ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: HUTNICTWO z. 18 Nr kol. 606

Tadeusz LAMBER

Instytut Inżynierii Materiałowej
Politechnika Śląska

Bronisław HODERNY
IMŻ - Gliwice

Eugeniusz HADASIK

Instytut Inżynierii Materiałowej
Politechnika Śląska

# BADANIE NAPRĘŻENIA UPLASTYCZNIAJĄCEGO TYTANU I JEGO STOPÓW NA PODSTAWIE PLASTOMETRYCZNEJ PRÓBY SKRĘCANIA

Streszczenie. Za pomocą plastometrycznej próby skręcania wyznaczono zależności naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia dla tytanu i jego stopów w zakresie temperatur od 973 do 1373 K (700 do 1100°C) i prędkości odkształcenia od 0,2 do 25 $s^{-1}$. Określono zależność maksymalnych wartości naprężenia uplastyczniającego od temperatury i prędkości odkształcenia. Otrzymane wzory mogą służyć do obliczenia oporów odkształcenia przy kształtowaniu na gorąco tytanu i jego stopów.

## 1. WSTĘP

W różnych gałęziach przemysłu obserwuje się rosnące zapotrzebowanie na materiały z tytanu i jego stopów ze względu na ich dobre własności użytkowe. O strukturze i związanych z nią własnościach stopów tytanu decyduje kompleksowe oddziaływanie struktury wyjściowej oraz warunków nagrzewania i przeróbki plastycznej.

Do oceny plastyczności metali i stopów stosuje się metody plastometryczne, które umożliwiają określenie zmiany naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia, temperatury i prędkości odkształcenia. Znajomość tych zależności jest nieodzowna przy wprowadzaniu do produkcji w kraju stopów tytanu, dla których wykonanie badań w warunkach przemysłowych byłoby kosztowne i kłopotliwe.

W pracy przeprowadzono ocenę plastyczności tytanu i jego stopów w zakresie temperatur 973 do 1373 K i prędkości odkształcenia od 0,2 do 25 $s^{-1}$ za pomocą plastometrycznej próby skręcania.

## 2. BADANIA WŁASNE

Materiał do badań stanowiły pręty po przeróbce plastycznej i obróbce cieplnej o wymiarach Φ 14 do Φ 22 mm z tytanu WT1-0 (struktura α) i stopów - OT4 (pseudo α), WT3-1 oraz WT22 (struktura α + β), o składzie chemicznym przedstawionym w tablicy 1. Własności mechaniczne badanych materiałów, określone na podstawie statycznej próby rozciągania, zamieszczono w tablicy 2.

Tablica 1

Skład chemiczny badanych materiałów

| Lp. | Materiał | Zawartość pierwiastków stopowych w % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Fe | Al | Mn | Cr | V | Mo |
| 1 | WT1-0 | 0,07 | 0,26 | 0,01 | 0,007 | 0,1 | 0,01 |
| 2 | OT4 | 0,09 | 3,64 | 1,82 | 0,005 | - | 0,01 |
| 3 | WT3-1 | 0,37 | 6,02 | 0,01 | 1,43 | - | 2,22 |
| 4 | WT22 | 0,89 | 4,72 | 0,02 | 0,86 | 4,6 | 4,3 |

Tablica 2

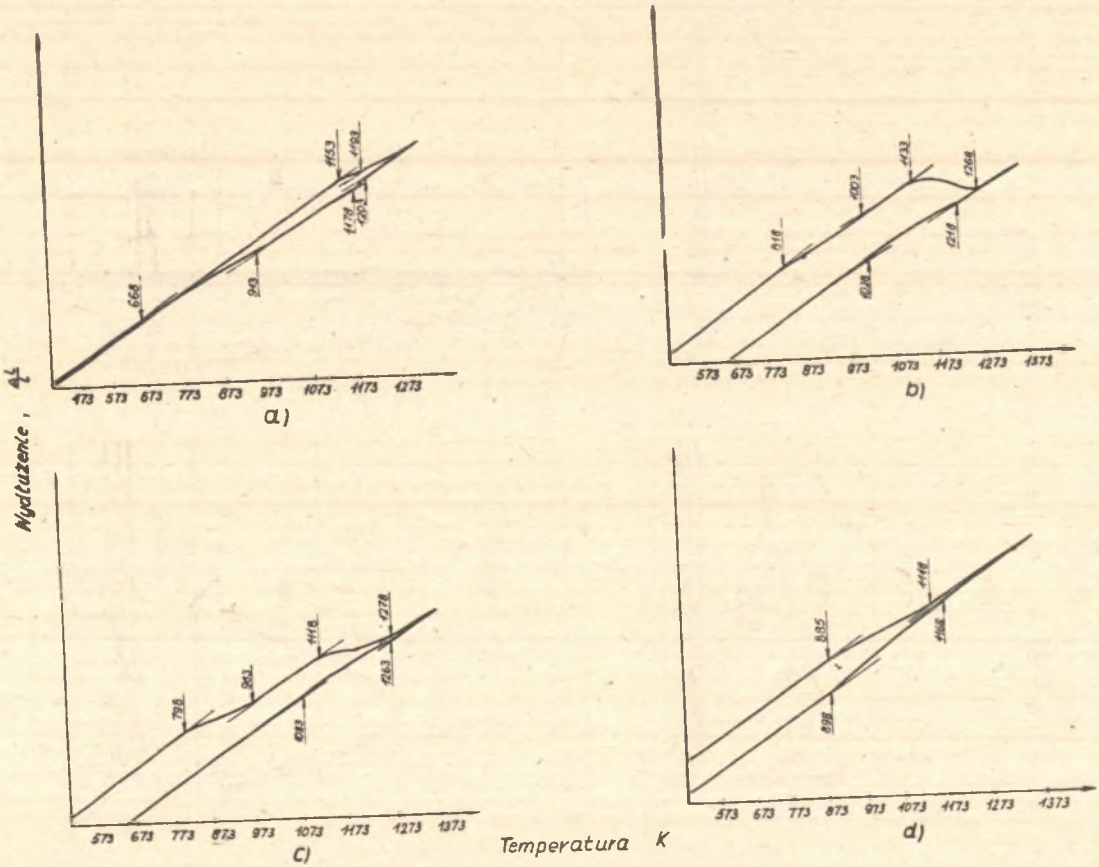
Własności mechaniczne badanych materiałów

| Lp. | Materiał | Granica plastyczności Re, MPa | Wytrzymałość na rozciąganie Rm, MPa | Wydłużenie $A_5$, % | Przewężenie Z, % |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | WT1-0 | 347 | 436 | 19,7 | 61,5 |
| 2 | OT4 | 740 | 748 | 10,5 | 56,4 |
| 3 | WT3-1 | 1016 | 1026 | 11,5 | 51,0 |
| 4 | WT22 | 918 | 936 | 10,9 | 46,5 |

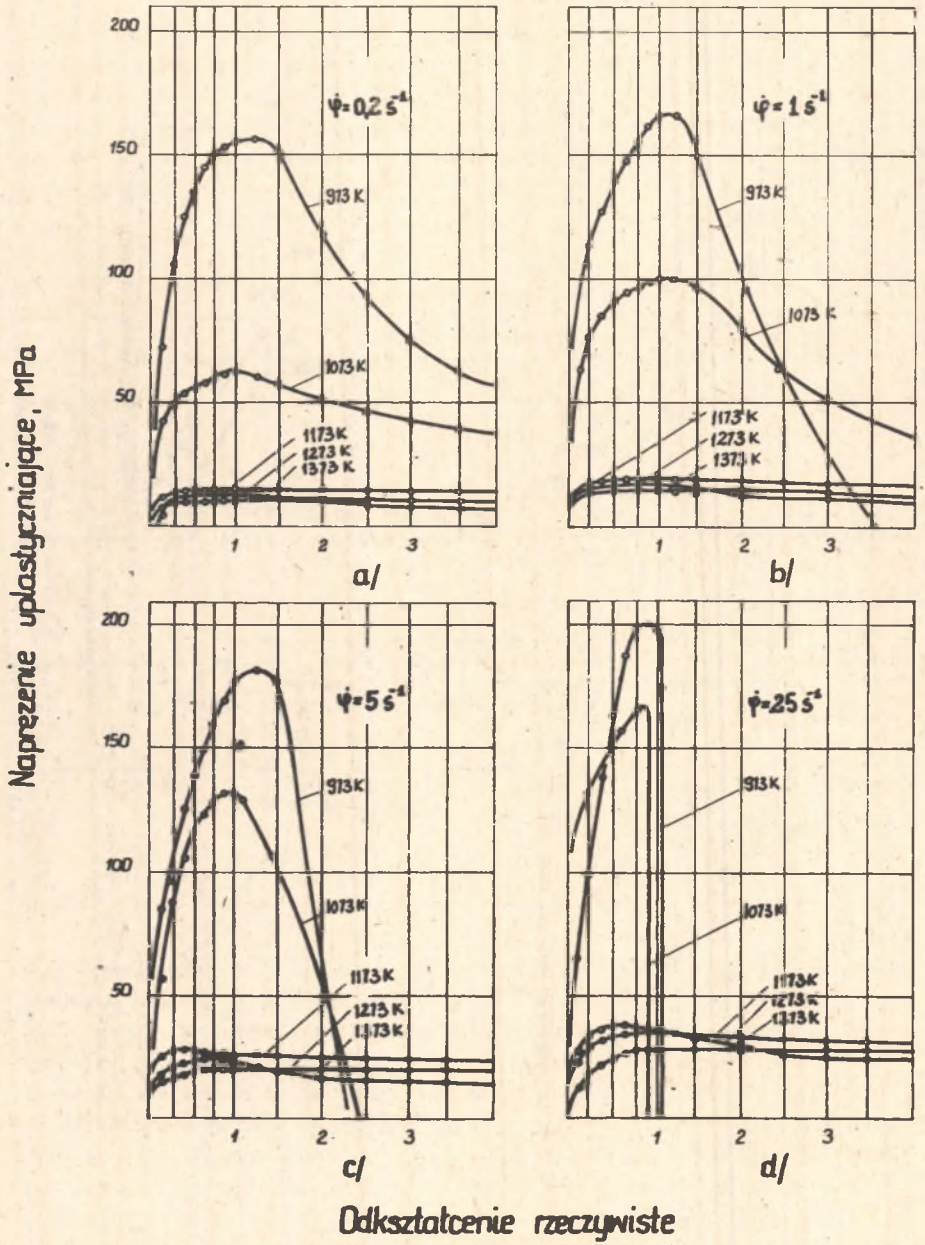
Dla badanych materiałów, w celu określenia zakresu temperatur przemian fazowych, wykonano badania dylatometryczne, przy prędkości nagrzewania ok. 350 K/godz. Otrzymane dylatogramy z zaznaczonymi temperaturami przemian fazowych przedstawiono na rys. 1.

Próbę skręcania prowadzono na plastometrze skrętnym, którego opis znajduje się w pracy [1], stosując próbki tzw. "krótkie" o długości pomiarowej l = 10 mm i średnicy d = 6 mm. Próbki skręcano w zakresie temperatur 973 do 1373 K, stopniowaną co 100 K, z prędkością odkształcenia $\dot{\varphi}$ równą 0,1, 1, 5 i 25 $s^{-1}$.

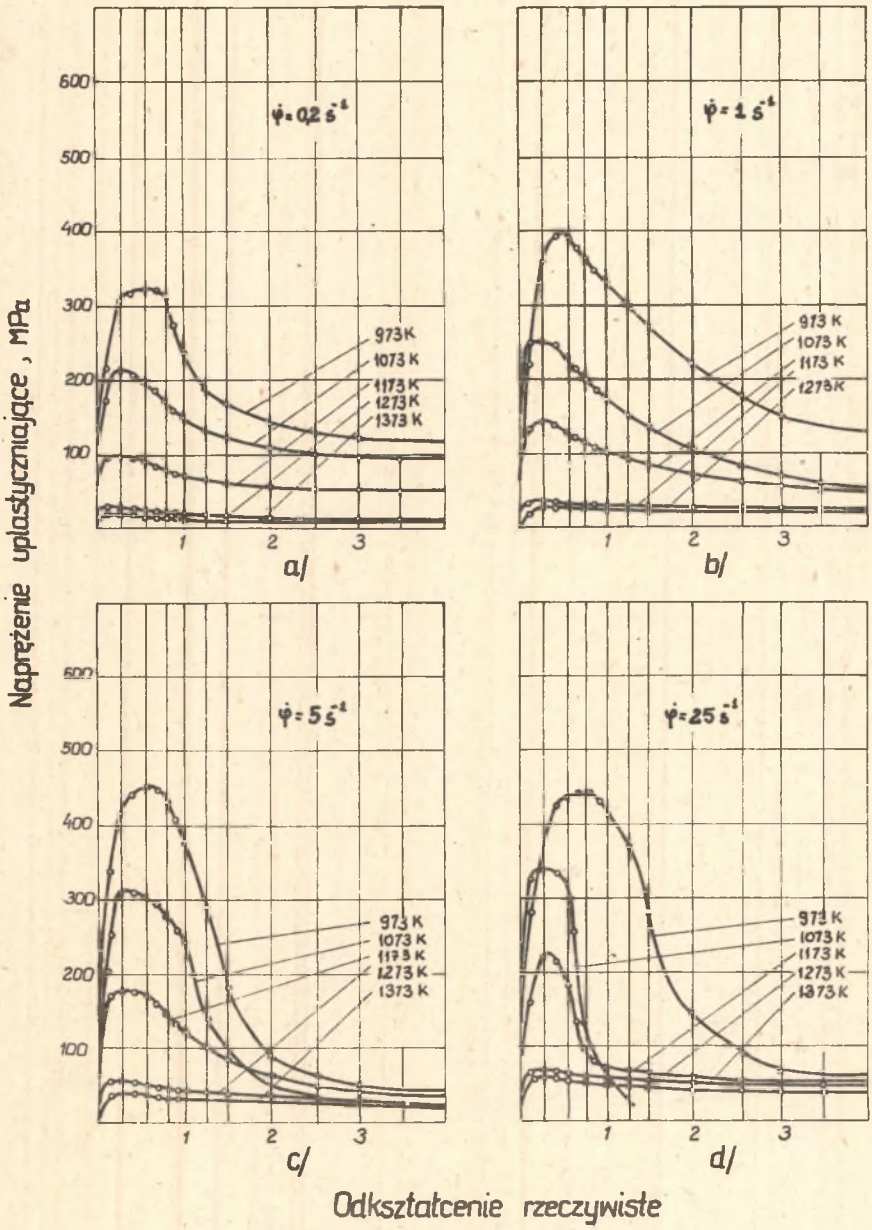
Wszystkie próby skręcania wykonano ze swobodną zmianą długości próbki (skręcanie swobodne), rejestrując zależności momentu skręcającego w funkcji liczby skręceń. Uzyskane wyniki przeliczono na naprężenie uplastycz-



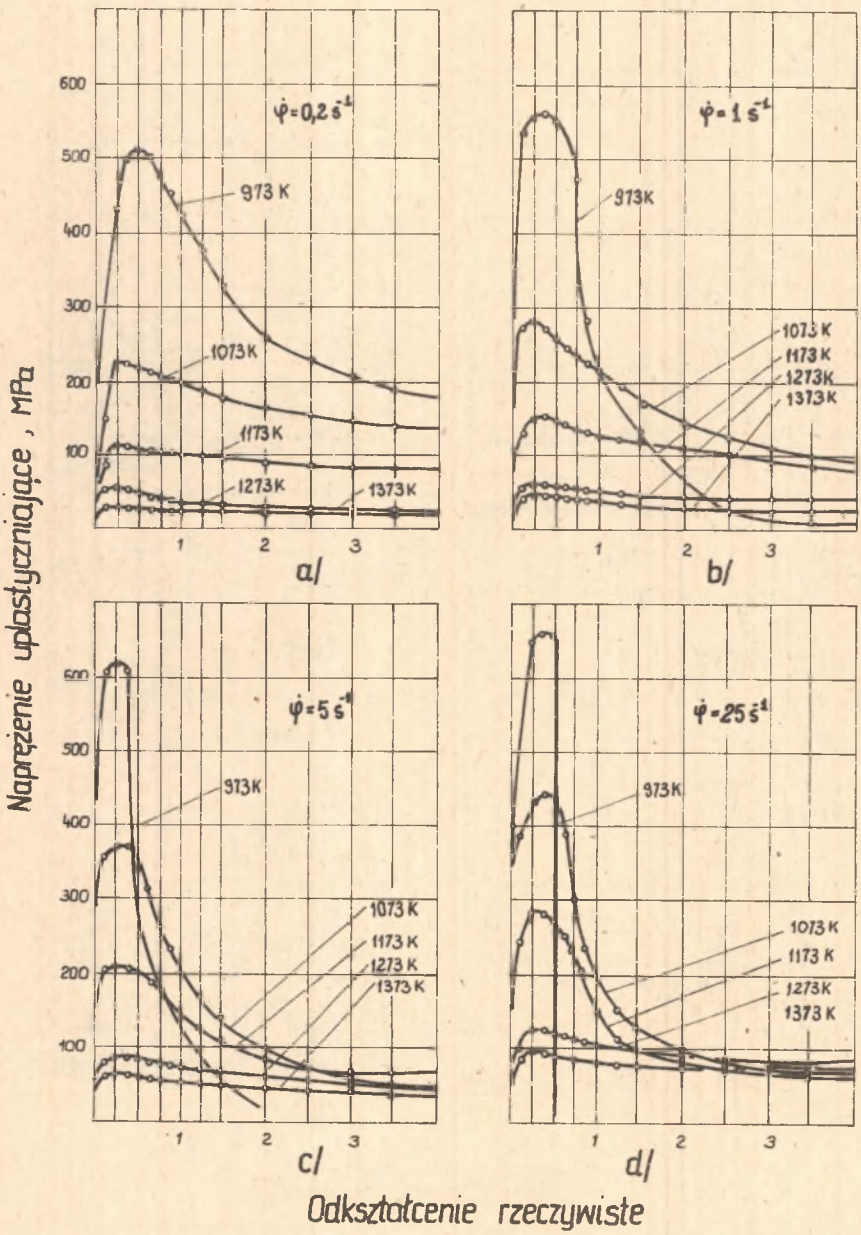

Rys. 1. Dylatogramy badanych materiałów
(a - WT1-0, b - OT4, c - WT3-1, d - WT22)



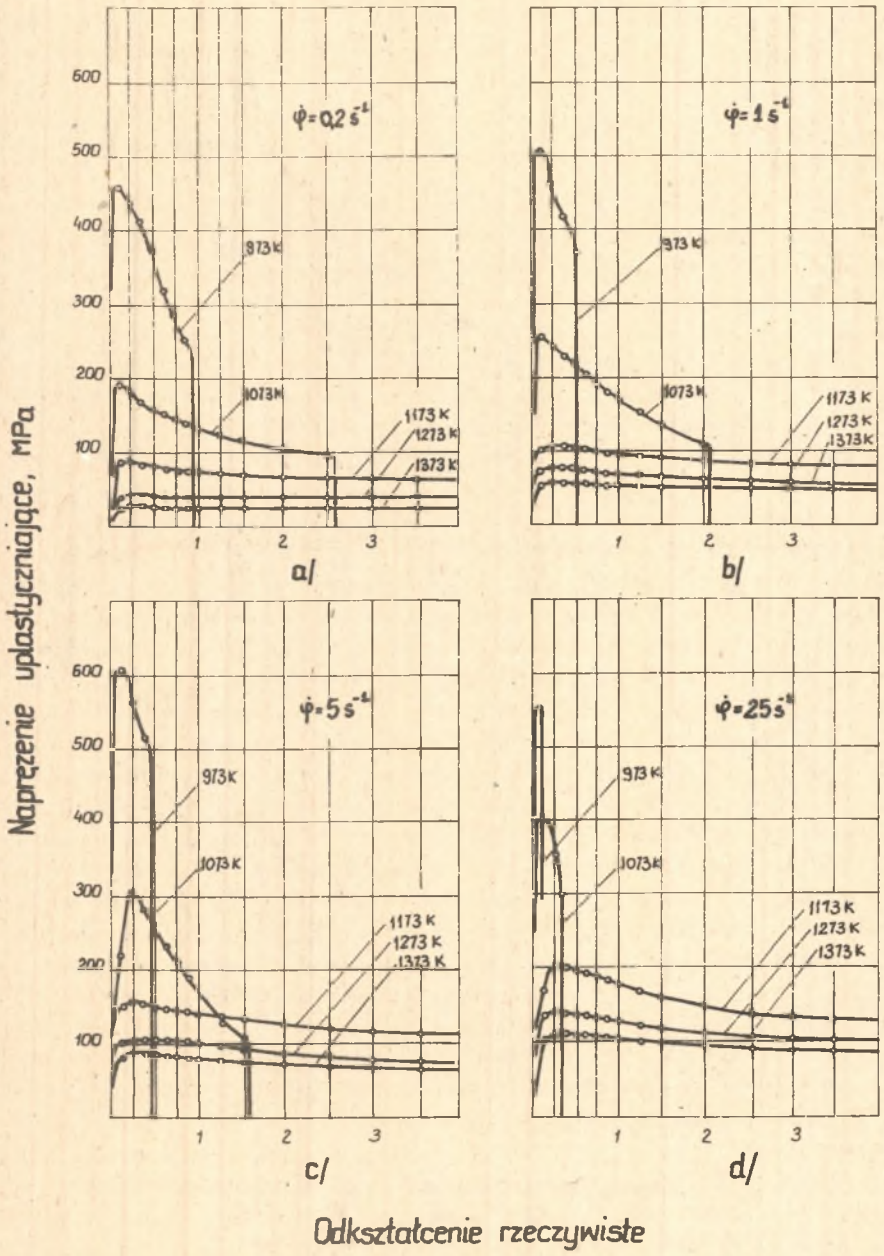

Rys. 2. Zależność naprężenia uplastyczniającego $\sigma_p$ od odkształcenia $\varphi$ tytanu WT1-0 dla różnych temperatur i prędkości odkształcenia ($a - \dot{\varphi} = 0,2\ s^{-1}$, $b - \dot{\varphi} = 1\ s^{-1}$, $c - \dot{\varphi} = 5\ s^{-1}$, $d - \dot{\varphi} = 25\ s^{-1}$)



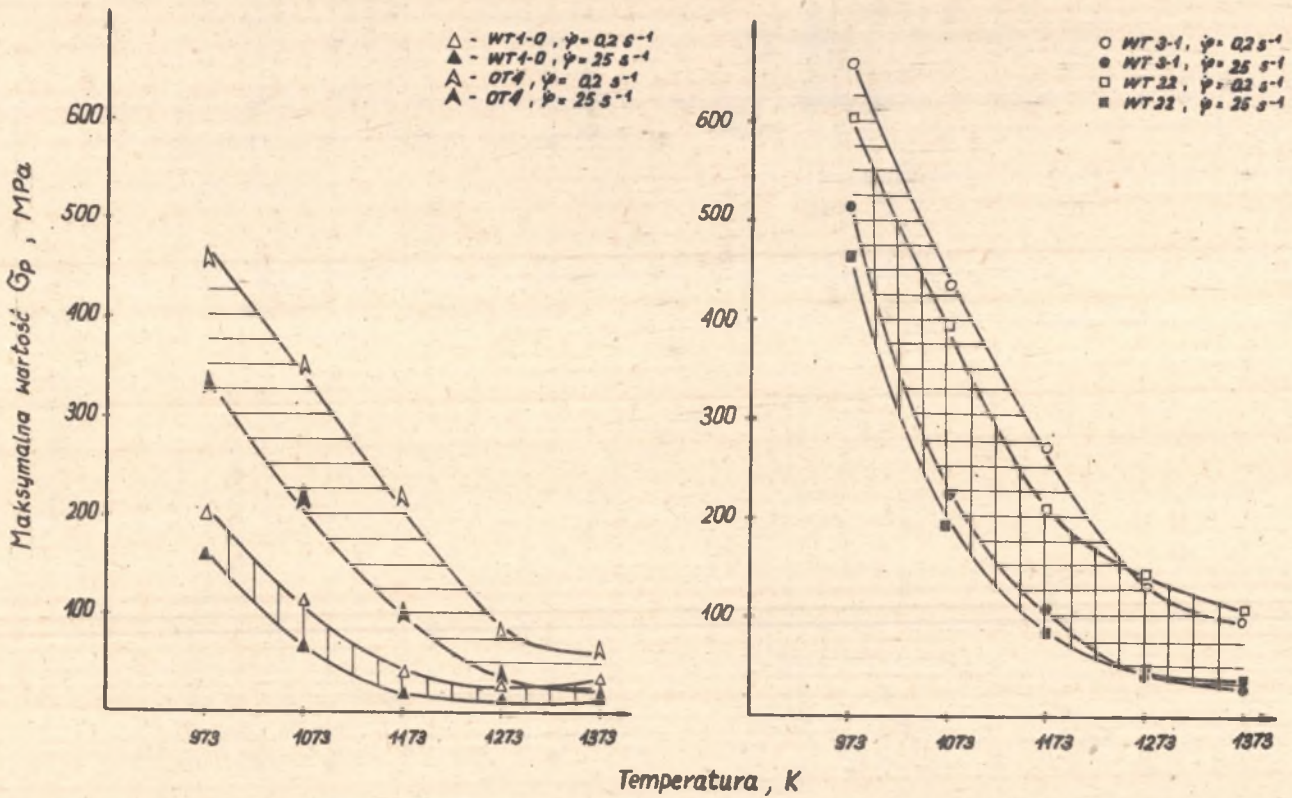

Rys. 3. Zależność naprężenia uplastyczniającego $\sigma_p$ od odkształcenia $\varphi$ stopu tytanu OT4 dla różnych temperatur i prędkości odkształcenia




Rys. 4. Zależność naprężenia uplastyczniającego $\sigma_p$ od odkształcenia $\varphi$ stopu tytanu WT3-1 dla różnych temperatur i prędkości odkształcenia




Rys. 5. Zależność naprężenia uplastyczniającego $\sigma_p$ od odkształcenia $\varphi$ stopu tytanu WT22 dla różnych temperatur i prędkości odkształcenia




Rys. 6. Zależność maksymalnych wartości naprężenia uplastyczniającego od temperatury i prędkości odkształcenia dla tytanu i jego stopów

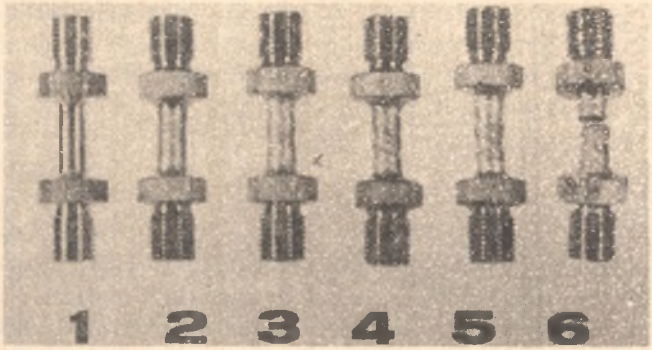
niające $\sigma_p$ i odkształcenie $\varphi$ [2]. Na ich podstawie sporządzono wykresy maksymalnych wartości naprężenia uplastyczniającego w zależności od temperatury i prędkości odkształcenia. Całość wyników z plastometrycznej próby skręcania przedstawiono na rys. 2 do 6.

## 3. ANALIZA WYNIKÓW

Przedstawione na rys. 1 dylatogramy wykazują charakterystyczne załamanie krzywej dylatometrycznej, co jak wiadomo na podstawie pracy [3] związane jest z wydzielaniem się fazy $\beta$. Zakres temperatur przemiany fazowej zależy od rodzaju badanego materiału, obejmuje niewielki przedział temperatur dla tytanu WT1-0 (1150 do 1200 K) i zwiększa się dla stopu o wyższej zawartości fazy $\beta$ w temperaturze otoczenia. Określone temperatury końca przemiany fazowej są zgodne z danymi literaturowymi [3].

Podstawą do oceny plastyczności tytanu i jego stopów są krzywe zależności naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia, temperatury i prędkości odkształcenia, przedstawione na rys. 2 do 5.

Dla badanych materiałów zachowana jest podstawowa prawidłowość obniżenia poziomu naprężenia uplastyczniającego ze wzrostem temperatury badania. Wszystkie krzywe wykazują maksimum, przy czym maksymalne wartości naprężenia dla tytanu WT1-0 odpowiadają odkształceniu $\varphi$ równym 0,8 do 1, natomiast dla stopów tytanu maksimum $\sigma_p$ występuje przy odkształceniu $\varphi$ mniejszym od 0,5. Po przekroczeniu maksimum, zmniejszanie się wartości $\sigma_p$ w miarę zwiększania odkształcenia jest intensywniejsze w niższych temperaturach badania i dla większych prędkości odkształcenia. Po osiągnięciu określonych wartości odkształcenia wszystkie krzywe $\sigma_p = \sigma_p(\varphi)$ osiągają w przybliżeniu ten sam poziom naprężeń, niezależnie od temperatury i prędkości odkształcenia. Intensywność zmniejszania się naprężenia po przekroczeniu maksimum jest znacznie większa dla stopów tytanu niż w przypadku stali. Można to tłumaczyć [3, 4] znacznym wzrostem temperatury próbki w trakcie skręcania. Jeśli przyjąć, że cała praca odkształcenia jest zamieniana na ciepło, to przyrost temperatury obliczony dla całej części pomiarowej próbki wynosi ok. 130 do 150 K, przy odkształceniu $\varphi = 1$ i poziomie naprężeń 500 MPa. Przyrost temperatury potęguje zjawisko nierównomiernego rozkładu odkształceń na długości próbki skręcanej. Obserwacje próbek po zniszczeniu, jak i dodatkowe badania plastometryczne skręcania próbek do zadanego odkształcenia (rys. 7) oraz skręcanie próbek z naniesioną rysą na długości pomiarowej świadczą, że już przy niewielkim odkształceniu następuje lokalizacja odkształceń i intensywne zmiany długości próbki. Określenie odkształcenia granicznego w tym przypadku jest niemożliwe do wyznaczenia, gdyż zniszczeniu nie ulega równocześnie próbka w całym przekroju, a jedynie w jej zewnętrznych warstwach, w których umocnienie jest większe. Zmniejszanie się w tym przekroju promienia próbki prowadzi do dużej lokalizacji




Rys. 7. Kształt próbek z tytanu WT1-0 skręcanych w temperaturze 973 K do zadanego odkształcenia
(1 - przed odkształceniem, 2 - $\varphi$ = 0,5, 3 - $\varphi$ = 1, 4 - $\varphi$ = 1,5, $\varphi$ = 2, 6 - skręcanie do zniszczenia, $\varphi$ ok. 2,8)

energii cieplnej w niewielkiej części objętości próbki. Powoduje to wybitny wzrost temperatury, któremu towarzyszy duża plastyczność materiału. Całkowite odkształcenie otrzymane w oparciu o wykres jest zatem nieadekwatne do własności plastycznych badanego materiału. Ilościowe ujęcie tego zjawiska jest niemożliwe bez szczegółowej analizy termodynamicznej oraz badań obszarów nierównomiernego rozkładu odkształceń.

Zakres odkształceń realizowanych w praktyce przemysłowej na ogół mieści się w granicach $\varphi$ od 0,1 do 0,5, a więc bliskim odkształceniu, dla którego występuje maksimum wartości naprężenia. Analiza plastyczności tytanu i jego stopów, oparta o zmianę maksymalnej wartości naprężenia uplastyczniającego od temperatury i prędkości odkształcenia (rys. 6), jest wystarczająca dla celów praktycznych. W celu ilościowego ujęcia tych zmian wykonano obliczenia statystyczne w oparciu o zależność:

$$\sigma_{p\ max} = C_{(T)} \cdot \dot{\varphi}^{m(T)}.$$

Przyjęcie takiej zależności wynika z rozkładu punktów w przybliżeniu wzdłuż prostych we współrzędnych $\ln\sigma_{p\ max} - \ln\dot{\varphi}$, przy temperaturze T = = const oraz znajduje potwierdzenie w pracach [3, 5, 6].

Wartości $C_{(T)}$ zależą istotnie od temperatury badania, przy czym w zakresie fazy $\beta$, jak już zaznaczono, dla wszystkich materiałów, zmniejszanie $\sigma_{p\ max}$ jest mniej intensywne niż w temperaturach niższych (rys. 6). Zmianę wartości $C_{(T)}$ przy $\dot{\varphi} = 1\ s^{-1}$ najlepiej opisuje zależność:

$$C_{(T)} = C \cdot T^{c},$$

gdzie c w tym przypadku oznacza czułość naprężenia na zmianę temperatury odkształcenia. Na podstawie wykonanych obliczeń otrzymano następujące zależności $C_{(T)}$ dla badanych materiałów:

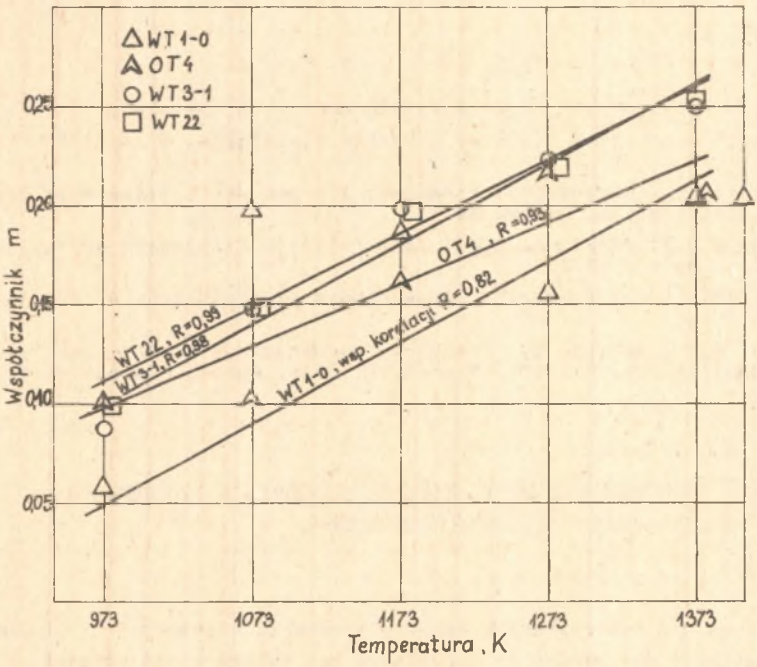
- WT1-0 $C_{(T)} = 117 \cdot T'^{-7,1}$,
- OT4 $C_{(T)} = 376 \cdot T'^{-8,1}$,
- WT3-1 $C_{(T)} = 476 \cdot T'^{-7,8}$,
- WT22 $C_{(T)} = 375 \cdot T'^{-6,8}$,

przy czym $C_{(T)}$, MPa; $T' = T \cdot 10^{-3}$ K.

Współczynnik m(T), oznaczający czułość naprężenia na prędkość odkształcenia (rys. 8), zmienia się dla badanych materiałów od 0,05 do 0,1 w temperaturze najniższej z badanych i osiąga najwyższe wartości od 0,2 do 0,25 w temperaturze najwyższej. Wartości m(T) można wyznaczyć na podstawie zależności:

- WT1-0 $m(T) = 0,42\ T' - 0,36$,
- OT4 $m(T) = 0,31\ T' - 0,21$,
- WT3-1 $m(T) = 0,41\ T' - 0,3$,
- WT22 $m(T) = 0,38\ T' - 0,26$.

Otrzymane wartości m(T) dla stopu WT3-1 wykazują dużę zgodność z zamieszczonymi w pracy [4].




Rys. 8. Zależność współczynnika czułości naprężenia na prędkość odkształcenia od temperatury dla tytanu i jego stopów

## 4. WNIOSKI

Wykonane plastometryczne próby skręcania tytanu i jego stopów o zróżnicowanych strukturach w stanie wyjściowym pozwalają stwierdzić:

1. Zmniejszanie się poziomu naprężenia uplastyczniającego ze wzrostem temperatury, przy czym dla tytanu WT1-0 poziom naprężeń jest w przybliżeniu trzy razy mniejszy niż dla jego stopów odkształcanych w tych samych warunkach temperatury i prędkości odkształcenia.
2. Czułość na prędkość odkształcenia wzrasta wraz ze zwiększaniem temperatury odkształcenia.
3. Plastometryczna próba skręcania jest przydatna do oceny plastyczności tytanu i jego stopów w oparciu o zależność maksymalnych wartości naprężenia uplastyczniającego od temperatury i prędkości odkształcenia, natomiast jest niedogodna do oceny odkształcalności ze względu na dużą skłonność stopów tytanu do nierównomiernego odkształcenia.
4. Wyprowadzone zależności mogą służyć do obliczania oporów odkształcenia plastycznego tytanu i jego stopów w podwyższonych temperaturach.

## LITERATURA

[1] Bala S.: Plastometry, Hutnik t. 36, nr 11, ss. 565-569.

[2] Misiołek Z., Piętek A.: Rudy i Metale Nieżelazne, nr 4, 1977, ss.201-204.

[3] Nikolskij P.: Gorjaczaja sztampowka i presowanije titanowych spławow. Maszinostrojenije, Moskwa 1975.

[4] Sołonina O.P., Głazunow S.G.: Żaroprocznyje titanowyje spławy. Metałłurgija, Moskwa 1976.

[5] Matiaż W.A.: Kuznieczno-Sztampowocznoje proizwodstwo, nr 10, 1973,ss. 10-12.

[6] Fickel H.P.: Beitrag zur Frage des Warmmassivumformens der Titanlegierung TiAl6V4. Dissert. Technisch. Univ. Fakul. Maschinow, Hannover 1971.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ПЛАСТОМЕТРИЧЕСКОЙ ПРОБЫ СКРУЧИВАНИЯ

Р е з ю м е

При помощи пластометрической пробы скручивания определено зависимость пластифицированного напряжения от деформации для титана и его сплавов в пределе температур от 973 до 1373 K 700 до 1100°C и скорости деформации от 0,2 до 25 $s^{-1}$. Определено зависимость максимальных величин пластифицированного напряжения от температуры и скорости деформации. Полученные формулы могут быть надёжны для вычисления сопротивления деформации при горячей формовке титана и его сплавов.

THE EXAMINATION OF YIELD STRESS OF TITANIUM AND ITS ALLOYS BASING ON THE PLASTIMETRIC TORSION TEST

S u m m a r y

Basing on the plastimetric torsion test the relations between yield stress and strain for titanium have been defined, in the temperature range from 973 to 1373 K (700 to 1100 C), and deformation speed (rate) from 0,2 to 2,5 $s^{-1}$.

The way in which the maximum values of yield stress depend on temperature and on deformation speed has been determined. The resultant formulas may serve to calculate the deformation resistance of titanium and its alloys during hot plastic forming.