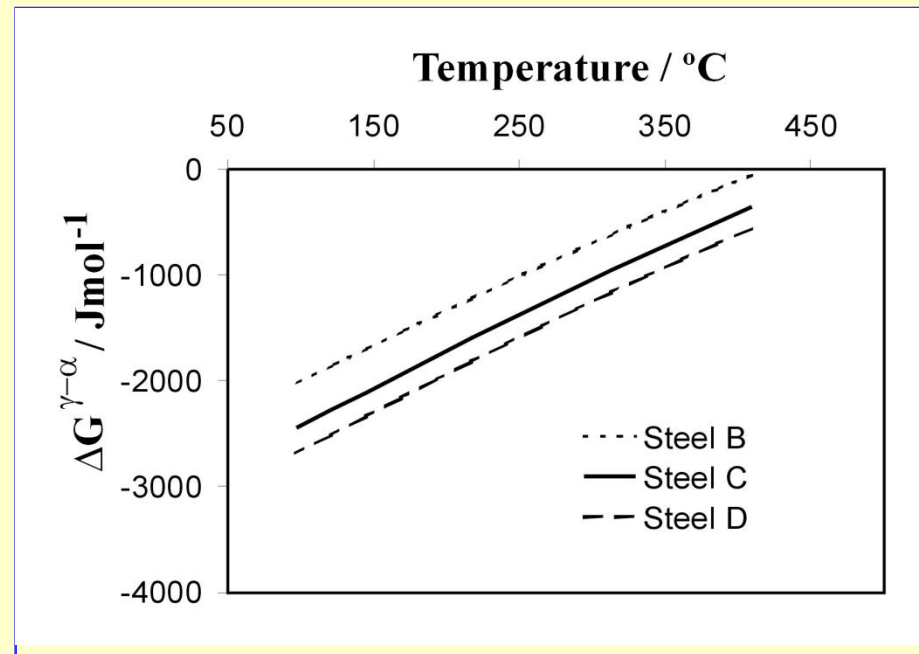
Obniżenie temperatury przemiany



Przyśpieszenie przemiany

Skład chemiczny w % masy

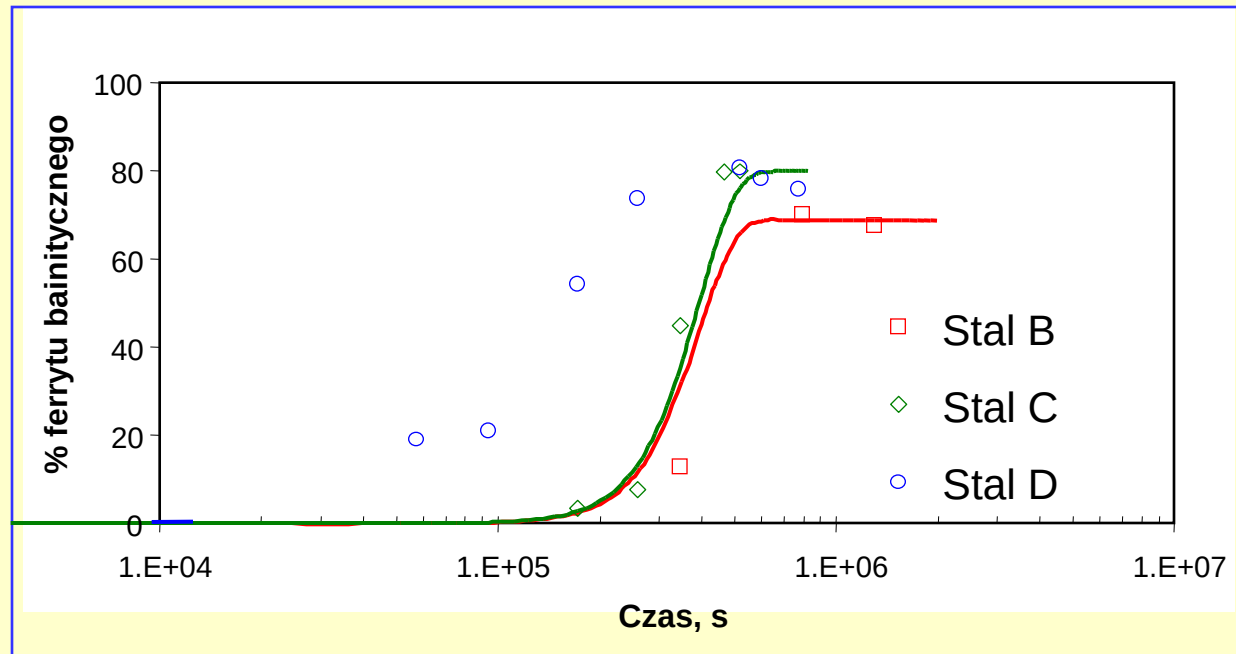
Stale	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Co	Al
B	0,98	1,46	1,89	1,26	0,26	0,09	-	-
C	0,83	1,57	1,98	1,02	0,24	-	1,54	-
D	0,78	1,49	1,95	0,97	0,24	-	1,60	0,99



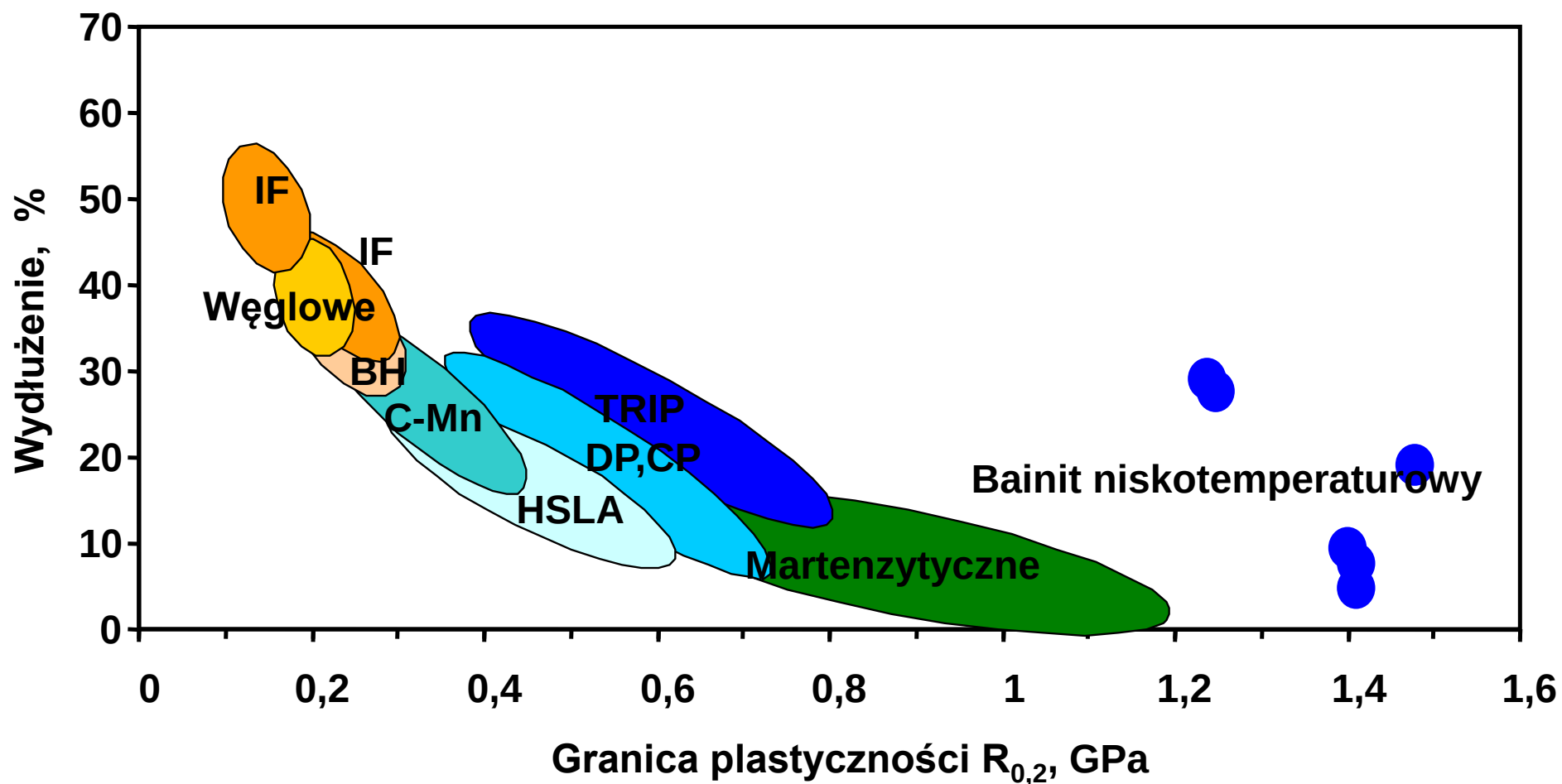
Przyśpieszenie przemiany

Skład chemiczny w % masy

Stale	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Co	Al
B	0,98	1,46	1,89	1,26	0,26	0,09	-	-
C	0,83	1,57	1,98	1,02	0,24	-	1,54	-
D	0,78	1,49	1,95	0,97	0,24	-	1,60	0,99



Porównanie właściwości mechanicznych



Wnioski

1. Stale zaprojektowane z wykorzystaniem teorii przemiany bainitycznej posiadają najwyższą kombinację wytrzymałości i ciągliwości.
2. Właściwości mechaniczne są wyższe niż w stalach ulepszonych cieplnie i są zbliżone do właściwości stali maraging, które są 30 razy droższe.