

# Wpływ zawartości węgla i obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne i mikrostrukturę stali niestopowej

dr inż. Kazimierz Bolanowski, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Technik Komputerowych i Uzbrojenia, Zakład Metaloznawstwa i Technologii Amunicji

Przedmiotem niniejszego opracowania jest stal niestopowa, której właściwości mechaniczne w wielu przypadkach są wystarczające w zastosowaniach technicznych. Właściwości mechaniczne stali można kształtować w dość dużym zakresie. Zakres możliwych zmian właściwości mechanicznych stali zależy od jej składu chemicznego, technologii wytwarzania, sposobu obróbki cieplnej itd.

## Wprowadzenie

Stopy na osnowie żelaza od wieków odgrywają ważną rolę w rozwoju cywilizacyjnym społeczeństw. Dzięki specyficznym właściwościom stopy żelaza z węglem i innymi pierwiastkami takimi jak mangan, chrom, nikiel, molibden i innych znalazły szerokie zastosowanie w budowie maszyn, konstrukcji oraz na narzędzia takie jak noże tokarskie, wykrojniki, walce hutnicze, matryce itd. Szczególnie burzliwy rozwój w hutnictwie stopów żelaza obserwowano w XIX i XX wieku, co było związane z rozwojem komunikacji, budownictwa, telekomunikacji, przemysłu okrętowego, energetycznego i in. W tamtym okresie opracowano wiele gatunków stali i staliw niestopowych, oraz nisko, średnio i wysokostopowych, które zaspokajały zapotrzebowanie w zakresie określonych właściwości fizycznych, fizykochemicznych i mechanicznych. Przedmiotem niniejszego opracowania jest stal niestopowa.

## Stal niestopowa

Za stal uważa się stop przynajmniej dwóch pierwiastków, tj. żelaza i węgla, przy czym zawartość węgla zazwyczaj nie przekracza ok. 2% masowych. W praktyce nie stosuje się czystych stopów żelaza z węglem, ponieważ byłoby to niecelowe i ekonomicznie nieuzasadnione. Handlowe gatunki stali niestopowej zawierają w swoim składzie oprócz podstawowych pierwiastków Fe i C również dodatki technologiczne Si, Mn i Al. Stopy te zawierają także śladowe ilości fosforu, siarki

i innych pierwiastków, które nie zostały wprowadzone do stopu celowo, a ich źródłem jest przeważnie wsad hutniczy. Pierwiastki takie jak Cu, P i S traktowane są najczęściej jako zanieczyszczenia niepożądane. Ich obecność w stopie w większych ilościach może prowadzić do np. zwiększenia kruchości, trudności przy obróbce plastycznej itd.

Do stali niestopowej (węglowej) zalicza się te gatunki, w których zawartość poszczególnych pierwiastków nie przekracza określonych przez normę PN-EN 10020 granic. Poniżej przytoczone są przykłady granicznych zawartości wybranych pierwiastków. Pełna listę pierwiastków można znaleźć w obowiązującej obecnie normie PN-EN 10020.

Graniczna zawartość wybranych pierwiastków jest następująca: 1,65% Mn, 0,50% Si, 0,30% Ni, 0,30% Cr, 0,10% W, 0,10% Co, 0,40% Cu, 0,10% Al, 0,08% Mo, 0,10% V, 0,05% Ti. Granice te mają charakter arbitralny i zostały wprowadzone na zapotrzebowanie przemysłu hutniczego.

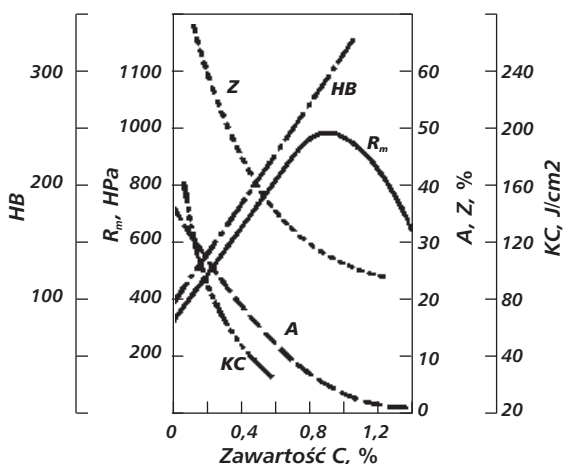
Wpływ zawartości węgla na mikrostrukturę quasirównowagowych stopów żelaza z węglem można odczytać z układu równowagi Fe-Fe<sub>3</sub>C.

## Właściwości mechaniczne stali niestopowej

Właściwości mechaniczne stali niestopowej zależą od zawartości węgla, wielkości ziarna, zastosowanej obróbki cieplno plastycznej i cieplnej. Wzrost zawartości węgla w stali



wpływa na zwiększenie jej twardości, wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności, przy czym jednocześnie ulegają zmniejszeniu: udarność, wydłużenie względne i przewężenie względne. Zmniejszenie wielkości ziarna zwiększa właściwości wytrzymałościowe stali. Wpływ zawartości węgla na właściwości mechaniczne stali wyżarzonych do zawartości ok 1,4% C zilustrowano poniżej (rys. 1)



Rys. 1. Wpływ zawartości węgla na właściwości mechaniczne stali niestopowej w stanie wyżarzonym. (A.P. Gulajew) [2]

Z powyższego rysunku wynika, że przy wzroście zawartości węgla wytrzymałość na rozciąganie osiąga maksimum przy około 0,8–0,9% C, a zwyżka jego zawartości powyżej ok. 0,9% C w stanie wyżarzonym prowadzi do obniżenia wytrzymałości. Tendencji takiej nie wykazuje twardość, a właściwości plastyczne wraz ze wzrostem zawartości węgla obniżają się.

Obróbka plastyczna ma duże znaczenie w kształtowaniu właściwości mechanicznych i mikrostruktury wyrobów stalowych.

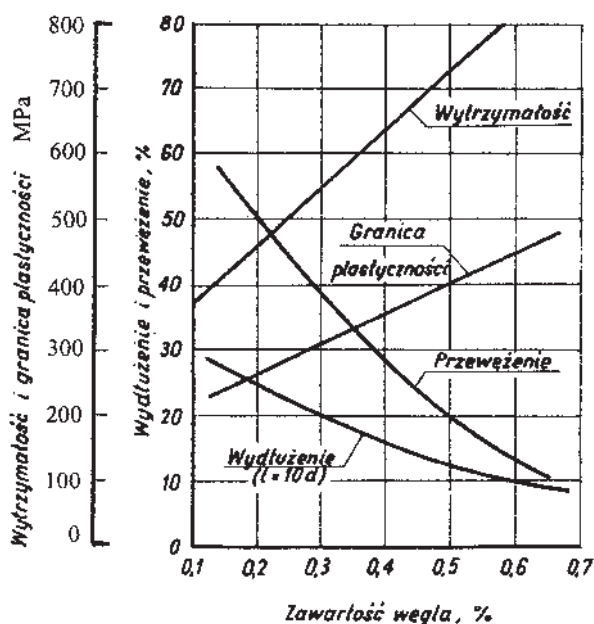
Zależnie od sposobu obróbki plastycznej, temperatury obróbki, stopnia przerobu i sposobu przerobu (kucie, walcowanie, przeciąganie itp.) można uzyskiwać zróżnicowane właściwości stali, przy czym przeważnie obserwuje się znaczną anizotropię właściwości w poszczególnych wyrobach. Blachy ze stali niestopowej po walcowaniu mają zróżnicowane właściwości mechaniczne, co można stwierdzić przy próbie rozciągania lub w próbie udarnościowej na próbkach wycinanych poprzecznie i równoległe do kierunku walcowania. Ma to również odzwierciedlenie w mikrostrukturze materiału, co zaznacza się w charakterystycznym wydłużeniu składników mikrostruktury w kierunku obróbki plastycznej. Zmiany właściwości mechanicznych materiału blachach grubych ze stali niestopowej podeutektoidalnej zależnie od zawartości węgla zilustrowano na rys. 2.

Duże znaczenie w kształtowaniu właściwości mechanicznych stali niestopowej ma wielkość i kształt ziarna, które z kolei zależą od stopnia i intensywności obróbki plastycznej na gorąco, temperatury, przy której kończony jest proces obróbki plastycznej, a następnie od prędkości chłodzenia. Możliwości jakie stwarzają obróbki cieplno plastyczne znajdują coraz szersze zastosowanie w przetwórstwie hutniczym.

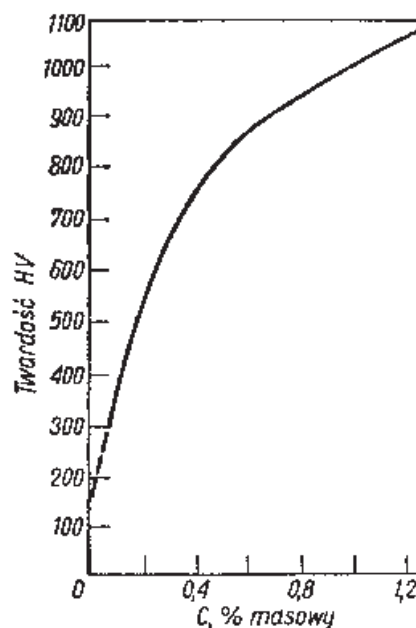
Obróbka cieplna pozwala na kształtowanie właściwości stali w dość szerokim zakresie, zależnie od potrzeb, co wiąże się jednocześnie ze zmianami mikrostruktury. Ten sam materiał może być np. po hartowaniu kruchy i twardy, a po wyżarzeniu zmiękczającym miękki i podatny do kształtowania plastycznego na zimno. Jest to często wykorzystywane w technologii produkcji różnych elementów i konstrukcji.

Specyficzną cechą stopów żelaza z węglem jest to, że w dość szerokich granicach można wpływać na twardość tych stopów poprzez hartowanie martenzytyczne. Twardość stali po hartowaniu (rys. 3) zależy od zawartości węgla.

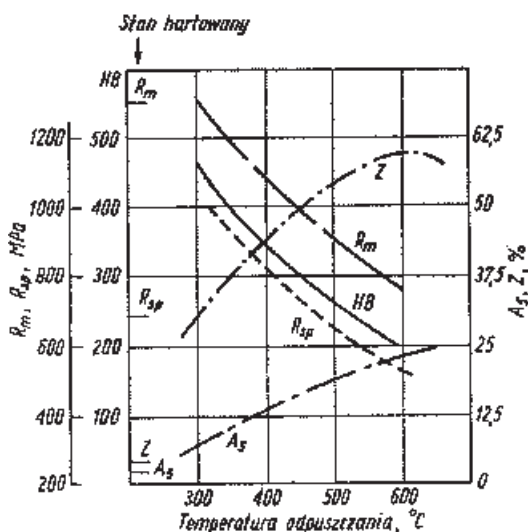
Odpuszczanie stali po hartowaniu prowadzi do obniżenia twardości i wytrzymałości na rozciąganie, jednocześnie



Rys. 2. Właściwości mechaniczne stali niestopowych walcowanych, w zależności od zawartości węgla [1]



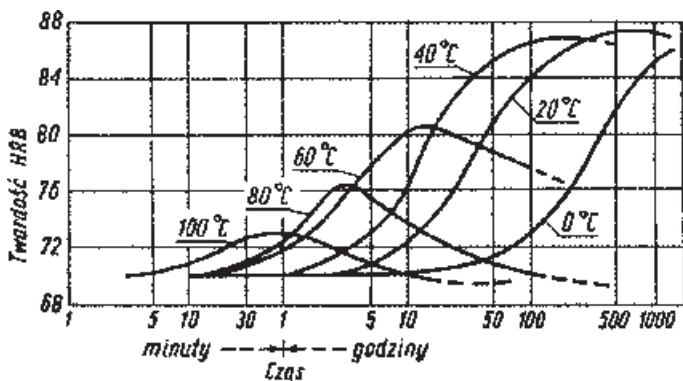
Rys. 3. Wpływ zawartości węgla na twardość martenzytu (E.C.Bain) [2]



Rys. 4. Wpływ temperatury odpuszczania na właściwości mechaniczne stali o zawartości 0,4% C (wg. A.P. Gulajewa) [2]

polepszają się właściwości plastyczne materiału. Zmiany właściwości mechanicznych pod wpływem wyżarzania (odpuszczania) po hartowaniu zilustrowano na rys. 4 dla stali o zawartości 0,4% C.

W ostatnich dziesięcioleciach nastąpił burzliwy rozwój stali umacnianych wydzieleniowo cząstkami fazy drugiej wydzielonymi z przesyconego roztworu stałego, np. węglików, azotków, węglikoazotków itp. Przykładem umocnienia wydzieleniowego jest efekt jaki uzyskuje się przy starzeniu przesyconej stali niskowęglowej (rys. 5). W zależności od ilości



Rys. 5. Wpływ czasu i temperatury starzenia na twardość stali o zawartości węgla 0,06% (Davenport, Bain) [2]

i wielkości wydzielonych cząstek węgla żelaza efekt ten może być znaczny lub mało zauważalny. Efekt umocnienia może z czasem zanikać po tzw przestarzeniu, tj wraz z utratą koherencji wydzielonych cząstek z osnową i ich postępującą koagulacją.

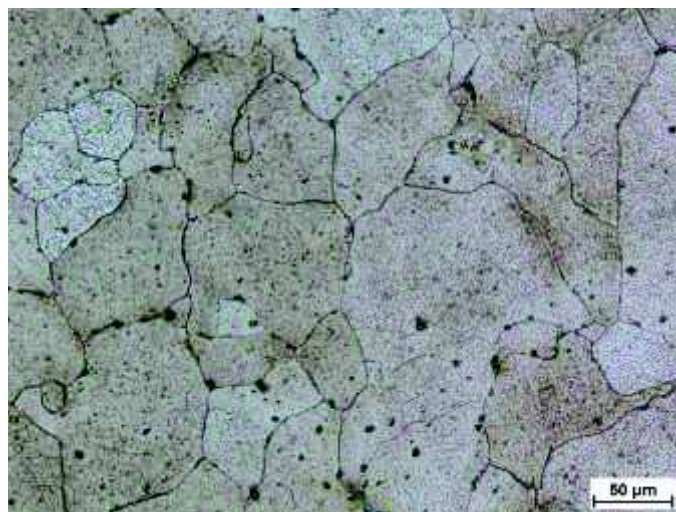
Jak wynika z rysunków 1–5, właściwości mechaniczne stali niestopowych zależą od wielu czynników, m.in. od zawartości węgla, warunków obróbki plastycznej i obróbki cieplnej (czas, temperatura). Czynniki te wpływając na właściwości mechaniczne znajdują odzwierciedlenie w mikrostrukturze stali.

### Przykładowe mikrostruktury stali niestopowej

Żelazo z niewielką zawartością pierwiastków (zanieczyszczeń) często zwane żelazem ARMCO lub stalą ARMCO dostępne w handlu ma skład chemiczny jak przedstawiono w tabeli nr 1.

Tabela 1. Skład chemiczny wybranych gatunków żelaza ARMCO [5]

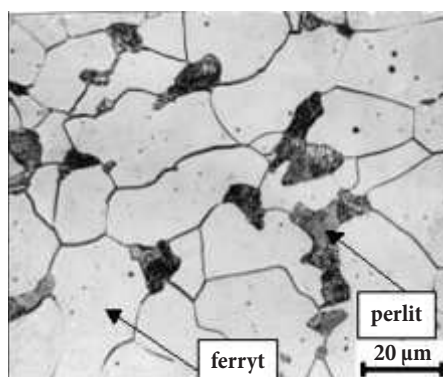
Gatunek	Skład chemiczny, % masowy (max)						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
ARMCO 2	0,01	0,1	*	0,01	0,008	0,03	0,03
	Cu	N	Al	Sn	Co	O	Mo
	0,03	0,006	0,005	0,01	**	**	0,02
ARMCO 4	0,01	0,06	*	0,005	0,003	0,03	0,03
	Cu	N	Al	Sn	Co	O	Mo
	0,03	0,005	0,005	0,05	0,005	**	0,02



Rys. 6. Mikrostruktura żelaza Armco. Trawiono nitalem. Twardość 80 HB

Przykładową mikrostrukturę przedstawia Rys. 6. Mikrostruktura złożona jest z ziarn ferrytu o dość zróżnicowanych kształtach.

Zwiększenie zawartości węgla w stali powoduje widoczne zmiany zarówno właściwości mechanicznych jak i mikrostruktury. Na rys. 7 przedstawiono mikrostrukturę stali o za-



Rys. 7. Mikrostruktura stali o zawartości węgla 0,1%. Twardość ok. 98 HB. Obróbka cieplna: nagrzanie do 930°C, wytrzymanie 0,5 h, chłodzenie w powietrzu Trawiono nitalem. Pow. 380x [4]

# S33

Rozsądna propozycja cenowa  
dla indywidualnych wymagań.

**MACH-TOOL  
Poznań**

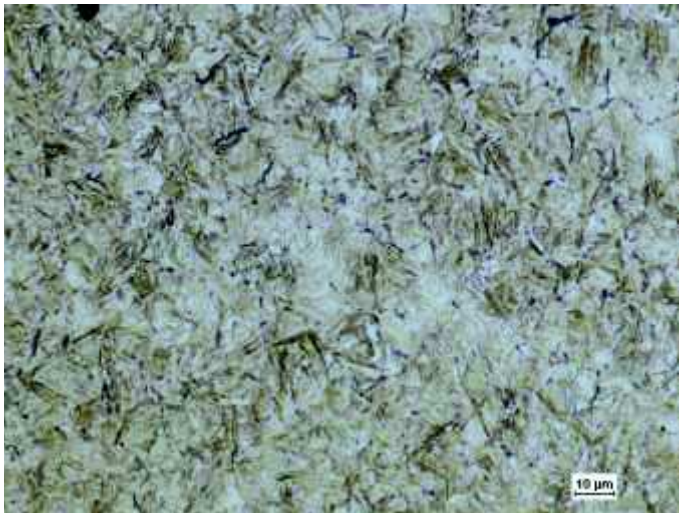
9-12 czerwca 2015  
Paw.7A stoisko 15



Jeśli szukacie Państwo perspektywicznej oferty, szlifierka S33 zaskoczy Was swą uniwersalnością i elastycznością: może być przebrojona z wersji szlifowania w kłach na uchwyt w rekordowym czasie poniżej 2 minut. Może szlifować detale o dużym stopniu złożoności w jednym zamocowaniu, przy maksymalnym zasięgu roboczym każdej ze ściernic w przestrzeni pomiędzy kłami. Wynika to ze sposobu skonfigurowania obu ściernic do wałków, napędzanych niezależnymi elektowrzecionami.

[www.studer.com](http://www.studer.com) – «The Art of Grinding.»

**STUDER**  
KÖRBER SOLUTIONS



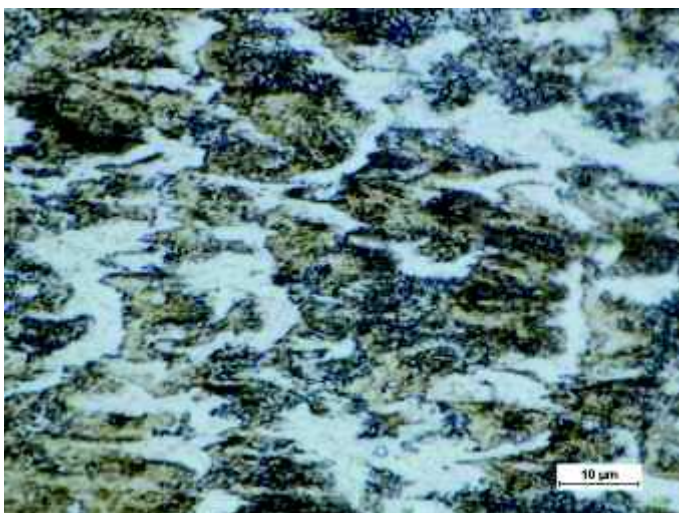
Rys. 8. Mikrostruktura stali niestopowej hartowanej o zawartości ok. 0,1% C. Obróbka cieplna: Nagrzewanie do temperatury 930°C, wytrzymanie 0,5h, chłodzenie w wodzie Twardość ok. 280 HV5. Trawiono nitałem

wartości 0,1% C w stanie normalizowanym. Stal ta cechuje się małą twardością i stosunkowo małą granicą plastyczności wynoszącą ok. 190 MPa. Mikrostruktura stali w tym stanie złożona jest z ziaren ferrytu i niewielkich kolonii perlitu. Mikrostruktura charakterystyczna np. dla stali S185 (PN-EN 10025-2).

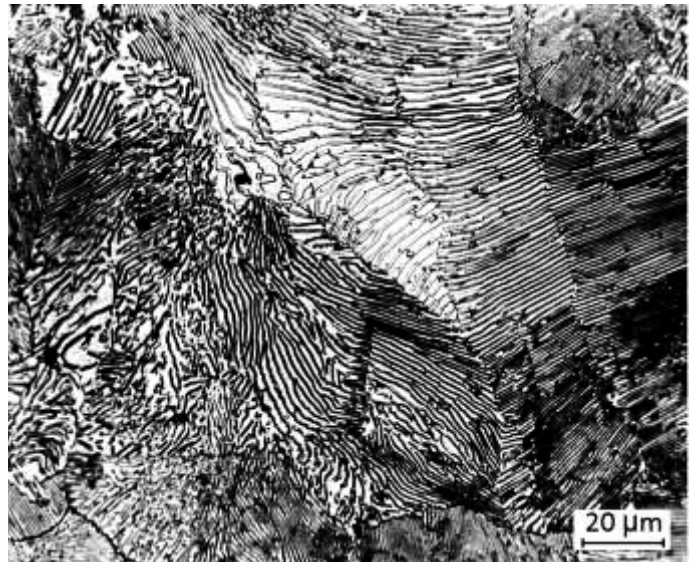
Szybkie chłodzenie z temperatury austynityzacji powoduje powstanie mikrostruktury nierównowagowej iglastej (martenzytycznej), której przykład przedstawiono na rys. 8.

Dalsze zwiększanie zawartości węgla w stali powoduje zwiększenie udziału względnego perlitu oraz twardości. Przy zawartości ok. 0,47% C w stanie zbliżonym do równowagowego obserwuje się znacznie większy udział perlitu w mikrostrukturze, w porównaniu do jego udziału w stali o mniejszej zawartości węgla. Zilustrowano to na przykładzie stali C45 (rys. 9) w postaci prętów walcowanych o średnicy 16 mm.

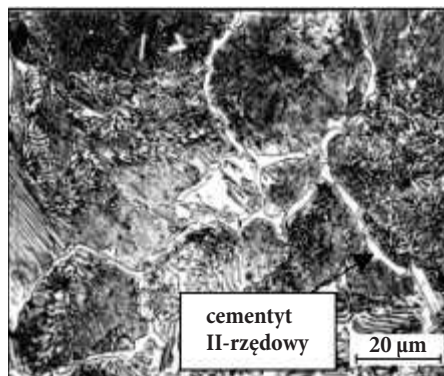
W stali o składzie eutektoidalnym (ok. 0,8% C) w stanie normalizowanym w mikrostrukturze występuje wyłącznie



Rys. 9. Mikrostruktura stali niestopowej walcowanej na gorąco o zawartości ok. 0,46% C. Twardość 196 HV5. Powierzchnia szlifu prostopadła do osi pręta. Trawiono nitałem



Rys. 10. Mikrostruktura stali niestopowej o zawartości ok. 0,8% C. Obróbka cieplna: Nagrzewanie do temperatury 770°C, wytrzymanie 0,5h, chłodzenie w spokojnym powietrzu Twardość stali wynosi ok. 216 HB. Trawiono nitałem [4]



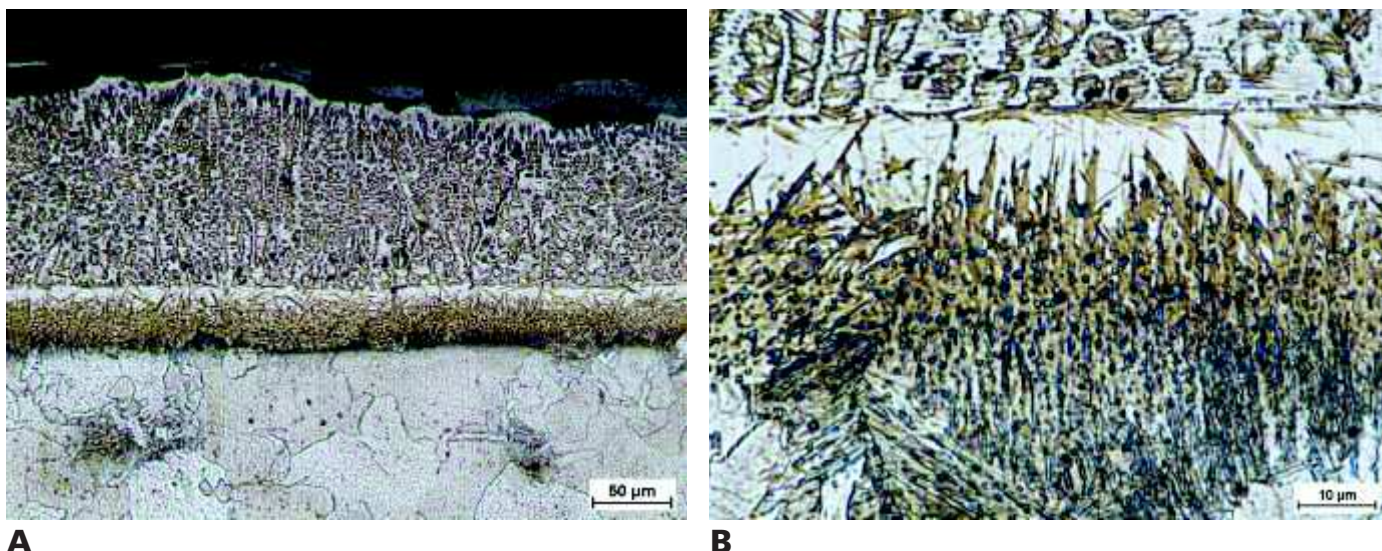
Rys. 11. Mikrostruktura stali nadeutektoidalnej o zawartości węgla 1,08%, Twardość 238 HB. Trawiono nitałem [4]

perlit, co pokazano na rysunku 10 na przykładzie stali narzędziowej N8 (zgodnie z nieaktualną już normą PN-66/H-85020). Po obróbce cieplnej hartowania i odpuszczania stal ta jest chętnie stosowana na narzędzia np. do obróbki kamienia i drewna oraz na młotki i wykrojniki.

Zwiększenie zawartości węgla powyżej 0,8% powoduje, że stal w stanie zbliżonym do równowagowego – np. po nagrzaniu do temperatury 30–50°C powyżej temperatury  $A_m$  (linia S-E) w układzie żelazo cementyt i powolnym studzeniu z piecem w ujawnionej mikrostrukturze można dostrzec charakterystyczną białą siatkę  $Fe_3C$  wokół ziarn perlitu. Przykładową mikrostrukturę stali N11E (wg PN-66/H-85020) o zawartości węgla 1,08% C przedstawiono na rys. 11.

Nietypowe mikrostruktury stopów żelaza z węglem przy zmiennej zawartości węgla oraz dużej prędkości chłodzenia można uzyskać np. przy stosowaniu technologii laserowych. Przykładem może być np. mikrostruktura powstała w wąskiej warstwie na podłożu z żelaza ARMCO, którego powierzchnia została pokryta cienką warstwą sproszkowanego grafitu i przetopiona wiązką lasera. Oprócz mikrostruktury typowej dla żeliw – górna część fotografii 12a

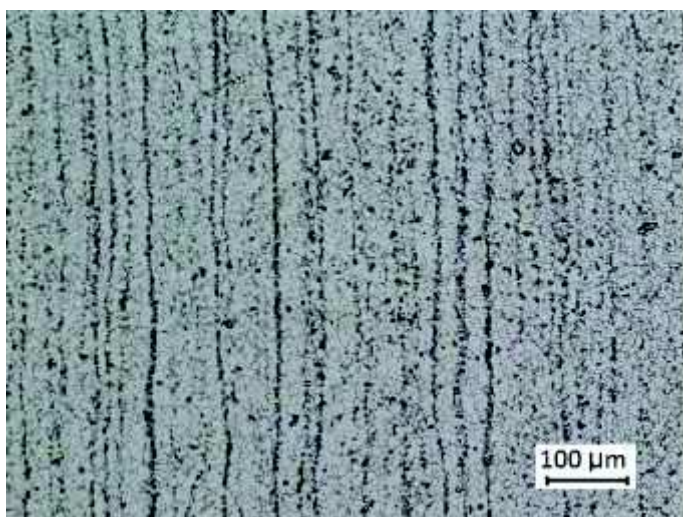




Rys. 12. Mikrostruktura warstw powstałych na płycie żelaza ARMCO po przetopie wiązką lasera w obecności proszku grafitowego. Trawiono nitałem. a) widok ogólny powstałych warstw i nienaruszonego podłoża; b) widok szczegółowy warstwy martenzytycznej i martenzytyczno-bainitycznej z rys. a

występują mikrostruktury mieszane w jej środkowej części. Mikrostrukturę martenzytyczną, martenzytyczno-bainityczną i bainityczną (bainit dolny) przy dużym powiększeniu przedstawiono na rys. 12b.

Obróbka plastyczna pozostawia w mikrostrukturze ślady w postaci wyraźnego ukierunkowania składników mikrostruktury. Przykładowy efekt wpływu obróbki plastycznej na ukształtowanie mikrostruktury blachy grubej o grubości 12 mm ze stali o zawartości węgla 0,11% walcowanej na gorąco i następnym chłodzeniu po obróbce w spokojnym powietrzu przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13. Mikrostruktura blachy grubej (12 mm) ze stali o zawartości węgla 0,11% po regulowanym walcowaniu. Trawiono nitałem

## Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wykresów (rys. 1–5) można stwierdzić, że zwiększanie zawartości węgla w stali niestopowej w każdym wypadku skutkuje wzrostem właściwości wytrzymałościowych i obniżeniem właściwości

plastycznych. Mikrostruktura stali niestopowej podeutektoidalnej w stanie zbliżonym do stanu równowagi cechuje się tym, że podniesienie zawartości węgla zwiększa udział objętościowy perlitu kosztem udziału fazy ferrytycznej (rys. 6, 7, 9), przy zawartości ok. 0,8% w mikrostrukturze stali normalizowanej występuje wyłącznie perlit (rys. 10). Dalszy wzrost zawartości – węgla powyżej 0,8% C – prowadzi do pojawienia się w stali w stanie zbliżonym do stanu równowagi charakterystycznej siatki cementytu drugorzędowego (rys. 11), nb. mikrostruktura b. niekorzystna z punktu widzenia odporności na obciążenia dynamiczne.

Dostatecznie szybkie chłodzenie stali niestopowej z zakresu temperatury występowania mikrostruktury austenicznej prowadzi do powstania mikrostruktury nierównowagowej martenzytycznej, martenzytyczno-bainitycznej lub bainitycznej (rys. 8 i 12), a w przypadku przetopu stali w obecności dużej ilości węgla również do powstania mikrostruktury typowej dla żeliw (rys. 12 a i b). Obróbka plastyczna jak np. walcowanie pozostawia w mikrostrukturze stali ślady w postaci wyraźnego ukierunkowania mikrostruktury (tekstury) (rys. 9 i 13), co w wynikach badań przejawia się w anizotropii właściwości mechanicznych.

## Literatura

- [1] Malkiewicz T.: Metaloznawstwo stopów żelaza. PWN, Warszawa-Kraków, 1976, wydanie III.
- [2] Przybyłowicz K.: Metaloznawstwo. WNT, Warszawa, 1999, wydanie VI.
- [3] Charakterystyki stali, Instytut Metalurgii Żelaza, Wydawnictwo ŚLĄSK Katowice, Katowice 1987.
- [4] Bolanowski K.: Preparatyka w badaniach metalograficznych. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Monografie, Studia, Rozprawy Nr 22, Kielce 2000.
- [5] Źródło internetowe: <http://www.jacek-boron.de/armco.html>