

Tadeusz Lamber, Maciej Puchała, Stanisław Węgrzyniak
Instytut Inżynierii Materiałowej

WPLYW TEMPERATURY NA ZMIANĘ MODUŁU YOUNGA ORAZ CHARAKTERYSTYK WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH I PLASTYCZNYCH STALI R45

Streszczenie: W pracy określono wpływ podwyższonych temperatur (w interwale 20÷800°C) na moduł Younga oraz charakterystyki wytrzymałościowe i plastyczne uzyskane z krótkotrwałej próby statycznego rozciągania próbek ze stali konstrukcyjnej na rurociągi ciśnieniowe.

1. Wprowadzenie

Rozwijające się obecnie takie gałęzie przemysłu, jak energetyka atomowa, lotnictwo, technika raketowa, budownictwo kotłów, turbin gazowych i inne, stawiają coraz większe wymagania odnośnie własności wytrzymałościowych i plastycznych materiałów stosowanych na elementy pracujące w wysokich temperaturach. W związku z tym przemysł hutniczy produkuje nowe materiały o wysokich własnościach żarowytrzymałych, między innymi i mechanicznych, które należy określić na podstawie badań eksperymentalnych. Oczywiście jest, że wyniki badań własności mechanicznych w temperaturze otoczenia nie mogą być miarodajne dla wysokich temperatur. Ogólnie bowiem wiadomo, że np. moduł Younga oraz charakterystyki wytrzymałościowe metali maleją ze wzrostem temperatury. Wynika to stąd, że ze zwiększeniem temperatury wzrasta ruchliwość atomów w sieci krystalicznej i zmienia się energia wiązania atomowego. Umożliwia to powstanie odkształcenia trwałego dla takiego stanu naprężenia i czasu, dla jakiego w niższej temperaturze jeszcze nie można go było osiągnąć.

Punktem wyjścia do badań w podwyższonych temperaturach jest statyczna próba rozciągania. Jest to próba krótkotrwała. Warunki jej przeprowadzenia określa Polska Norma PN-66/H-04312 "Próba statyczna rozciągania metali przy podwyższonych temperaturach". Norma ta podaje jako górną granicę temperatury 900 °C dopuszczając równocześnie, o ile jest to konieczne, prowadzenie prób w wyższych temperaturach. Próbę przeprowadza się w sposób podobny do próby statycznego rozciągania w temperaturze otoczenia.

2. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest ustalenie wpływu temperatury w zakresie od 20 °C do 800 °C na zmianę modułu Younga oraz charakterystyk wytrzymałościowych (R_e , R_m) i plastycznych (A , Z) dla stali R45, stosowanej między innymi do produkcji rurociągów ciśnieniowych pracujących w podwyższonych temperaturach, w oparciu o krótkotrwałą próbę statycznego rozciągania. Należy zaznaczyć, że wyjściowymi, jakkolwiek nie najważniejszymi, informacjami o zachowaniu się metali w podwyższonej temperaturze są właśnie wyszczególnione wielkości. Często posługujemy się nimi jako wynikami przyspieszonych metod badań charakterystyk materiałów, pracujących w warunkach krótkotrwałego działania temperatur i obciążenia, np. w technice rakietowej [1]. Oprócz tego służą do porównywania charakterystyk różnych materiałów pod względem jakościowym.

3. Badania charakterystyk mechanicznych stali R45 w zależności od temperatury w oparciu o krótkotrwałą próbę rozciągania

3.1. Urządzenia do badań

Badania przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej firmy Mohr-Federhaff o zakresie do 20000 kG przy nastawieniu siłomierza, w zależności od temperatury badania, na 1/2, 1/5, 1/10 i 1/20 pełnego zakresu obciążenia. Maszyna wyposażona jest w specjalne urządzenie do badań w podwyższonych temperaturach [2] w zakresach 50±400 °C oraz 50±1000 °C, z dokładnością pomiaru ± 1% do 400 °C i ± 2% do 1000 °C. Do dokładnego pomiaru wydłużeń w czasie próby rozciągania w podwyższonej temperaturze, które to wydłużenia służyć będą do określenia naprężeń granicznych, a zatem i szukanych charakterystyk zastosowano elektroniczny tensometr pomiarowy [2], o przekładni 200 i 1000. Tensometr ten dostosowany jest do badań w temperaturach do 800 °C. Nastawienie tensometru w czasie prób wynosiło 1000 : 1. Podczas próby wykres w układzie siła-wydłużenie kreślony był automatycznie na bębnie maszyny.

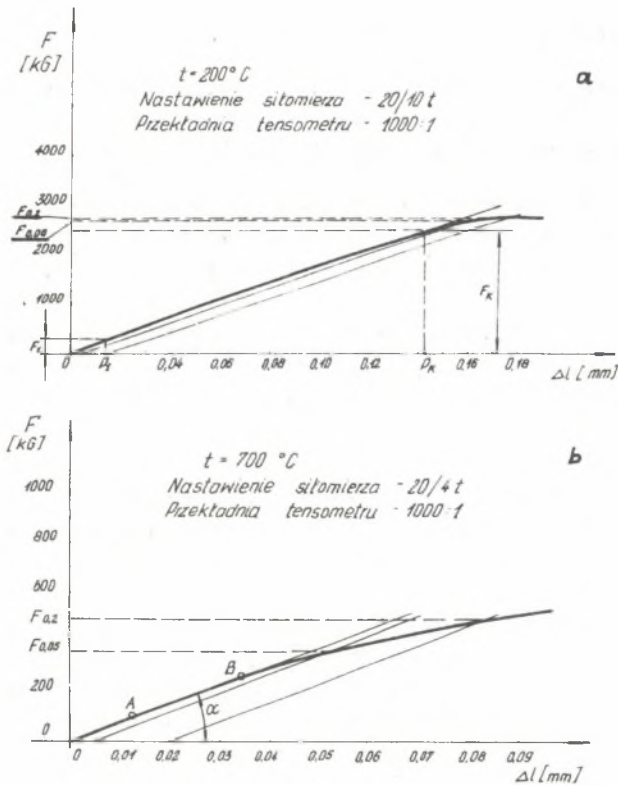
3.2. Charakterystyka materiału i przygotowanie próbek

Badany materiał, stal R45 uzyskano z wlewka przewalcowanego na kęsisko, z którego wykonano pręty kwadratowe 100 x 100 mm. Pręty te przekuto na pręty okrągłe \varnothing 20 mm, z których toczono próbki o średnicy pomiarowej 10 mm z głowami gwintowanymi M16. Pozostałe wymiary i kształt próbek były dostosowane do urządzeń pomiarowych maszyny wytrzymałościowej do badań w wysokich temperaturach. Odcinek pomiarowy próbki był szlifowany.

Na podstawie analizy chemicznej materiału pobranego w czasie toczenia próbek stwierdzono następujące procentowe zawartości domieszek: 0,19% C; 0,72% Mn; 0,23% Si i zanieczyszczenia o wartości 0,038% P i 0,032% S.

3.3. Wyznaczenie modułu Younga

Moduł Younga E (moduł sprężystości podłużnej) przy statycznym obciążeniu w podwyższonych temperaturach określa się analogicznie jak w temperaturze otoczenia, tj. zgodnie z normą PN-71/H-04310 (próba statyczna rozciągania metali) oraz wymienioną już normą PN-66/H-04312. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę na zachowanie stałości czasu trwania wszystkich prób i utrzymania ściśle określonej temperatury. W przeciwnym wypadku, (zmiana np. czasu próby), wyznaczone moduły Younga mogą mieć dowolne wartości. Może to prowadzić do błędnych wniosków odnośnie własności metali w podwyższonych temperaturach. Moduł Younga określono na podstawie wykresu próby rozciągania z dokładnym pomiarem wydłużeń w podwyższonych temperaturach. Przykłady takich wykresów, kreślonych automatycznie przez specjalne urządzenia maszyny wytrzymałościowej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wykresy statycznej próby rozciągania w podwyższonej temperaturze z dokładnym pomiarem wydłużeń;

a - w temperaturze 200°C , b - w temperaturze 700°C

W zakresie, w którym krzywa rozciągania jest linią prostą, moduł Younga wyliczono z prawa Hooke'a, które w przypadku zastosowania metody obciążenia przyjmuje postać:

$$E = \frac{(F_k - F_1) L_0}{C (P_k - P_1) S_0}, \quad (1)$$

gdzie:

F_1, F_k - obciążenia odpowiadające kolejno 10 i 90% umownej granicy sprężystości odczytane bezpośrednio z wykresu rozciągania (rys. 1a),

P_1, P_k - wskazania tensometru, z których pierwsze odpowiada obciążeniu F_1 a drugie obciążeniu F_k , odczytane bezpośrednio na osi odciętych z wykresów rozciągania (rys. 1a),

L_0 - początkowa długość pomiarowa wynosząca 100 mm,

S_0 - początkowa powierzchnia przekroju poprzecznego próbki,

$C = \frac{\Delta L}{\Delta P}$ - stała tensometru, równa ilorazowi przyrostu długości pomiarowej L i różnicy wskazań tensometru ΔP . Dla przyjętej 1000-krotnej przedkładni wynosi ona 0,001.

Jeżeli krzywa rozciągania odchyłała się od linii prostej od samego początku, moduł Younga określano jako tangens kąta nachylenia siecznej przez dwa dowolne bliskie punkty - w zakresie 10 - 90% naprężenia odpowiadającego granicy sprężystości (rys. 1b). Szczegółowe wyniki obliczeń średnich wartości modułu Younga z trzech prób, w zależności od temperatury badania, zestawiono w tablicy 1, oraz przedstawiono wykreślnie na rys. 2.

Ponieważ moduły sprężystości są związane z wielkością sił oddziaływania między atomami, a siły te w sieci krystalicznej zależą od odległości między atomami, to moduły sprężystości muszą również zależeć od temperatury [3]. Z rys. 2 widać przebieg spadku modułu Younga dla stali R45 ze wzrostem temperatury. Na wykresie widoczne jest załamanie krzywej w pobliżu punktu Curie. Wpływ temperatury na moduły sprężystości czystych metali badał Körster [4]. Wyniki badań Körstera dotyczące wpływu temperatury na moduł Younga dla czystego żelaza przedstawiono na rys. 2. Uwidoczniono w ten sposób wpływ pierwiastków stopowych w stali R45 na zmianę wartości modułu Younga ze wzrostem temperatury. Uzyskaną krzywą doświadczalną $E = E(T)$, jak wynika z jej przebiegu (rys. 2), można aproksymować funkcją typu:

$$y = a + bT + cT^2 \quad (2)$$

gdzie:

$y \rightarrow E$ - moduł Younga

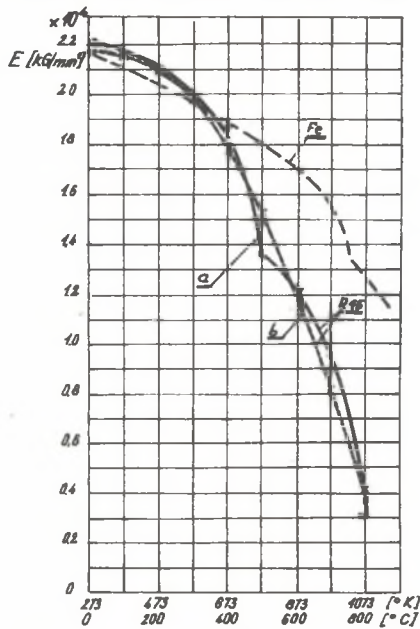
T - temperatura,

a, b, c - współczynniki przyjętego trójmianu kwadratowego.

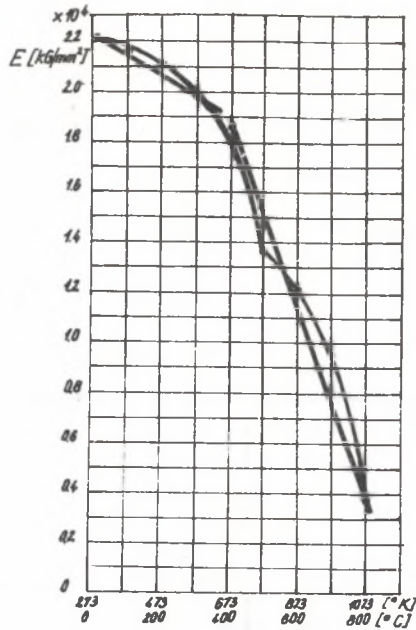
Tablica 1

Zestawienie średnich wartości modułów Younga i charakterystyk mechanicznych stali R45 uzyskanych z próby rozciągania w podwyższonych temperaturach

t [°C]	$E_{\text{śr.}}$ [$\times 10^4 \text{ kg/mm}^2$]	$R_{0,05}$ [kg/mm^2]	$R_{0,2}$ [kg/mm^2]	R_m [kg/mm^2]	A_{10} [%]	Z [%]
otocz.	2,2021	41,27	41,37	50,96	11,3	41,50
100	2,1664	37,13	37,33	51,85	14,6	66,25
200	2,1214	35,66	35,86	54,95	7,4	58,51
300	1,9797	37,26	43,94	61,60	11,6	57,36
400	1,8872	33,75	35,85	56,29	15,8	61,19
500	1,3770	10,19	16,1	35,79	14,6	63,30
600	1,2101	7,89	10,95	17,58	22,1	81,77
700	0,9656	4,39	6,24	8,03	39,8	67,17
800	0,3811	1,65	1,91	6,33	30,0	65,04



Rys. 2. Zależność modułu Younga od temperatury dla stali R45 i Fe [5]
 a - krzywa doświadczalna, b - krzywa aproksymacyjna



Rys. 3. Zależność modułu Younga od temperatury w zakresie $293 \leq T \leq 1073^\circ\text{K}$ aproksymowana dwoma prostymi

Po wyznaczeniu współczynników a , b i c w oparciu o dane doświadczalne, równanie (2) przyjmie postać:

$$E = 1,8217 \cdot 10^4 + 21,327 \cdot T - 3,2414 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 \quad (2a)$$

Największe odchylenie krzywej określonej równaniem (2a) od krzywej doświadczalnej (rys. 2) nie przekracza 6,5%. Ujęcie zależności $E = E(T)$ w postaci równania (2a), umożliwi analizę rozwiązywanie zagadnienia termosprężystości i -plastyczności z uwzględnieniem zmiany modułu Younga ze wzrostem temperatury. Celem uproszczenia tych obliczeń, krzywą doświadczalną (rys. 2) można przedstawić dwoma prostymi (rys. 3) o równaniach:

$$E = A + \alpha_E T \quad \text{dla} \quad 293 \leq T \leq 623 \text{ } ^\circ\text{K}$$

oraz

$$E = A' + \alpha_E' T \quad \text{dla} \quad 623 \leq T \leq 1073 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (3)$$

gdzie:

E_{293} , E_{623} - moduł Younga w temperaturze $T = 293$ °K i temperaturze $T = 623$ °K

$\alpha_E = \frac{dE}{dT}$ - współczynnik temperaturowy w zakresie temperatur $293 \leq T \leq 623$ °K,

$\alpha'_E = \frac{dE}{dT}$ - współczynnik temperaturowy w zakresie temperatur $623 \leq T \leq 1073$ °K

Rzeczywiste zmierzone wartości współczynnika temperaturowego dla krzywej $E = E(T)$ zastąpimy średnimi wartościami stałymi dla każdego zakresu temperatur:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{E_{sr}} &= \frac{\Delta E}{\Delta T} = -7,9428 \\ A &= 2,4348 \cdot 10^4 \end{aligned} \right\} \text{ dla } 293 \leq T \leq 623 \text{ °K}$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_{E_{sr}} &= \frac{\Delta E}{\Delta T} = -37,6525 \\ A' &= 4,4212 \cdot 10^4 \end{aligned} \right\} \text{ dla } 623 \leq T \leq 1073 \text{ °K}$$

Równanie (3) przyjmie więc postać:

$$E = 2,4348 \cdot 10^4 - 7,9428 \cdot T \quad \text{dla } 293 \leq T \leq 623 \text{ °K}$$

oraz

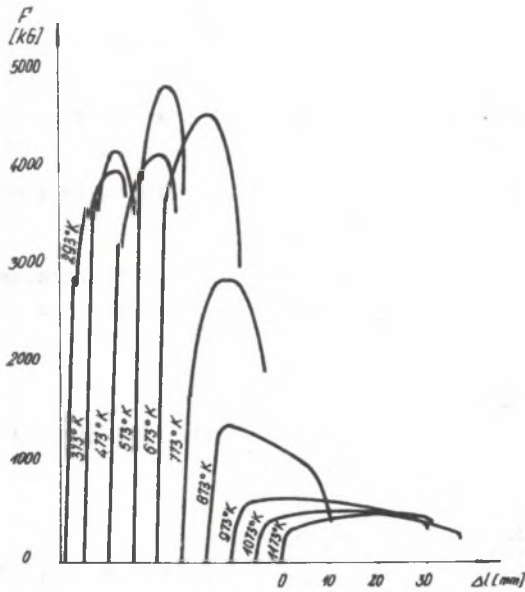
$$E = 4,4212 \cdot 10^4 - 37,6525 \cdot T \quad \text{dla } 623 \leq T \leq 1073 \text{ °K} \quad (4)$$

3.4. Wyznaczenie charakterystyk wytrzymałościowych i plastycznych

Próbie rozciągania z dokładnym pomiarem wydłużeń w podwyższonych temperaturach przerywano w chwili wyczerpywania się zakresie pomiarowego wydłużeń tensometru elektronicznego. Następowoło to w przybliżeniu po osiągnięciu 110% siły odpowiadającej umownej granicy sprężystości, co jest zgodne z zaleceniami norm. Zdejmowano wówczas tensometr a próbkę obciążano do zerwania. Otrzymane wykresy prób rozciągania w podwyższonych temperaturach przedstawia rys. 4.

W oparciu o wykresy rozciągania z dokładnym pomiarem wydłużeń (rys. 1) wyznaczono umowne granice sprężystości $R_{0,05}$ oraz umowne granice plastyczności $R_{0,2}$ analogicznie jak to się czyni w próbie rozciągania z dokładnym pomiarem wydłużeń w temperaturze otoczenia.

Szczegółowe wyniki obliczeń charakterystyk wytrzymałościowych ($R_{0,05}$, $R_{0,2}$, R_m) zestawiono w tablicy 1 oraz przedstawiono wykreślnie na rys. 5.



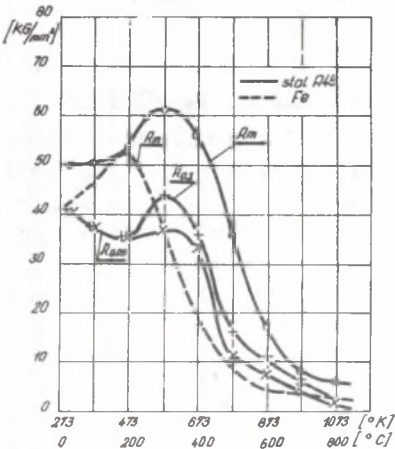
Rys. 4. Wykresy statycznej próby rozciągania w podwyższonych temperaturach

Charakterystyki plastyczne, a mianowicie wydłużenie A_{10} i przewężenie Z , wyznaczono analogicznie jak to się czyni przy próbie rozciągania w temperaturze otoczenia.

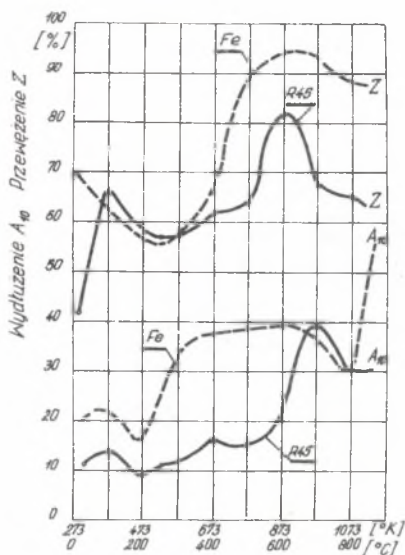
Szczegółowe wyniki obliczeń tych wielkości dla różnych temperatur badania zestawiono w tabelcy 1 oraz przedstawiono wykreślnie na rys. 6.

Z przebiegu otrzymanych krzywych $A_{10} = A_{10}(T)$; $Z = Z(T)$ wynika nieregularność zależności charakterystyk plastycznych badanej stali od temperatury.

Dla uwidocznienia wpływu pierwiastków stopowych znajdujących się w stali R45 na zmianę charakterystyk plastycznych, ze wzrostem temperatury, naniesiono na rys. 6 wykres zależności tych samych wielkości od temperatury dla czystego żelaza.



Rys. 5. Zależność charakterystyk wytrzymałościowych od temperatury dla stali R45 i dla czystego żelaza [5]



Rys. 6. Zależność charakterystyk plastycznych od temperatury dla stali R45 i dla czystego żelaza [5]

Pierwiastki stopowe w danym metalu mogą zwiększać lub zmniejszać wartości jego charakterystyk plastycznych w odniesieniu do czystych metali. Szczegółowe wyjaśnienie tego złożonego fizyko-chemicznego zjawiska daje literatura specjalistyczna np. [3].

Granica sprężystości $R_{0,05}$; plastyczność $R_{0,2}$ i wytrzymałości R_m dla stali R45 obniża się w miarę przyrostu temperatury (rys. 5). Charakter tego zjawiska jest na ogół wspólny dla wszystkich metali z danego układu krystalograficznego, a mianowicie KB, do którego należy badana stal. W przypadku jednak struktury płaskocentrycznej spadek R_m następuje szybciej niż spadek R_e , natomiast w przypadku struktury przestrzennie centrycznej przebieg wykresów $R_e(T)$ i $R_m(T)$ jest mniej więcej równoległy [5].

Ogólna zależność charakterystyk wytrzymałościowych od temperatury, a w szczególności R_e i R_m , przy pominięciu niektórych szczegółów może być przedstawiona [6] w postaci wzoru:

$$\sigma = A e^{-BT}, \quad (5)$$

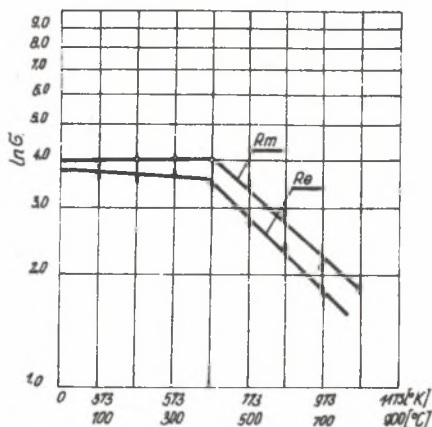
gdzie:

σ - naprężenie równe poszczególnych charakterystyk wytrzymałościowym ($R_{0,05}$; $R_{0,2}$; R_m);

AiB- stałe materiałowe,

T - temperatura w $^{\circ}\text{K}$,
 e - podstawa logarytmu naturalnego.

Krzywe $R_e(T)$ i $R_m(T)$ określone wzorem (5) wygodniej jest przedstawić we współrzędnych półlogarytmicznych $\ln \sigma = T$.



Rys. 7. Wpływ temperatury na granicę plastyczności R_e i wytrzymałości R_m dla stali R45 we współrzędnych półlogarytmicznych

Ze wzoru (5) wynika prostoliniowa (rys. 7) zależność pomiędzy $\ln \sigma$ i T w tak przyjętym układzie współrzędnych:

$$\ln \sigma = \ln A - BT \quad (6)$$

Wyznaczając z danych doświadczalnych stałe materiałowe A i B w określonych przedziałach temperatur, otrzymano równania prostych łamanych dla poszczególnych charakterystyk wytrzymałościowych stali R45 w postaci równań

$$\left. \begin{aligned} \ln R_e &= 3,9552 - 7,9444 \cdot 10^{-4} \cdot T \\ \ln R_m &= 3,7163 + 7,3333 \cdot 10^{-4} \cdot T \end{aligned} \right\} 293 \leq T \leq 623 \text{ } ^{\circ}\text{K} \quad (7)$$

oraz

$$\left. \begin{aligned} \ln R_e &= 7,5053 - 5,8340 \cdot 10^{-3} \cdot T \\ \ln R_m &= 8,4637 - 6,5610 \cdot 10^{-3} \cdot T \end{aligned} \right\} 623 \leq T \leq 1073 \text{ } ^{\circ}\text{K} \quad (8)$$

4. Wnioski

1. Zależność modułu Younga dla stali R45 od temperatury bezwzględnej w zakresie $293 \leq t \leq 1073^{\circ}\text{K}$, można aproksymować krzywą w postaci trójkąta kwadratowego z błędem nie przekraczającym 6,5% lub dwoma prostymi z błędem nie przekraczającym 10,0%.
2. Krzywe przedstawiające zależności charakterystyk plastycznych od temperatury cechuje duża nieregularność ich przebiegu, co związane jest z szeregiem zmian mechanizmu odkształcenia plastycznego.
3. W określonym zakresie temperatur, $293 \leq T \leq 1073^{\circ}\text{K}$, ma miejsce prostopadła zależność logarytmów charakterystyk wytrzymałościowych stali R45 od temperatury bezwzględnej, przy maksymalnym błędzie 8,0%.

LITERATURA

- [1] Chimuszyn F.F.: Żaroprocnyje stali i spławy. Izd. Metallurgia, Moskwa 1964.
- [2] Praca zbiorowa: Badanie własności mechanicznych tworzyw - laboratorium. Skrypt Instytutu Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej.
- [3] Bersztejn M.L., Zajmowski W.A.: Struktura i własności mechaniczne metali. Wydawnictwo NT, Warszawa 1973.
- [4] Körster W.: Die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls reiner Metalle. Zeitschrift Metallkunde B39, H1, S 1-12, 1948.
- [5] Buch A.: Własności mechaniczne czystych metali. Wydawnictwo NT, Warszawa 1968.
- [6] Sawickij E.M.: Wlijanije temperatury na mechaniczeskije swojstwa metalłow i spławow. Izd. AN SSSR, Moskwa 1957.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ СТАЛИ

Резюме

В работе определено влияние повышенных температур в интервале $20 \div 800^{\circ}\text{C}$ на модуль Юнга, характеристики прочности и пластичности полученных при кратковременных испытаниях на растяжение образцов из конструкционных сталей применяемых на трубоприводы.

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE YOUNG'S MODULUS AND ON STRENGTH
AND PLASTIC CHARACTERISTICS FOR THE STEEL R45

S u m m a r y

The influence of high temperatures (of the range $20\pm 800^{\circ}\text{C}$) on the Young's modulus and on strength and plastic characteristics have been determined. These results were obtained from the tensile testing of the construction steel for the pipe-lines.