

## WYTRZYMAŁOŚĆ STALOWYCH PRĘTÓW Z KARBEM PRZY ROZCIĄGANIU W PODWYŻSZONYCH TEMPERATURACH

KAROL T U R S K I (WARSZAWA)

### 1. Wstęp

Teoretyczne rozwiązanie uzyskane w ramach teorii ciała sztywno idealnie plastycznego dla rozciąganego pręta z karbem weryfikowano w normalnych i obniżonych temperaturach dla różnych materiałów [1, 2]. Badania te możemy podzielić na dwie grupy. Pierwszą grupę tworzą doświadczenia prowadzone w takich warunkach, że przy rozciąganiu gładkiej próbki występuje wyraźna granica plastyczności. Do drugiej grupy należą badania, w których nie było widocznego momentu uplastycznienia materiału. Podobieństwo cech krzywych umocnienia w każdej z grup umożliwiało wybranie określonej definicji granicy plastyczności ważnej w odniesieniu do danej grupy badań.

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu temperatur od 20 do 700°C na zachowanie się rozciąganych osiowo-symetrycznych prętów stalowych z korbami. W tym zakresie temperatur zmienia się typ krzywej umocnienia próbki gładkiej, przy 20°C występuje przystanek plastyczności, natomiast po odpowiednim nagrzeniu próbki, jak wiadomo, nie ma tego zjawiska. Aby porównywać naprężenia uplastyczniające próbki rozciągane w różnych temperaturach wprowadzono nową definicję umownej granicy plastyczności. Przyjmowano, że uplastycznienie następuje, gdy praca dysypowana jest równa pewnej ustalonej części całkowitej pracy dysypowanej liczonej do momentu osiągnięcia maksymalnej siły.

### 2. Technika doświadczalna

Badania przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej ZD-100 z piecem rurowym. Próbki wstawiano do nagrzanego pieca, w którym przebywały przed rozciąganiem 20 do 25 minut w celu wyrównania rozkładu temperatury. Temperaturę mierzono termoparą Pt-Rh-Pt, którą mocowano do próbki.

Z każdej próby otrzymywano wykres siły w funkcji przemieszczenia trawers maszyny. Dzięki małym luzom całego układu, początkowy nieliniowy odcinek wykresu był niewielki w porównaniu do zakresu sprężystego i można było, drogą ekstrapolacji odcinka liniowego, znaleźć punkt, od którego liczono wydłużenia próbki. Po rozerwaniu próbki dokładnie składano dwie jej części i w miejscu pęknięcia mierzono średnicę za pomocą suwmiarki o dokładności 0,05 mm.

Do badań użyto stal stopową ŁH-15 oraz stal 4. Próbki, toczone z pręta, miały gwintowane końce służące do mocowania w uchwytach zrywarki. Całkowita długość próbki

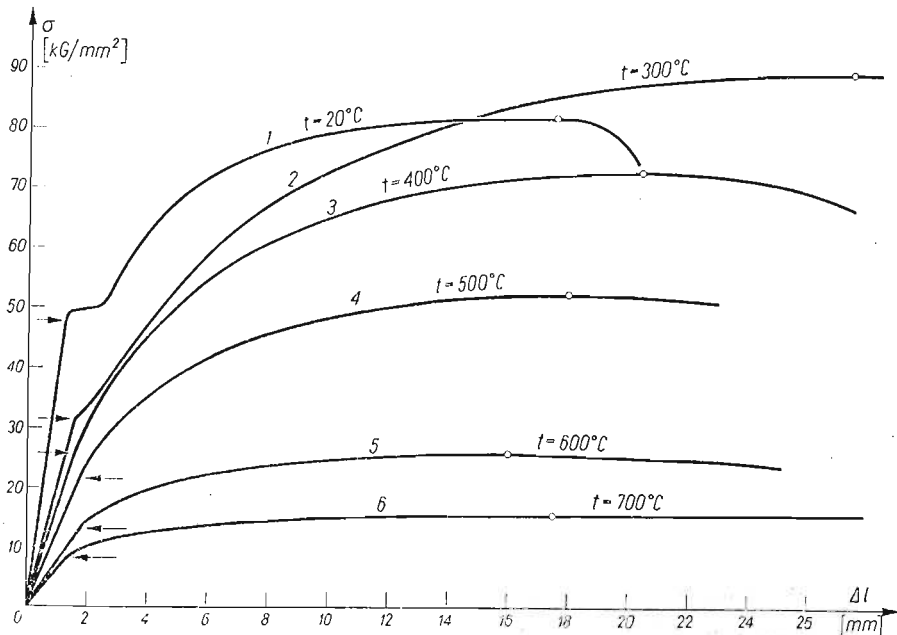
wynosiła 160 mm, długość części roboczej — 110 mm. Wymiary części pomiarowej próbki podane są na wykresie z wynikami doświadczeń.

W pierwszej serii zbadano próbki gładkie w różnych temperaturach. Drugą serię próbek wykonano z karbem kątowym o stosunku średnicy pręta  $2C$  do średnicy dna karbu  $2R$  wynoszącym około 2,2 i kącie rozwarcia karbu  $71^\circ$ . Zgodnie z rozwiązaniami teoretycznymi opartymi na modelu ciała sztywno idealnie plastycznego nośność pręta o kącie rozwarcia karbu  $71^\circ$  osiąga maksimum, gdy  $C/R \geq 2,2$ . Ta seria próbek służyła do zbadania wpływu temperatury od 20 do  $700^\circ\text{C}$  na uplastycznienie i wytrzymałość pręta z karbem. Zagadnienie jest interesujące z tego powodu, że przy temperaturze pokojowej karb pęka w sposób kruchy, natomiast w temperaturach wysokich pęknięcie poprzedzone jest znacznymi odkształceniami plastycznymi.

Dla zweryfikowania niektórych rezultatów otrzymanych w badaniach stali ŁH-15 powtórzono badania próbek z karbem wykonując je ze stali 4.

### 3. Wyniki doświadczeń

Badania rozciągania próbek ze stali ŁH-15 wykonano w temperaturach 20, 300, 400, 500, 600,  $700^\circ\text{C}$ .<sup>1)</sup> Na rys. 1 pokazano wyniki badań próbek gładkich, na rys. 2 podano wykresy dla próbek z karbem. Wielkość naprężenia określano dzieląc siłę odpowiadającą danemu wydłużeniu przez początkowy najmniejszy przekrój próbki. Strzałką oznaczono koniec proporcjonalnego wydłużenia, a za pomocą małego kółka zaznaczono punkt odpowiadający maksymalnej sile.

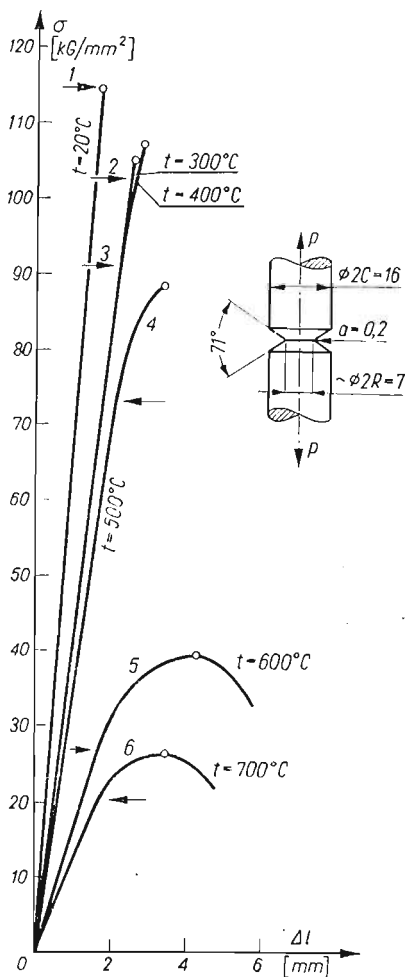


Rys. 1

<sup>1)</sup> H. Krasowski, Badanie zachowania się metalu przy rozciąganiu w różnych temperaturach, praca dypl., Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1976.

Dla temperatury 20 i 300°C (rys. 1) przy badaniu gładkich próbek widać wyraźnie granicę plastyczności. Na pozostałych wykresach następuje płynne przejście od zakresu sprężystego do plastycznego.

Próbki z karbem zachowywały się odmiennie od próbek gładkich przy badaniu w tej samej temperaturze. Przy rozciąganiu w temperaturze 20°C próbka z karbem (rys. 2)



Rys. 2

pekła w zakresie sprężystych wydłużeń. Próbki rozciągane w temperaturze 300, 400, 500°C pękły w tym zakresie naprężeń, gdzie występowało małe odchylenie od prostoliniowego wykresu. Jednakże w tych czterech przypadkach próbki pękły w sposób kruchy. Próbki rozciągane w temperaturze 600 oraz 700°C zrywały się w sposób ciągliwy.

Wpływ temperatury powoduje taką zmianę przebiegu wykresów  $\sigma(\Delta l)$  (rys. 1 i 2), że żadna ze znanych metod określenia naprężenia uplastyczniającego nie może być przyjęta równocześnie do wszystkich podanych krzywych. Dlatego wprowadzono nową definicję granicy plastyczności. Przyjęto, że uplastycznienie następuje przy naprężeniu odpowia-

jącemu stałej części całkowitej mocy dysypowanej do momentu osiągnięcia maksymalnej siły.

Wyrażenie

$$(3.1) \quad W = \int_0^{\Delta l_p(\sigma_{\max})} \sigma d(\Delta l_p),$$

( $\Delta l_p$  — plastyczna część wydłużenia) oznacza pracę na jednostkę przekroju próbki zużytą na plastyczną deformację materiału do momentu osiągnięcia maksymalnej siły. Wartości  $\Delta l_p$  określano prowadząc z dowolnego punktu na wykresie  $\sigma(\Delta l)$  prostą równoległą do początkowego liniowego odcinka wykresu.

Aby znaleźć wartość naprężenia uplastyczniającego dany odkształcany element, wprowadzamy wyrażenie

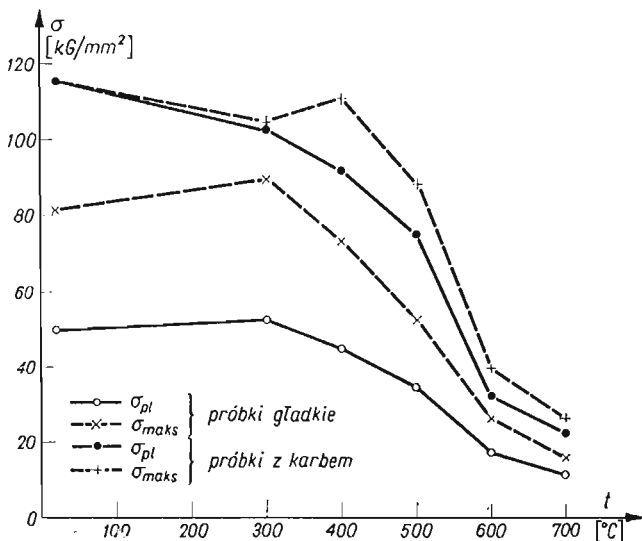
$$(3.2) \quad W_p = \int_0^{\Delta l_p(\sigma_p)} \sigma d(\Delta l_p),$$

oznaczające pracę wykonaną na plastyczną deformację do wydłużenia  $\Delta l_p$  określonego w ten sposób, że niezależnie od przebiegu wykresu  $\sigma(\Delta l)$  współczynnik

$$(3.3) \quad a_p = W_p/W$$

zachowuje stałą wartość.

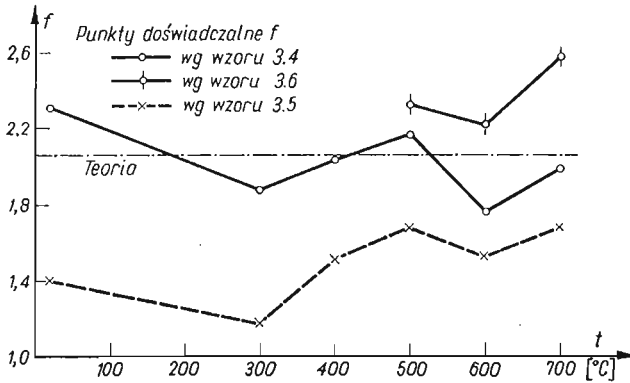
Wartość współczynnika  $a_p$  wybrano tak, aby dla wykresu 1 (rys. 1) granica plastyczności leżała na przystanku plastyczności. W danym przypadku wybrano  $a_p = 0,05$ . Na rys. 3 pokazano zmianę naprężenia uplastyczniającego w funkcji temperatury badania (linie ciągłe) oraz przebieg maksymalnego naprężenia (linie przerywane) dla próbek gładkich i próbek z karbem.



Rys. 3

W przypadku rozciągania próbek gładkich w wybranych tu temperaturach, największą wytrzymałość materiału zmierzono przy 300°C (punkty +). W miarę wzrostu temperatury powyżej 300°C wytrzymałość próbki stopniowo zmniejsza się. Odpowiednio do wytrzymałości zmienia się również granica plastyczności (punkty białe).

Dla próbki z karbem rozciąganej w temperaturze 20°C wykres był prostoliniowy aż do zerwania, wobec czego naprężenie uplastyczniające, według przyjętej definicji, równe jest naprężeniu maksymalnemu. W temperaturze 300°C następuje zmniejszenie wytrzymałości próbki z karbem w porównaniu z badaniami przy 20 i 400°C (linia przerywana, punkty +). Natomiast naprężenie uplastyczniające stopniowo spada ze wzrostem temperatury (linia ciągła, punkty czarne). Próbki z karbem rozciągane w temperaturze od 20 do 500°C pękły zanim wykres  $\sigma(\Delta l)$  osiągnął ekstremum. Rozciąganie takich samych próbek w temperaturze 600 i 700°C wywoływało zerwanie przy siłach mniejszych od siły maksymalnej.



Rys. 4

Na rys. 4 pokazano, jak temperatura zmienia umocnienie wywołane przez karb. Wykres oznaczony linią ciągłą obliczono według wzoru

$$(3.4) \quad f_p = \sigma_k / \sigma_g,$$

gdzie  $\sigma_k$  i  $\sigma_g$  oznaczają granice plastyczności odpowiednio próbki z karbem i próbki gładkiej (rys. 3).

Punkty doświadczalne połączone linią przerywaną obliczono według wzoru

$$(3.5) \quad f_m = \bar{\sigma}_k / \bar{\sigma}_g,$$

gdzie  $\bar{\sigma}_k$  i  $\bar{\sigma}_g$  oznaczają maksymalne naprężenie podane na rys. 3.

Teoretyczną własność współczynnika  $f = 2,06$  wyznaczono dla karbu o stosunku  $C/R = 0,057$  z odpowiedniego wykresu [2].

Wartości współczynnika obliczonego dla nowej definicji granicy plastyczności (3.4) porównano z wartościami współczynnika wyznaczonymi dla tradycyjnej definicji uplastycznienia [1]. Uplastycznienie wiąże się tu z punktem, przy którym tangens kąta pochylenia stycznej do wykresu  $\sigma(\Delta l)$  równy jest dwóm trzecim tangensa kąta pochylenia początko-

wego prostoliniowego odcinka wykresu. Oznaczając przez  $\sigma_{sk}$  oraz  $\sigma_{sg}$  odpowiednio naprężenie uplastyczniające próbkę gładką i próbkę z korbem otrzymamy

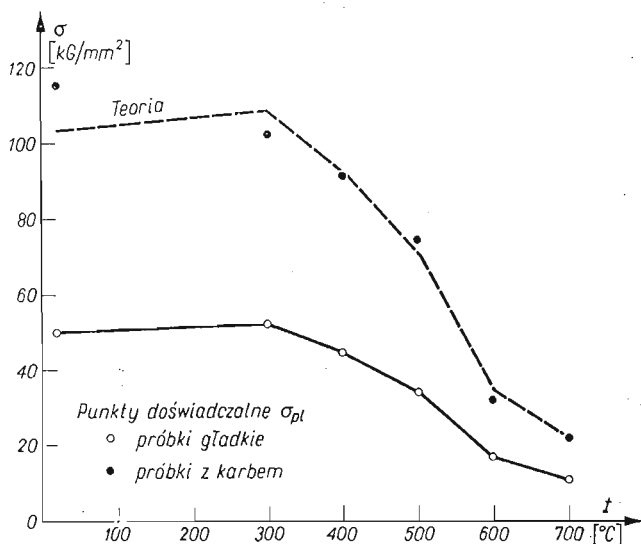
$$(3.6) \quad f = \sigma_{sk}/\sigma_{sg}.$$

Rozwiązanie teoretyczne pomijające wpływ temperatury przewiduje stałą wartość współczynnika umocnienia niezależnie od temperatury badania. Natomiast wyniki doświadczeń pokazują, że współczynnik  $f$  zmienia się w funkcji temperatury. W przypadku współczynnika  $f$  obliczonego według wzoru (3.4), jego wartości różnią się od wartości teoretycznej od +12% do -14%. Największe odchylenie od rozwiązania teoretycznego ma miejsce przy temperaturze 600°C, przy której stal ŁH-15 posiada dobre własności plastyczne.

Wartości współczynnika  $f_m$  obliczone według wzoru (3.5) są znacznie mniejsze od teoretycznej wielkości  $f$ . Najmniejsza wartość tego współczynnika odpowiada temperaturze 300°C, przy której otrzymano największą wytrzymałość i wydłużenie w momencie osiągnięcia maksymalnej siły dla próbki gładkiej (rys. 3). Wzrost temperatury powyżej 300°C wywołuje wzrost współczynnika  $f_m$  obliczonego ze wzoru (3.5).

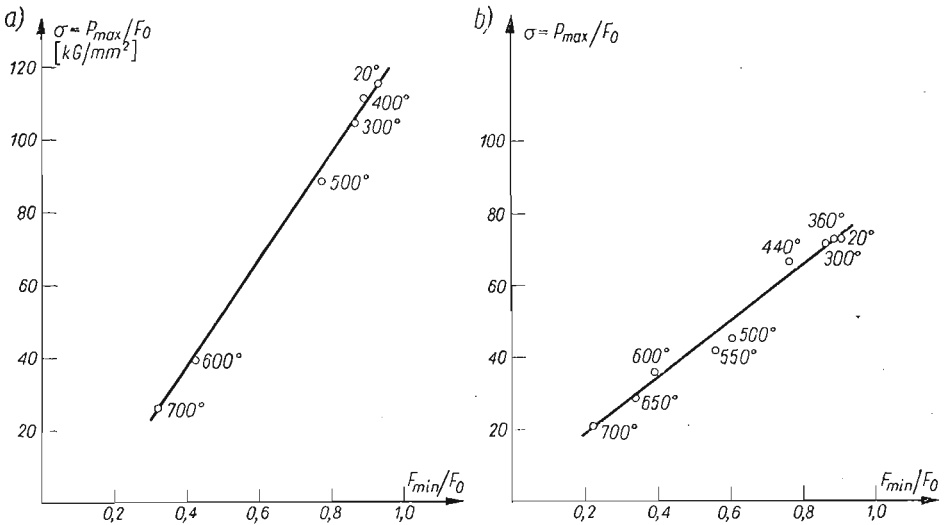
Na rys. 4 naniesiono również punkty doświadczalne wyznaczone według wzoru (3.6) dla trzech temperatur, przy których można było wyznaczyć takie wielkości. Zasadnicze wnioski omówione poprzednio, to znaczy, że współczynnik  $f$  zmienia się w funkcji temperatury i różni się od współczynnika teoretycznego, pozostają ważne również przy tej tradycyjnej definicji naprężenia uplastyczniającego.

Na rys. 5 linią przerywaną pokazano wykres teoretyczny zmiany naprężenia uplastyczniającego próbkę z korbem przy rozciąganiu w różnych temperaturach. Wykres otrzymano mnożąc odpowiednie rzędne wykresu dla próbek gładkich (rys. 3, punkty białe) przez teoretyczny współczynnik umocnienia  $f = 2,06$ . Położenie punktów eksperymentalnych wskazuje, że rozwiązanie teoretyczne dobrze opisuje wyniki doświadczeń w podwyższonych temperaturach.



Rys. 5

Na rys. 6 pokazano zależność pomiędzy maksymalnym naprężeniem umownym (odpowiadającym największej sile) i względnym zmniejszeniu przekroju próbki w momencie zerwania. Przy punktach doświadczalnych podano temperaturę badania. Linie proste



Rys. 6

dobrane metodą minimum kwadratu błędu dobrze opisują wyniki doświadczeń w zakresie temperatur stosowanych w tej pracy. Rysunek 6a zawiera dane z badań próbek ze stali ŁH-15. Na rys. 6b pokazano wyniki dla podobnych wymiarowo próbek ze stali węglowej 4.

#### 4. Wnioski

Przy rozciąganiu próbek gładkich ze stali ŁH-15 osiągnęły one największą wytrzymałość i wydłużenie w punkcie ekstremalnym w temperaturze 300°C. Próbki z karbem rozciągane w temperaturze 300°C były słabsze niż próbki badane w temperaturze 20 oraz 400°C.

Naprężenie uplastyczniające próbki z karbem zmniejsza się ze wzrostem temperatury w zakresie od 20 do 700°C, podczas gdy dla próbek gładkich najwyższą granicę plastyczności zmierzono przy 300°C.

Naprężenie uplastyczniające pręta z karbem można opisać za pomocą współczynnika obliczonego przy założeniach teorii ciała sztywno idealnie plastycznego.

Doświadczalnie stwierdzono, że istnieje liniowa zależność między maksymalną nośnością pręta z karbem i redukcją jego przekroju przy zerwaniu w różnych temperaturach.

#### Literatura cytowana w tekście

1. L. DIETRICH, J. MIASTKOWSKI, W. SZCZEPIŃSKI, *Nośność graniczna elementów konstrukcji*, PWN, Warszawa 1970.
2. L. DIETRICH, K. TURSKI, *Doświadczalna analiza wytrzymałości prętów z karbem w niskich temperaturach*, Rozpr. Inż., 3, 20, (1972).

## Резюме

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ  
С КОЛЬЦЕВОЙ ВЫТОЧКОЙ

В работе представлено исследование влияния температуры в диапазоне от 20°C до 700°C на предел текучести стержней с V-образной выточкой. Для сравнения напряжения текучести в разных температурах приводится новое определение предела текучести. Течение наступает, когда работа, затраченная на пластическую деформацию, достигает определенной части полной работы, подсчитываемой до точки максимума силы.

## Summary

STRENGTH OF STEEL NOTCHED RODS IN TENSION  
AT HIGH TEMPERATURES

The paper deals with the influence of temperature between 20 to 700°C on the behaviour of axially-symmetric rods subject to tension. To compare the yield conditions of rods stretched at different temperatures, a new definition of the yield point is introduced. It is assumed that yielding develops when the work dissipated equals a definite fraction of the total plastic work measured up to moment of the force reaching its maximum.

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA  
KIELCE

*Praca została złożona w Redakcji dnia 6 kwietnia 1977 r.*

---