

Łucja Cieślak, Jadwiga Tyrlik-Held  
Instytut Metaloznawstwa i Spawalnictwa  
Politechniki Śląskiej

### KORELACJA MIĘDZY PRĘDKOŚCIĄ ODKSZTAŁCENIA A WŁASNOŚCIAMI WYTRZYMAŁOŚCIOWYMI I STRUKTURĄ STALI D75A PO RÓŻNYCH ZABIEGACH OBRÓBKII CIEPLNEJ

**Streszczenie.** Zbadano wpływ prędkości odkształcenia w zakresie od  $\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$  do  $\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$  na granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie oraz substrukturę stali o zawartości 0,75%C. Badania przeprowadzono dla struktur po wyżarzeniu konwencjonalnym i indukcyjnym. Stwierdzono, że ze zwiększeniem prędkości odkształcenia następuje wzrost naprężeń, przy czym granica plastyczności wykazuje większą wrażliwość na zmiany prędkości odkształcenia niż wytrzymałość na rozciąganie.

#### Wstęp

Prędkość odkształcenia wywiera istotny wpływ na własności mechaniczne oraz strukturę metali i stopów. Własności mechaniczne określone są tu jako naprężenie płynięcia, odpowiadające granicy plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie. Wartość naprężeń  $\sigma$  zależy głównie od prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}$  [1-6], względnego odkształcenia plastycznego  $\epsilon$  i temperatury odkształcania  $T$ . Wpływ tych czynników ujmuje równanie (1) podane przez Nadai [1]:

$$d\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\epsilon}} d\dot{\epsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial\epsilon} d\epsilon + \frac{\partial\sigma}{\partial T} dT \quad (1)$$

Wartość naprężeń w czasie odkształcenia z różnymi prędkościami zależy także od struktury wyjściowej materiału. Dla ustalenia wpływu prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}$  ma własności wytrzymałościowe stali D75A wykorzystano wyniki przeprowadzonych prób rozciągania. Określano granicę plastyczności  $R_{0,2}$  i wytrzymałość na rozciąganie w zależności od stosowanej prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}$  z równoczesnym uwzględnieniem wpływu struktury wyjściowej materiału. Zbadano także zmiany w substrukturze ferrytu, spowodowane odkształceniem plastycznym z różnymi prędkościami.

Badania własneMateriał do badań i obróbka cieplna wstępna

Badania przeprowadzono na stali D75A stosowanej do produkcji drutów patentowanych. Skład chemiczny stali podano w tablicy 1.

Tablica 1

Skład chemiczny badanej stali

Gatunek stali	Skład chemiczny badanej stali w %						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
D75A	0,69	0,45	0,21	0,13	0,22	0,008	0,03

Stal dostarczona była w postaci drutu o średnicy 1,5 mm po gnioście 75%. Obróbka cieplna obejmowała:

- wyżarzanie normalizujące konwencjonalne w temperaturze 800°C /0,5h/ powietrze, w celu uzyskania struktury perlitu z niewielką ilością drobnych ziarn ferrytu,
- wyżarzanie sferoidyzujące konwencjonalne w temperaturze 680°C /4h/ powietrze, celem uzyskania sferoidalnej postaci cementytu w osnowie ferrytu; średnica uzyskanych sferoidów wynosiła ok. 2 μm,
- wyżarzanie sferoidyzujące udarowe w temperaturze 730°C, w celu uzyskania bardzo drobnych wydzieleni sferoidalnych cementytu w osnowie ferrytu; sferoidy posiadały średnicę ok. 0,5 μm.

Własności stali po wstępnej obróbce cieplnej przedstawiono w tablicy 2

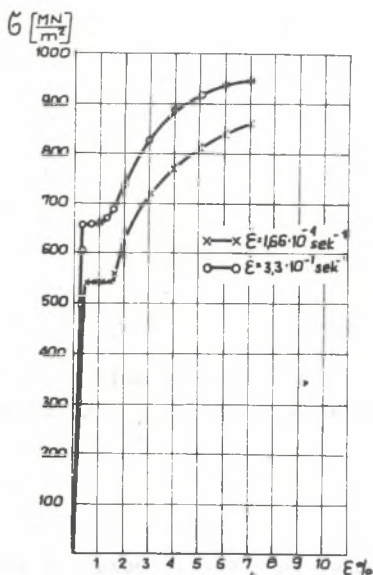
Tablica 2

Własności stali D75A po wstępnej obróbce cieplnej

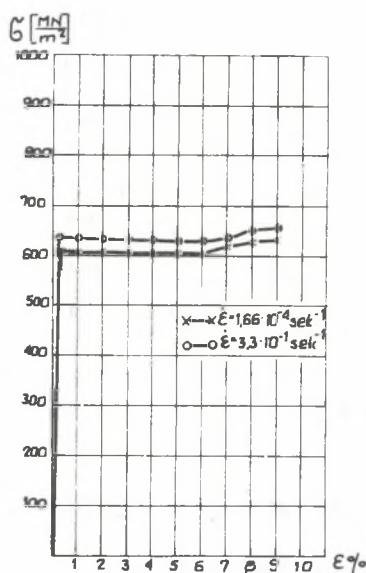
Wstępna obróbka cieplna	R <sub>0,2</sub> MN/m <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> MN/m <sup>2</sup>	A <sub>10</sub> %	HV
Wyżarzanie konwencjonalne w temperaturze 800°C	610	885	20	247
Wyżarzanie sferoidyzujące konwencjonalne w temperaturze 680°C	630	662,5	26,5	211
Wyżarzanie sferoidyzujące udarowe w temperaturze 730°C	662	878	23	266

Przebieg badań

Wpływ prędkości odkształcania i struktury na własności mechaniczne określono na podstawie próby rozciągania z prędkościami  $\dot{\epsilon}$  w zakresie od  $1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$  do  $3,3 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$ . Próby rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON TT-K MODELL 1126 rejestrując zależ-

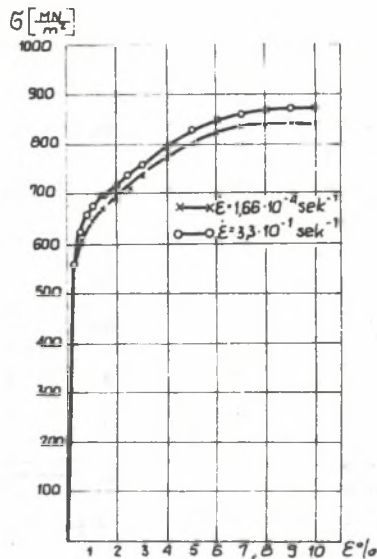


Rys. 1. Krzywe  $\sigma = f(\epsilon)$  stali D75A odkształcanej z prędkościami  $\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$  i  $\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$  po wyżarzeniu normalizującym



Rys. 2. Krzywe  $\sigma = f(\epsilon)$  stali D75A odkształcanej z prędkościami  $\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$  i  $\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$  po wyżarzeniu sferoidyzującym konwencjonalnym

ności obciążenia od czasu. Zastosowanie ekstensometru typu G-51-16MA pozwoliło na dodatkową rejestrację zależności wydłużenia w funkcji czasu. Umożliwiło to zbudowanie wykresów w układzie naprężenie - odkształcenie (rys. 1÷3) oraz dokładne wyznaczenie granicy plastyczności. Badania struktur przeprowadzono na mikroskopie świetlnym Neophot 1 przy powiększeniu 1000x oraz techniką obserwacji struktur cienkich folii w transmisyjnym mikroskopie elektronowym JEM 200B firmy JEOL przy napięciu anodowym 150 kV.

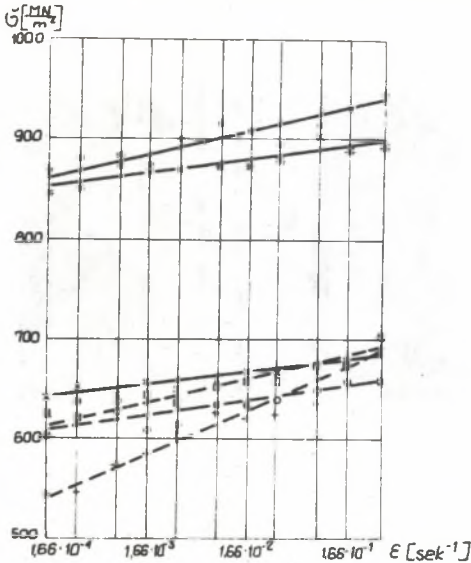


Rys. 3. Krzywe  $\sigma = f(\epsilon)$  stali D75A odkształcanej z prędkościami  $\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$  i  $\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$  po wyżarzaniu sferoidyzującym indukcyjnym

#### Wyniki badań i ich dyskusja

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że prędkość odkształcenia wywiera istotny wpływ na własności wytrzymałościowe oraz strukturę dyslokacyjną stali D75A. Ze wzrostem wartości  $\dot{\epsilon}$  zwiększa się granica plastyczności  $R_{0,2}$  i wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , niezależnie od struktury wyjściowej próbki. Zależności te w układzie półlogarytmicznym  $R_{0,2} - \log \dot{\epsilon}$  i  $R_m - \log \dot{\epsilon}$  opisane są liniami prostymi o różnym tangensie kąta nachylenia (rys. 4).

Zmiana  $\dot{\epsilon}$  wywiera większy wpływ na wzrost naprężeń odpowiadających granicy plastyczności  $R_{0,2}$  niż wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ . Wzrost ten jest różny dla poszczególnych struktur wyjściowych materiału i jest największy dla struktur perlitycznych. Tablica 3 podaje procentowy przyrost granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w zakresie prędkości odkształcenia od  $\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$  do  $\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$  dla trzech badanych struktur wyjściowych stali. Fakt, że w strukturze perlitycznej występuje największy wzrost naprężeń spowodowany zwiększaniem prędkości odkształcenia można wyjaśnić obecnością płytkowych wydzieleni cementytu. Hamują one bardziej skutecznie ruch dyslokacji niż wydzielenia sferoidalne, które mogą być omijane przez poruszające się dyslokacje.



Rys. 4. Zależność  $R_{0,2}$  i  $R_m$  od  $\dot{\epsilon}$  dla stali D75A po:

- wyżarzaniu normalizującym

$$R_{0,2} = f(\dot{\epsilon}) \text{ +-----+}$$

$$R_m = f(\dot{\epsilon}) \text{ o-----o}$$

- wyżarzaniu sferoidyzującym konwencjonalnym

$$R_{0,2} = f(\dot{\epsilon}) \text{ o-----o}$$

$$R_m = f(\dot{\epsilon}) \text{ x-----x}$$

- wyżarzaniu sferoidyzującym indukcyjnym

$$R_{0,2} = f(\dot{\epsilon}) \text{ o-----o}$$

$$R_m = f(\dot{\epsilon}) \text{ *-----*}$$

nych ferrytu. W stali odkształconej z dużymi prędkościami tworzą się trwałe konfiguracje dyslokacji o ograniczonej zdolności do ruchu, co prowadzi do wzrostu naprężenia płynięcia (rys. 1).

Odształcanie struktury ferrytu z sferoidalnymi wydzieleniami cementytu z prędkością  $\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$  powoduje utworzenie wyraźnej blokowej struktury osnowy (rys. 8). Występujące w strukturze wyraźne subziarna świadczą o przebiegu poligonizacji dynamicznej. Wewnątrz utworzonych bloków obserwuje się stosunkowo małą liczbę dyslokacji. Natomiast przy odkształcaniu z prędkością  $\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$  następuje znacznie większy wzrost gęstości dyslokacji oraz utworzenie słabo wykształconej komórkowej struktury dyslokacyjnej (rys. 9). W pobliżu sferoidalnych wydzieleni cementytu na granicach międzyfazowych występują spiętrzenia przemieszczających się dyslokacji.

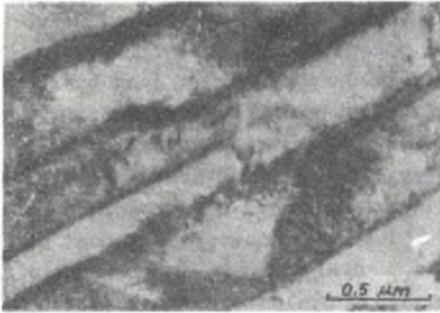
Głównym czynnikiem decydującym o zależności naprężeń w funkcji prędkości odkształcenia jest ferrytyczna struktura osnowy. Ferryt jest bowiem składnikiem strukturalnym wrażliwym na zmiany prędkości odkształcenia.

W wyjściowej strukturze perlitycznej odkształconej z prędkością  $\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$  następuje wzrost gęstości dyslokacji w ferrycie (rys. 5,6). Dyslokacje rozmieszczone są przed granicami międzyfazowymi oraz w postaci splotów na granicach komórek. W ferrycie obserwuje się dość wyraźną komórkową strukturę dyslokacyjną.

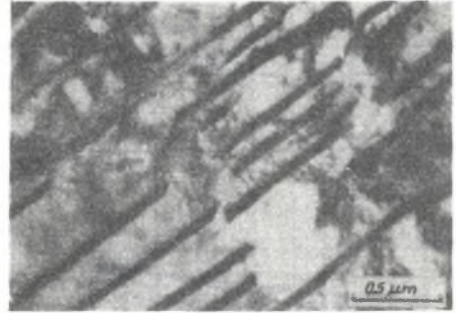
Podczas odkształcenia plastycznego płytki cementytu wyginają się (rys. 5), a przy dostatecznie dużej wartości naprężeń ulegają fragmentacji (rys. 6). Sprzyja to dalszemu przebiegowi odkształcenia także między fragmentami płytek.

Duże prędkości odkształcenia struktury perlitycznej prowadzą do wydatnego wzrostu gęstości dyslokacji i utworzenia słabo wykształconej komórkowej struktury dyslokacyjnej (rys. 7). Przed płytkami cementytu powstają spiętrzenia dyslokacji w dość szerokich obszarach przygranicz-

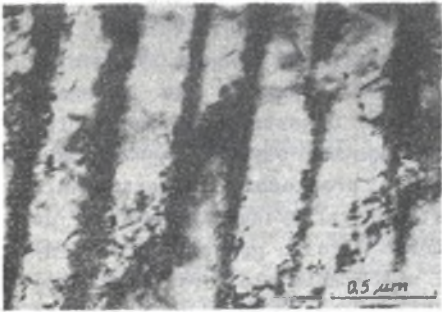




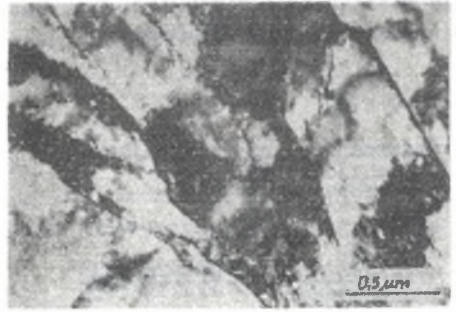
Rys. 5



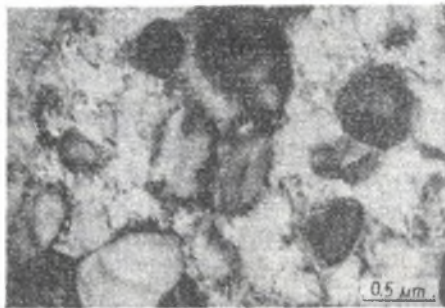
Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8



Rys. 9

Nr rys.	Prędkość odkształcenia	Obróbka cieplna	Struktura
5.	$\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{sek}^{-1}$	Wyżarzanie normalizujące w temperaturze 800°C	Wygięte płytki cementytu w osnowie ferrytu o stosunkowo małej gęstości dyslokacji
6.	$\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{sek}^{-1}$	Wyżarzanie normalizujące w temperaturze 800°C	Sfragmentowane płytki cementytu w osnowie ferrytu o komórkowej strukturze dyslokacyjnej
7.	$\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{sek}^{-1}$	Wyżarzanie normalizujące konwencjonalne w temperaturze 800°C	Układy spiętrzonych dyslokacji zarówno przed płytkami cementytu jak i między nimi
8.	$\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{sek}^{-1}$	Wyżarzanie sferoidyzujące indukcyjne w temperaturze 730°C	Widoczne subziarna ferrytu. Wewnątrz subziarn niewielka ilość dyslokacji
9.	$\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{sek}^{-1}$	Wyżarzanie sferoidyzujące indukcyjne w temperaturze 730°C	W osnowie ferrytu duża gęstość dyslokacji. Spiętrzenia dyslokacji, na granicach ferryt - cementyt

Tablica 3

Wpływ szybkości odkształcenia na granicę plastyczności i granicę wytrzymałości po różnych zabiegach obróbki cieplnej

		O b r ó b k a c i e p l n a w s t ę p n a		
		Wyżarzanie normalizujące konwencjonalne w temperaturze 800 °C	Wyżarzanie sferoidalizujące konwencjonalne w temperaturze 680 °C	Wyżarzanie sferoidalizujące indukcyjne w temperaturze 730 °C
$R_{0,2}$	$= 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$	545	615	625
	$= 3,33 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$	690	664	700
$R_{0,2} \text{ MN/m}^2$		145	49	75
Procent wzrostu granicy plastyczności $R_{0,2}$		26%	8%	12%
$R_m$	$= 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$	860	648	845
	$= 3,33 \cdot 10^{-1} \text{ sek}^{-1}$	945	682	895
$R_m \text{ MN/m}^2$		85	34	50
Procent wzrostu granicy wytrzymałości $R_m$		10,0%	5,2%	5,9%



Tak więc wzrost naprężeń przy zwiększającej się prędkości odkształcenia zależy od gęstości dyslokacji, a także od hamującego działania wydzielenń cementytu. Ważną rolę odgrywają także procesy aktywowane cieplnie, które przebiegają znacznie trudniej przy dużych prędkościach odkształcenia. Skutkiem tego tworzą się trwałe konfiguracje dyslokacji o małej ruchliwości. Zachodzi więc konieczność przyłożenia znacznie większych wartości naprężeń w celu umożliwienia dalszego przebiegu odkształcenia.

### Wnioski

Wzrost prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}$  powoduje zwiększenie wartości granicy plastyczności  $R_{0,2}$  i wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ , niezależnie od struktury wyjściowej stali D75A, przy czym większy wpływ wywiera prędkość odkształcenia na granicę plastyczności niż na wytrzymałość na rozciąganie

Struktura stali decyduje o jej wrażliwości na prędkość odkształcenia, a także o umocnieniu; największą wrażliwość i największy stopień umocnienia wykazuje struktura perlityczna, następnie sferoidyt o średnicy cząstek cementytu ok.  $0,5 \mu\text{m}$  i wreszcie sferoidyt o średnicy ok.  $2 \mu\text{m}$ .

Większy wzrost wartości naprężenia płynięcia stali odkształcanej plastycznie z prędkością  $\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{sek}^{-1}$  niż odkształcanej z prędkością  $\dot{\epsilon} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{sek}^{-1}$  jest wynikiem wydatnego wzrostu gęstości dyslokacji i ograniczenia przebiegu procesów aktywowanych cieplnie.

### LITERATURA

- [1] Wantuchowski J. - Arch.Hutn., 1, 1957, 5.
- [2] Bernsztajn M.L., Zajmowski W.A. - Struktura i własności mechaniczne metali, WNT Warszawa 1973.
- [3] Baron H.G. - Metal Treatment and Drop Forging 1, 1962, 25.
- [4] Błantier B.M., Błantier M.E. - Mistakł. i Term.Obr. Mistałków, 12, 1972, 58.
- [5] Marder A.R. - Trans. AIME, 245, 1969, 1337.
- [6] Hart E.W. - Acta Met., 15, 1967, 351.

КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ ДЕФОРМАЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ  
И СТРУКТУРОЙ СТАЛИ D75A ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРИЕМОМ ТЕРМООБРАБОТКИ

## Р е з ю м е

Исследовано влияние скорости деформации в диапазоне от  $\dot{\epsilon} = 1,06 \cdot 10^{-4} \text{сек}^{-1}$  до  $\dot{\epsilon} = 3,33 \cdot 10^{-1} \text{сек}^{-1}$  на предел пластичности, предел прочности и субструктуру стали содержащей 0,75% углерода. Исследования проведено на структурах после конвенционального и индукционного отжига. Потверждено, что одновременно с ростом скорости деформации происходит рост напряжений, но предел пластичности проявляет большую чувствительность на изменение скорости деформации чем предел прочности. Эта чувствительность зависит от структуры стал.

THE STRAIN-RATE CORRELATION BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE  
OF STEEL D75A AFTER DIFFERENT VARIANTS OF HEAT TREATMENT

## S u m m a r y

The strain-rate influence on yield stress, tensile strength and sub-structure of steel containing 0,75%C has been investigated. The investigations have been made on the steel structures after conventional and induction annealing. It has been found, that with the larger strain-rate value increases the stress. But the strain-rate sensitivity of the yield stress is bigger then the strain-rate sensitivity of the tensile strength and depends on the steel structure.