

TADEUSZ LAMBER, JÓZEF WOJNAROWSKI, BRONISŁAW HODERNY  
Katedra Mechaniki Technicznej

## PRÓBA OCENY ODPORNOŚCI RUR WIERTNICZYCH NA KRUCHE PĘKANIE

**Streszczenie.** Dla oceny odporności metali na kruche pękanie stosuje się powszechnie próby dynamicznego zginania na standardowych próbkach w obniżonych temperaturach. Temperaturę, w której zachodzi przejście ze złomu poślizgowego do kruchego nazywamy temperaturą krytyczną albo przejściową. Temperatura przejściowa uzyskana w wyniku badań próbek udarnościowych nie może bezpośrednio stanowić kryterium dla oceny przejścia w stan kruchości konstrukcji.

W pracy zastosowano metodę określenia temperatury przejściowej rur okładzinowych w oparciu o statyczne zginanie C-pierścieni z karbam, które w tym przypadku są modelem konstrukcji.

### 1. Temperatura przejściowa materiału i konstrukcji

Niezawodność działania konstrukcji jest w dużym stopniu związana z jej skłonnością do przejścia w stan kruchy. Niebezpieczeństwo pojawienia się kruchego pęknięcia można zmniejszyć przez zastosowanie odpowiedniego tworzywa i właściwy dobór cech konstrukcyjnych.

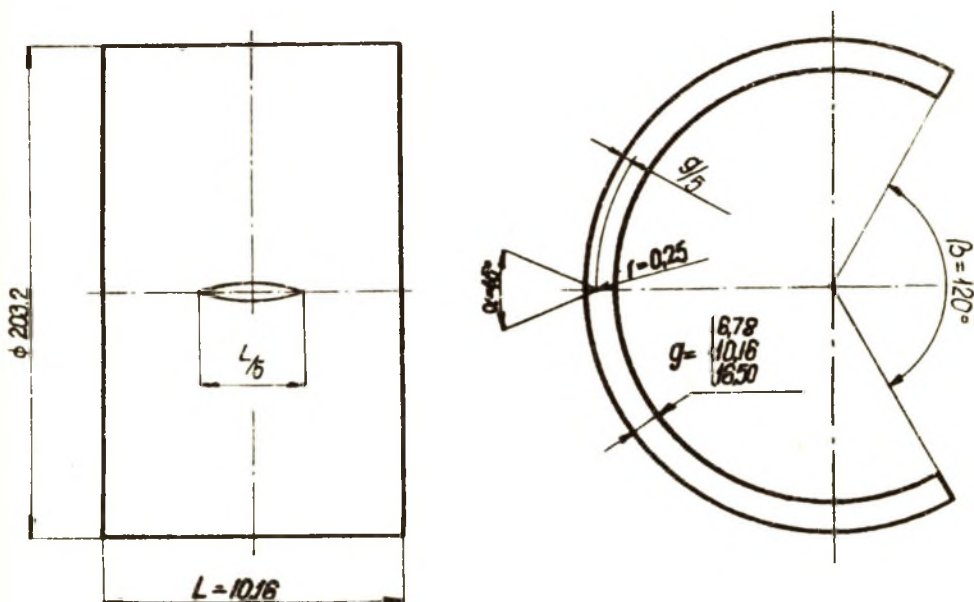
Obniżenie własności plastycznych stali łatwo można ujawnić przy spadku temperatury. Badania mające na celu wykrycie skłonności do kruchego pęknięcia przeprowadza się więc najczęściej w niskich temperaturach. Temperaturę, w której zachodzi przejście stali ze stanu plastycznego w kruchy nazywa się temperaturą przejściową lub krytyczną. Jej wartość może być miarą odporności stali na kruche pękanie, a zatem i w pewnym sensie miarą "zapasu plastyczności".

Znajomość jej pozwala rozgraniczyć dwie strefy temperatur: strefę, w której materiał wykazuje skłonność do złomu kruchego oraz strefę, w której otrzymuje się złom poślizgowy. Ostatni zakres temperatur charakteryzuje się dużym zapasem plastyczności, a więc jest najkorzystniejszy dla warunków pracy rur okładzinowych.

W przypadku określonej konstrukcji pod pojęciem temperatury przejściowej rozumiemy temperaturę krytyczną, w której następuje zniszczenie konstrukcji w postaci kruchego pęknięcia [1].

Skłonność konstrukcji do pęknięcia charakteryzujemy za pomocą zapasu plastyczności, który jest tym większy im niższa jest temperatura. Jak wykazują badania doświadczalne zależność zapasu plastyczności od temperatury jest kwadratowa, zaś od innych czynników jak staru naprężenia, szybkości obciążenia itp. - liniowa. Parametr temperatury góruje zatem nad pozostałymi czynnikami. O ile temperaturę przejściową stali określa się na ogół z prób udarności w obniżonych temperaturach (PN-63/H-84021), to skłonność konstrukcji do kruchego pęknięcia powinno się wyznaczać na obiekcie lub na jego modelu. Wynika to z faktu, że temperatura przejściowa konstrukcji jest zależna nie tylko od temperatury przejściowej materiału jako jego właściwości określonej za pomocą znormalizowanej próby udarności lecz w dużym stopniu jest funkcją cech konstrukcyjnych, wśród których istotne znaczenie ma wielkość i kształt badanej konstrukcji. Dlatego uzyskane wyniki na próbkach standardowych nie mogą być bezpośrednio wykorzystane do oceny skłonności konstrukcji do kruchego pęknięcia.

Zachodzi więc potrzeba badania kształtu i wymiarów konstrukcji (czyli tzw. efektu skali [2]) na skłonność do kruchego pęknięcia. W pracy niniejszej podjęto próbę określenia temperatury przejściowej rur wiertniczych na C-pierścieniach z odpowiednio naciętym karbem [3]. C-pierścień (rys. 1) stanowi w tym przypadku model konstrukcji, który umożliwia określenie wpływu efektu skali na temperaturę przejściową.



Rys. 1. Próbkę w kształcie C-pierścienia z soczewkowym karbem

## 2. Kruche pęknięcia rur okładzinowych

Warunki pracy rur okładzinowych przy badaniach geologicznych i eksploatacji złóż naftowych są nadzwyczaj ciężkie. Na przewody rurowe działają bowiem złożone obciążenia statyczne i dynamiczne oraz geotermiczne, zmieniające się z głębokością wierceń.

W określonych warunkach pracy rur wiertniczych w pewnym miejscu przekroju może wystąpić lokalne odkształcenie plastyczne, które na ogół nie jest równoznaczne ze zniszczeniem rury. Przy dalszym bowiem wzroście obciążenia wzrost odkształceń plastycznych w tym przekroju może być zahamowany z uwagi na współpracę warstw sąsiednich, które nie doznały jeszcze odkształceń plastycznych. Dopiero pojawienie się obciążenia granicznego, któremu odpowiada uplastycznienie całego przekroju rury, spowoduje utratę nośności konstrukcji. Z tych względów celowym jest stosowanie stali o wysokiej granicy plastyczności.

Niezależnie od tego w czasie eksploatacji zdarzają się zniszczenia kolumn wiertniczych w postaci kruchego pęknięcia, które zachodzi przy braku odkształceń plastycznych w sensie makroskopowym.

Dlatego oprócz dążenia do uzyskania wysokiej nośności konstrukcji niezwykle ważnym jest zabezpieczenie jej przed skłonnością do kruchego pęknięcia.

Kruche pęknięcie jest zjawiskiem złożonym. I mimo że znane są czynniki sprzyjające pojawieniu się kruchego pęknięcia materiału, to jednak ilościowe ujęcie tego zjawiska jest trudne.

Stosuje się więc tylko określenia częściowo ujmujące warunki, w których zachodzi proces dekohezji. Przykładem tego jest ogólnie stosowana próba udarności, która daje integralną charakterystykę szeregu różnorodnych stadiów odkształcenia i pęknięcia materiału bez uwzględnienia efektu skali. Za kryterium przejścia stali w stan kruchy przyjmuje się wtedy określony poziom udarności. I tak dla stali konstrukcyjnej ustalono krytyczną wartość udarności  $U = 1,5-3 \text{ kGm/cm}^2$ , przy której występuje niebezpieczeństwo kruchego pęknięcia.

Dla rur wiertniczych jest to niewystarczające. Zdarzają się bowiem przypadki kruchego pęknięcia rur w temperaturze, w której sama stal jako materiał rury posiada udarność określoną za pomocą standardowych próbek, znacznie powyżej wartości krytycznej. Jest to spowodowane tym, że rury reprezentują już konstrukcję i wpływ średnicy oraz grubości ścianki na temperaturę przejściową jest istotny. Ponieważ rury wykonane są ze stali ulepszonej cieplnie, wymagania w zakresie udarności powinny być odpowiednio wyższe, proporcjonalnie do granicy plastyczności stali. Istnieje więc problem ustalenia wpływu cech konstrukcyjnych rur okładzinowych oraz własności materiału na przyjęte kryterium kruchości.

W pracy przeanalizowano wpływ grubości ścianki oraz obróbki cieplnej na temperaturę przejściową rur okładzinowych.

### 3. Przyjęcie modelu rury okładzinowej

Określenie temperatury przejściowej bezpośrednio na kolumnach rur okładzinowych jest niemożliwe. Aby badania były zbliżone do warunków pracy obiektu, zamodelowano rurę C-pierścieniem (rys. 1), który swoim kształtem, grubością ścianek i stanem naprężeń wywołanym mimośrodowym zginaniem najlepiej imituje warunki rzeczywiste. Obciążenie zginające wywołuje w próbkach zmienny stosunek maksymalnego naprężenia stycznego  $\tau_{max}$  do intensywności naprężeń  $\sigma_1$  ( $\alpha = \frac{\tau_{max}}{\sigma_1}$ ), od którego zależy charakter złomu. Próba zginania dominuje więc w ocenie tworzenia się złomu kruchego [4], a tym samym w określeniu temperatury przejściowej.

Zgodnie z teorią Griffitha do zainicjowania kruchego pęknięcia konieczna jest lokalna nieciągłość materiału wywołująca koncentrację naprężeń. Taką nieciągłość tworzą wszelkiego rodzaju defekty istniejące w materiale. Odwzorowanie takich defektów w sensie makroskopowym najlepiej odtwarza karb soczewkowy przebiegający tylko do pewnej głębokości próbki [5]. Z tych względów w C-pierścieniach nacinano karb soczewkowy (rys. 1), którego wymiary uzależniono od grubości ścianki i długości C-pierścienia. Obszar sąsiadujący z krawędzią karbu jest źródłem powstania kruchego pęknięcia i to już przy obciążeniach znacznie mniejszych od granicy plastyczności.

Spiętrzenie naprężeń jest niezbędnym warunkiem na to aby powstała rysa o dostatecznej wielkości przed rozszerzeniem się obszaru plastycznego w makroobjętości ciała.

Nierównomierny rozkład naprężeń i ich koncentracja w dnie karbu soczewkowego już w pierwszej fazie zginania C-pierścienia umożliwia pojawienie się nagłego kruchego pęknięcia.

Naprężenia powstałe na dnie karbu są wyższe od granicy plastyczności materiału i wywołują rozprzestrzenianie się pęknięcia z

prędkością większą od krytycznej i nie pozwalają tym samym na plastyczną makrodeformację materiału w płaszczyźnie złomu od strony karbu.

Proces powstawania złomu może być różny. Albo powstaje duża ilość rys, które zagęszczają się w całym obszarze najmniejszego przekroju i łączą się wcześniej niż może powstać rysa o krytycznej wielkości w dnie karbu, albo też złom powstaje wskutek szybkiego rozszerzenia się jednej rysy. Ten ostatni mechanizm powstawania złomu może mieć miejsce zarówno w obszarze sprężysto plastycznym, tzn. poniżej granicy plastyczności, jak również powyżej tej wartości [6]. W trakcie rozprzestrzeniania się pęknięcia rośnie współczynnik stanu naprężenia  $\alpha$  przy równoczesnym spadku prędkości rozprzestrzeniania się pęknięć poniżej prędkości krytycznej. Część złomu odpowiadająca temu pęknięciu posiada charakter plastyczny.

#### 4. Materiał i sposób przygotowania próbek

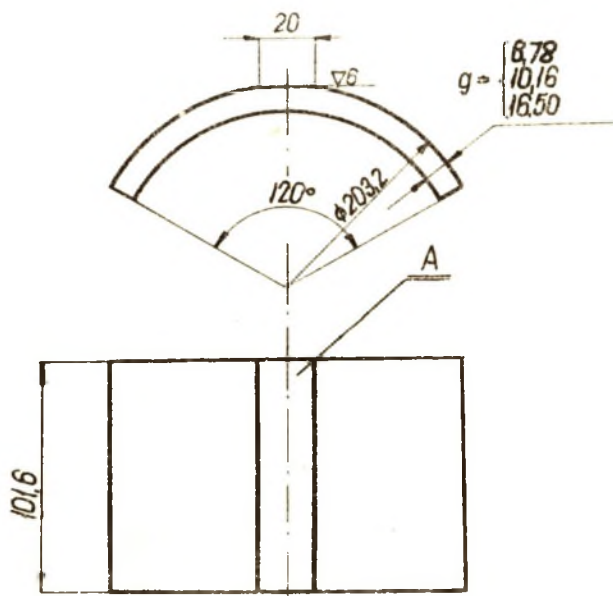
Materiałem wyjściowym przeznaczonym na próbki były tuleje wykonane ze stali 30G2. Tuleje te ulepszono cieplnie dla uzyskania trzech poziomów granicy plastyczności. Warunki obróbki cieplnej zestawiono w tabelicy 1. Z tulei wykonano pierścienie o średnicy  $\varnothing$  203,2 i długości 101,6 mm w trzech seriach o następujących grubościach ścianek 6,78 mm, 10,16 mm oraz 16,5 mm. Z pierścieni wycięto segmenty o kącie środkowym  $120^\circ$  oraz nacięto karb soczewkowy w płaszczyźnie symetrii C-pierścienia od strony zewnętrznej (rys. 1). Odchyłki wymaganych wartości w odniesieniu do średnicy i grubości ścianki nie przekraczały odpowiednio  $\pm 0,25$  i  $\pm 0,1$  mm.

Przygotowane próbki w kształcie C-pierścieni z karbem w ilości 90 sztuk przeznaczono do badań statycznego zginania w obniżonych temperaturach. Wycięte segmenty służyły jako próbki do pomiaru twardości (rys. 2).

Tablica 1

Zestawienie parametrów obróbki cieplnej próbek ze stali 30G2

Lp.	Oznaczenie C-pierścieni	Hartowanie			Odpuszczanie		
		temperatura °C	czas w min.	ośrodek chłodz.	temperatura °C	czas w min.	ośrodek chłodz.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1 ÷ 20	840	40	woda	540-560	60	powietrze
2	21 ÷ 40	840	40	woda	590-610	60	powietrze
3	41 ÷ 60	840	40	woda	640-660	60	powietrze



Rys. 2. Wycięty segment z pierścienia

A - powierzchnia przystosowana do pomiaru twardości

Celem przeprowadzenia próby rozciągania, pobrano próbki z tulei w kierunku wzdłużnym i poprzecznym. Do badań udarności wykonano próbki typu Charpy V (120 sztuk) i Mesnager (40 sztuk). Oś karbu próbek udarnościowych była równoległa do osi walcowania.

## 5. Sposób i zakres przeprowadzonych badań

### 5.1. Próba statycznego rozciągania

W celu określenia własności mechanicznych i plastycznych przeprowadzono próbę statycznego rozciągania. Próba ta miała również na celu sprawdzenie, czy zastosowane temperatury odpuszczania zapewniły poziomy granicy plastyczności, jakie są wymagane dla poszczególnych gatunków rur. Szczegółowe wyniki zestawiono w tablicy 2.

### 5.2. Próby udarności

Próby udarności miały na celu:

- ustalenie temperatury przejściowej dla stali 30G2;
- kontrolę obróbki cieplnej;
- porównanie wyników badań na próbkach typu Charpy V i Mesnager U;
- porównanie temperatury przejściowej materiału i C-pierścieni.

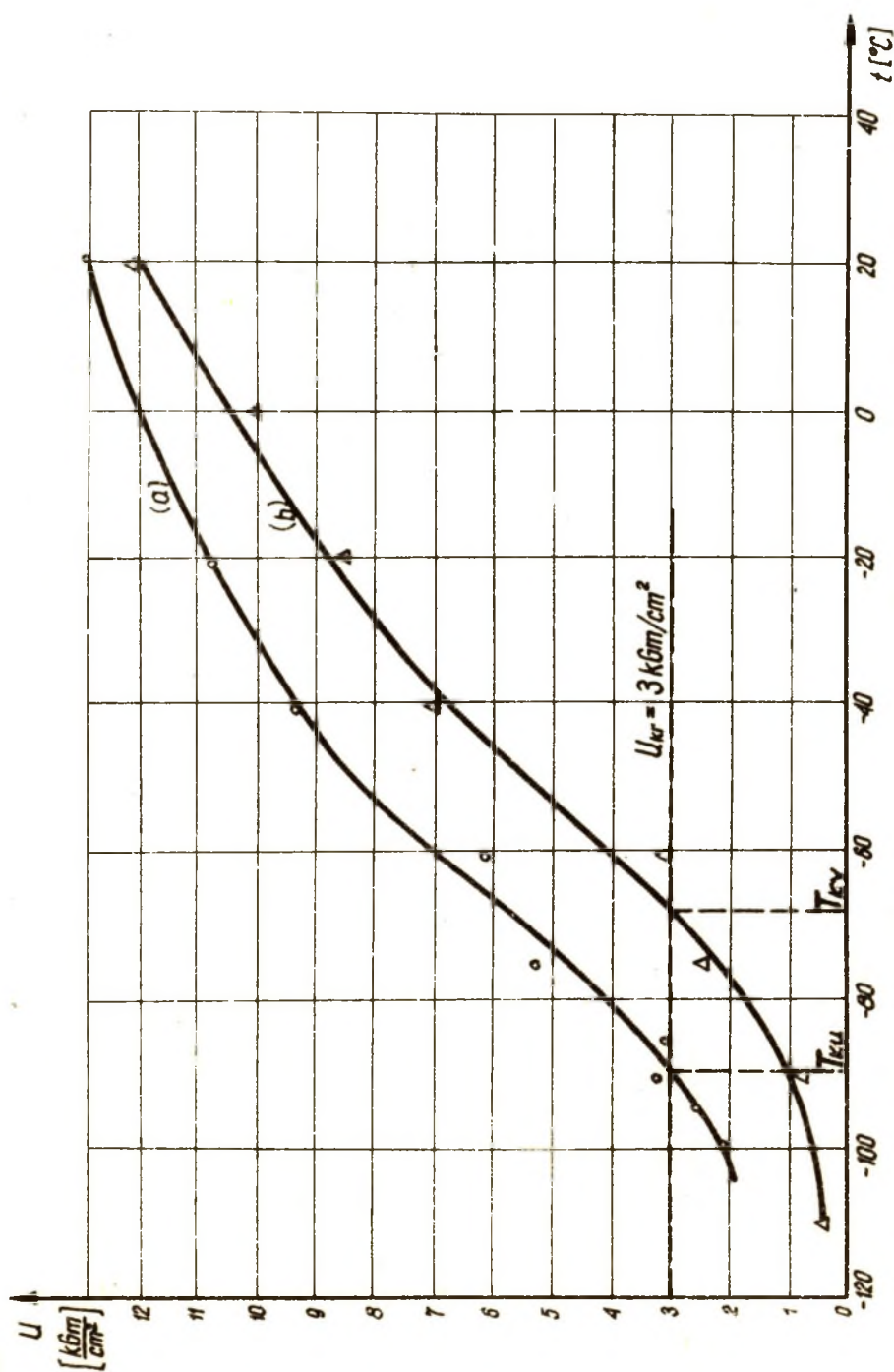
Próby udarnościowe przeprowadzono zgodnie z normą PN/H-04371 na młocie wahadłowym o zakresach 15 i 30 kGm. W każdej temperaturze badania zamano co najmniej 6 próbek. Obniżone temperatury uzyskiwano podobnie jak przy C-pierścieniach. Udarność stali w funkcji temperatury badania dla temperatury odpuszczania 540-560°C przedstawiono na rysunku 3.



Tablica 2

Własności mechaniczne stali 30G2

Lp.	Temperatura odpuszczenia °C	Gatunek rur	d <sub>o</sub> mm	R <sub>e</sub> śr			R <sub>m</sub> śr kg/mm <sup>2</sup>	$\frac{R_e \text{ śr}}{R_m \text{ śr}}$	A <sub>5</sub> %	Z %
				uzyskana. kg/mm <sup>2</sup>	wymaga- na kg/mm <sup>2</sup>	6				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	540 - 560	P110	5,0	80,9	77,3	89,6	0,90	19,9	51,9	
2	590 - 610	N80	5,0	56,7	56,2	69,6	0,81	25,1	68,5	
3	640 - 660	E	5,0	51,3	52,7	67,8	0,80	27,0	70,8	



Rys. 3. Sposób wyznaczenia temperatury przejściowej dla stali 30G2, na próbkach typu Messner (a) i Charpy V (b)

### 5.3. Próby zginania C-pierścieni

C-pierścienie poddano próbie statycznego zginania trwającej od 15-30 sekund, na maszynie firmy VEB Werkstoffprüfmaschinen o zakresie 30000 kG przy nastawieniu siłomierza na 5000 i 15000 kG.

Badania prowadzono przy różnych temperaturach.

Celem uzyskania obniżonych temperatur C-pierścienie zamurzano w alkoholu znajdującym się w zbiorniku o podwójnych ściankach.

Żądane temperatury badań uzyskiwano poprzez dozowanie stałego dwutlenku węgla, a w zakresie temperatur od  $-70^{\circ}\text{C}$  do  $-110^{\circ}\text{C}$  przez wprowadzenie do kąpieli ciekłego azotu. Czas wytrzymywania C-pierścieni w kąpieli o określonej temperaturze dla ustalenia się ich stanu termicznego wynosił 15 minut. Temperatury badania poszczególnych pierścieni utrzymywane były z dokładnością  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Przykładowe wykresy z przeprowadzonych prób przedstawiono na rysunkach 4, 5 i 6.

### 5.4. Próby twardości

Badania twardości miały na celu kontrolowanie własności mechanicznych badanego materiału, a zarazem pozwoliły wykluczyć ewentualne pomyłki wynikiłe w czasie obróbki cieplnej. Pomiar twardości przeprowadzono metodami Brinella i Rockwella. Średnie twardości oraz względne ich odchyłki standardowe dla poszczególnych serii C-pierścieni zestawiono w tabelicy 3.

### 6. Analiza wyników badań

Na podstawie prób udarności wykreślono krzywe przejściowe (rys. 3) badanej stali. Poszczególne punkty krzywych reprezentują średnie arytmetyczne wyników z 6 próbek łamanych w danej temperaturze. W zasadzie badania udarności przeprowadzono na próbkach Charpy V z uwagi na lepszą przydatność tej próby do badań w niskich tem.

Tablica 3

Zestawienie średnich wartości twardości  
i względnych odchyłek standardowych

Ip.	Ilość próbek	Ilość pomiarów na jednej próbce		Temperatura odpuszczania °C	Twardości średnie		Względne odchyłki standardowe	
		NB	HRC		HB	HRC	WHB %	WHRC%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	30	5	30	540-560	273	28,1	1,5	5,8
2	30	5	30	590-610	230	22,2	3,4	5,4
3	30	5	30	640-660	197	16,8	1,7	7,1

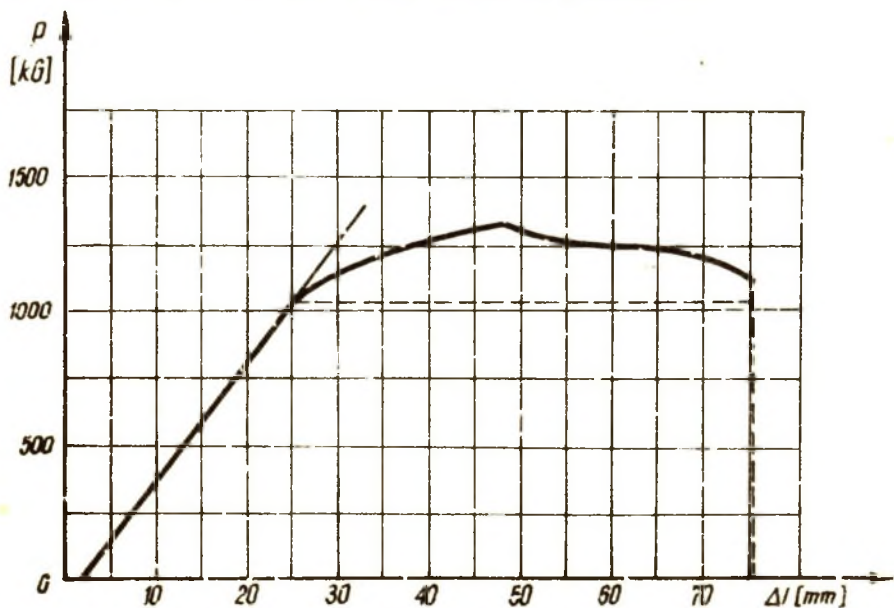
Tablica 4

Zestawienie temperatur przejściowych

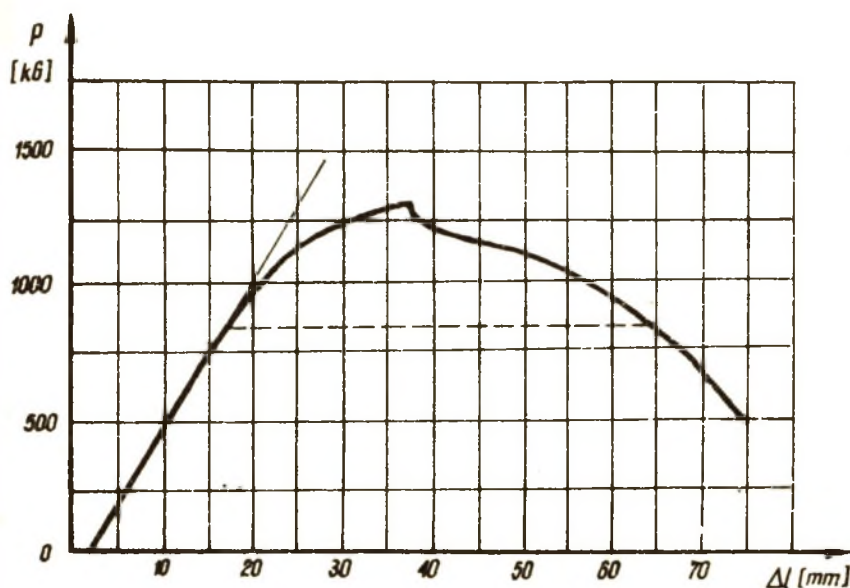
Temp. odpuszczenia °C	Rodzaj próbek	C-pierścien, D <sub>Z</sub> = 203,2 mm						Próbki udarowości 55x10x0,8	
		g = 6,78 mm		g = 10,16 mm		g = 16,5 mm		Charpy	Mesnager
		T <sub>ko</sub> °K	T <sub>kz</sub> °K	T <sub>kp</sub> °K	T <sub>kz</sub> °K	T <sub>kp</sub> °K	T <sub>kz</sub> °K	V	U
540 ÷ 560		206,5	198,5	225,0	216,5	244,0	240,5	207	183
590 ÷ 610		199,5	195,5	217,0	215,0	232,5	228,0	201	-
640 ÷ 660		188,5	188,0	205,5	208,0	225,0	225,0	195	-

naturach [7]. Tym niemniej dla porównania przeprowadzono również próby udarności na próbkach Mesnager. Za kryterium przejścia stali w stan kruchy przyjęto wartość udarności równą  $3,0 \text{ kGm/cm}^2$ . Prosta odpowiadająca poziomowi tej udarności w punktach przecięcia z krzywymi przejściowymi wyznacza temperatury przejściowe badanej stali (tabl. 4). Z wykresu (rys. 3) widoczny jest wpływ kształtu karbu na temperaturę przejściową materiału. Krzywa b uzyskana z badań na próbkach Mesnager wyznacza niższą temperaturę przejściową niż analogiczna krzywa uzyskana na próbkach typu Charpy V. Tłumaczy się to tym, że ostry karb stwarza lepsze warunki powstawania kruchej pęknięcia.

Z uzyskanych wykresów statycznego zginania C-pierścieni w obniżonych temperaturach wynika, że przejście od złomu poślizgowego do kruchej związane jest ze znacznym zmniejszeniem się ugięcia C-pierścieni. Np. na rysunku 4 przedstawiony jest wykres ugięcia C-pierścienia, który nie uległ kruchemu pęknięciu.



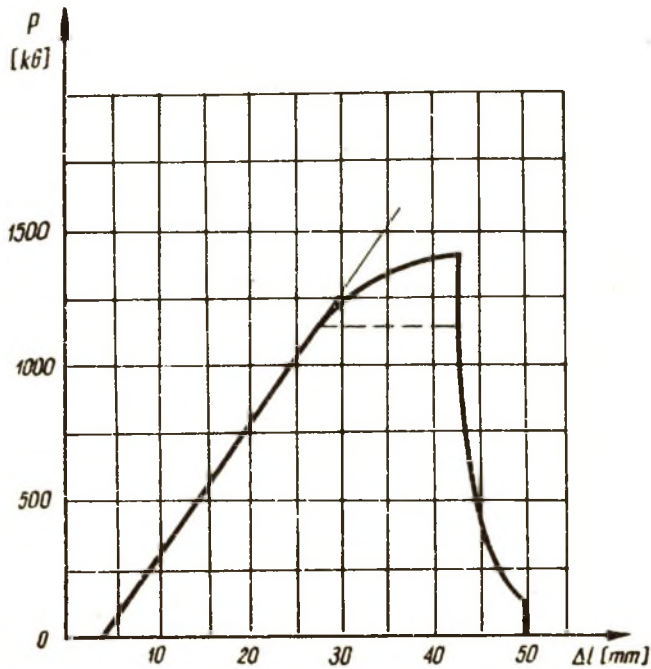
Rys. 4. Zmiana siły w funkcji ugięcia C-pierścienia nr 3, zginanego w temperaturze  $-35^{\circ}\text{C}$



Rys. 5. Zmiana siły w funkcji ugięcia C-pierścienia nr 5, zginanego w temperaturze  $-55^{\circ}\text{C}$

Rysunek 5 przedstawia wykres ugięcia C-pierścienia, w którym powstało kruche pęknięcie, ale dzięki znacznemu zapasowi plastyczności metalu pęknięcie to zostało zatrzymane. Rysunek 6 przedstawia wykres ugięcia C-pierścienia, który uległ pęknięciu na dwie części wskutek powstania i rozprzestrzeniania się pęknięcia. Zjawisko to jest wynikiem zanikania odkształceń plastycznych z obniżeniem temperatury badania i sugeruje, że w ocenie temperatury przejściowej dominującą rolę odgrywa zachowanie się materiału w obszarze odkształceń sprężysto-plastycznych. Jak długo bowiem istnieje pewien zakres złomu poślizgowego, tak długo wydłużenia plastyczne osiągają znaczne wartości i są one równe maksymalnemu granicznemu ugięciu, które odpowiada zetknięciu się końców pierścienia. W pewnej temperaturze, przy określonej wartości obciążenia, powstały na dnie karbu stan naprężenia powoduje, że prędkość

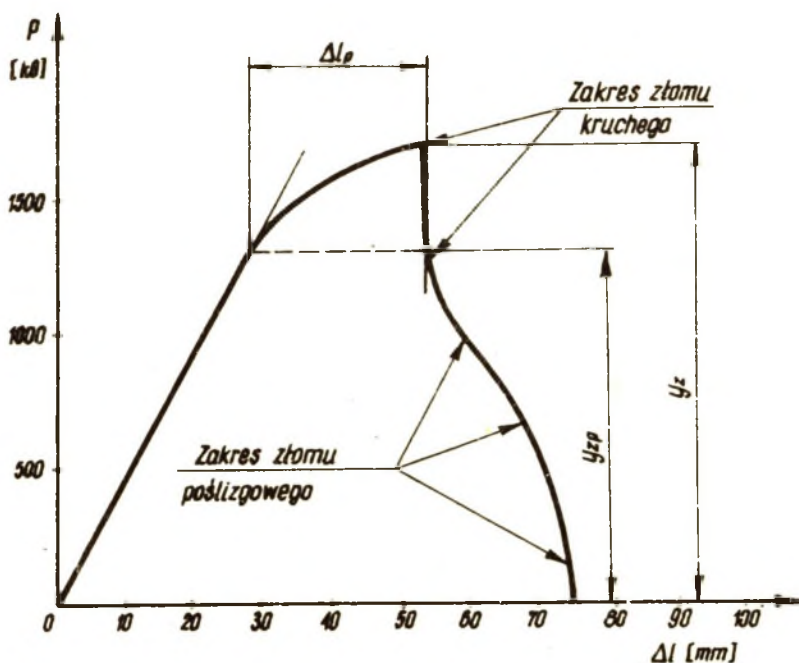
rozprzestrzeniania się mikropęknięć przewyższa prędkość odkształcenia plastycznego i w tej fazie powstaje złom kruchy (rys. 7).



Rys. 6. Zmiana siły w funkcji ugięcia C-pierścienia nr 8, zginanego w temperaturze  $-86^{\circ}\text{C}$

Na wykresie uwidacznia się to nagłym spadkiem obciążenia (rys. 5 i 6). Powoduje to z kolei zatrzymanie swobodnego rozprzestrzeniania się pęknięcia i dalszy proces powstawania złomu jest wymuszony siłą zginającą C-pierścień. W tej fazie powstaje złom poślizgowy, któremu odpowiada znaczne odkształcenie plastyczne. Wynika stąd, że właściwą oceną ciągliwości i własności plastycznych może być tylko ta część ugięcia C-pierścienia, która zachodzi powyżej granicy proporcjonalności, ponieważ uwzględnia ważną cechę materiału związaną z zainicjowaniem i rozprzestrzenianiem się pęknięć. Za miarę tej oceny można przyjąć ugięcie  $\Delta l_p$  (rys. 7), wy-





Rys. 7. Zakresy złomu odpowiadające poszczególnym fazom zginania C-pierścienia

znaczone odcinkiem od granicy proporcjonalności do punktu, w którym siła osiągnie ponownie wartość odpowiadającą tej granicy [3][8]

Za miarę zapasu plastyczności można przyjąć następujące wyrażenie

$$a_p = \frac{\Delta l_p}{D_z} \cdot 100\%, \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta l_p$  oznacza odcinek obrazujący ugięcie C - pierścieni o średnicy zewnętrznej  $D_z$  (rys. 7).

Z uzyskanych wykresów zginania C-pierścieni w zakresie obniżonych temperatur wyznaczono wartości  $a_p$ . Następnie sporządzono wykresy zależności zapasu plastyczności  $a_p$  od temperatury. Wykresy

przejściowe dla poszczególnych grubości C-pierścieni przedstawiono na rysunkach 8, 9 i 10.

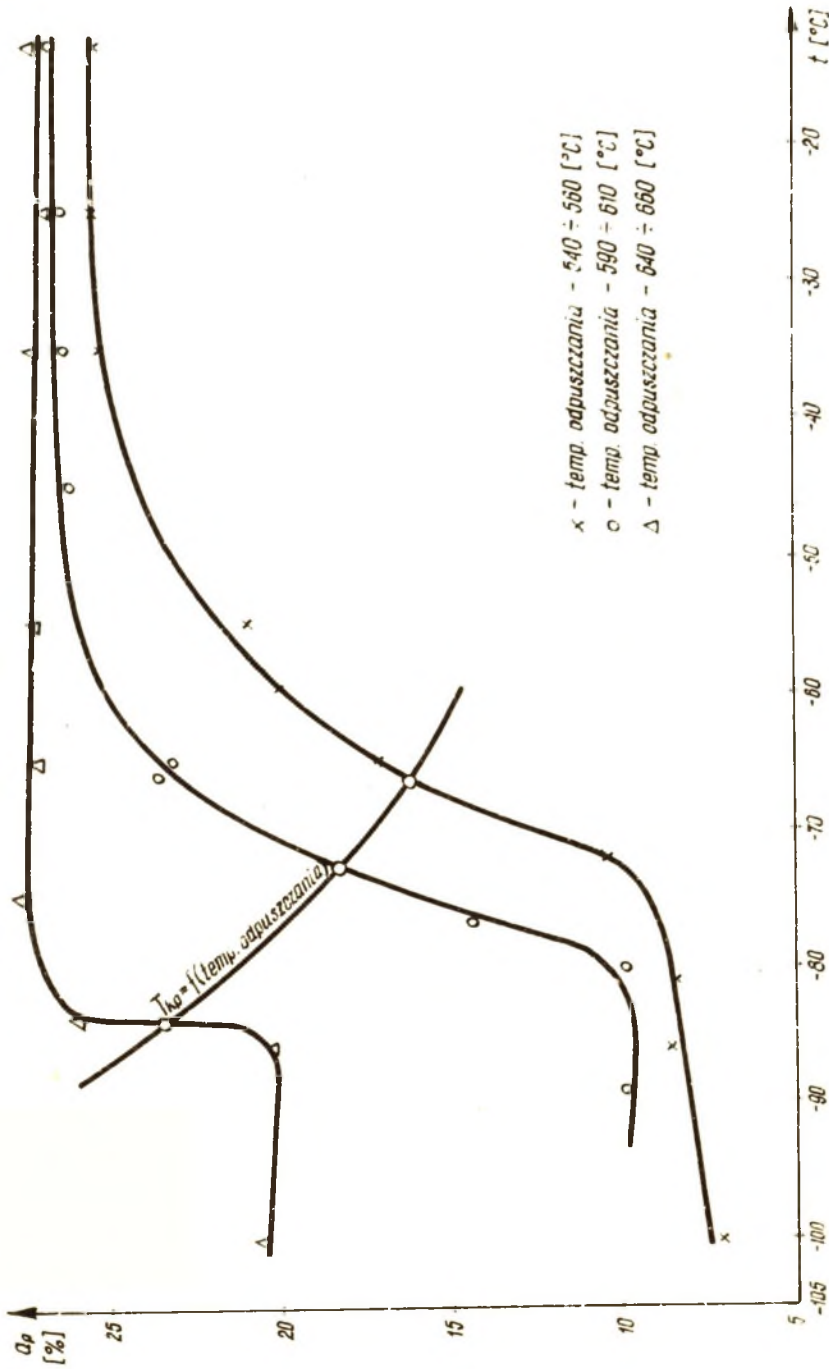
Z wykresów  $a_p = f(t)$  można wyznaczyć temperaturę przejściową dla rur, charakteryzującą przejście od złomu poślizgowego do złomu kruchego. Wartość tej temperatury określono przyjmując za kryterium tę temperaturę, która odpowiada średniej z maksymalnej i minimalnej wartości zapasu plastyczności  $a_p$ . Taki sposób określenia temperatury przejściowej jest konieczny z uwagi na małą liczebność prób. Dla dużej populacji próbnej temperaturę przejściową można wyznaczyć drogą różniczkowania wykresu  $a_p = f(T)$ . Ekstremum funkcji  $\frac{d a_p}{d T} = f(T)$  określa w sposób ścisły temperatury przejściowe. Wykreślną konstrukcję przykładowo przedstawiono na rysunku (11a,b).

Na wykresach temperatur przejściowych rur można wyróżnić górną  $T_{kp}^g$  i dolną  $T_{kp}^d$  temperaturę przejściową (rys. 11). Od dolnej temperatury krytycznej w kierunku malejących temperatur powstaje złom wyłącznie kruchy, któremu odpowiada pęknięcie C-pierścieni na dwie części (rys. 6). W literaturze temperatura ta nazywana jest temperaturą przejściową dla zerowej plastyczności i oznaczana jest przez NDT (nil ductility transition temperature).

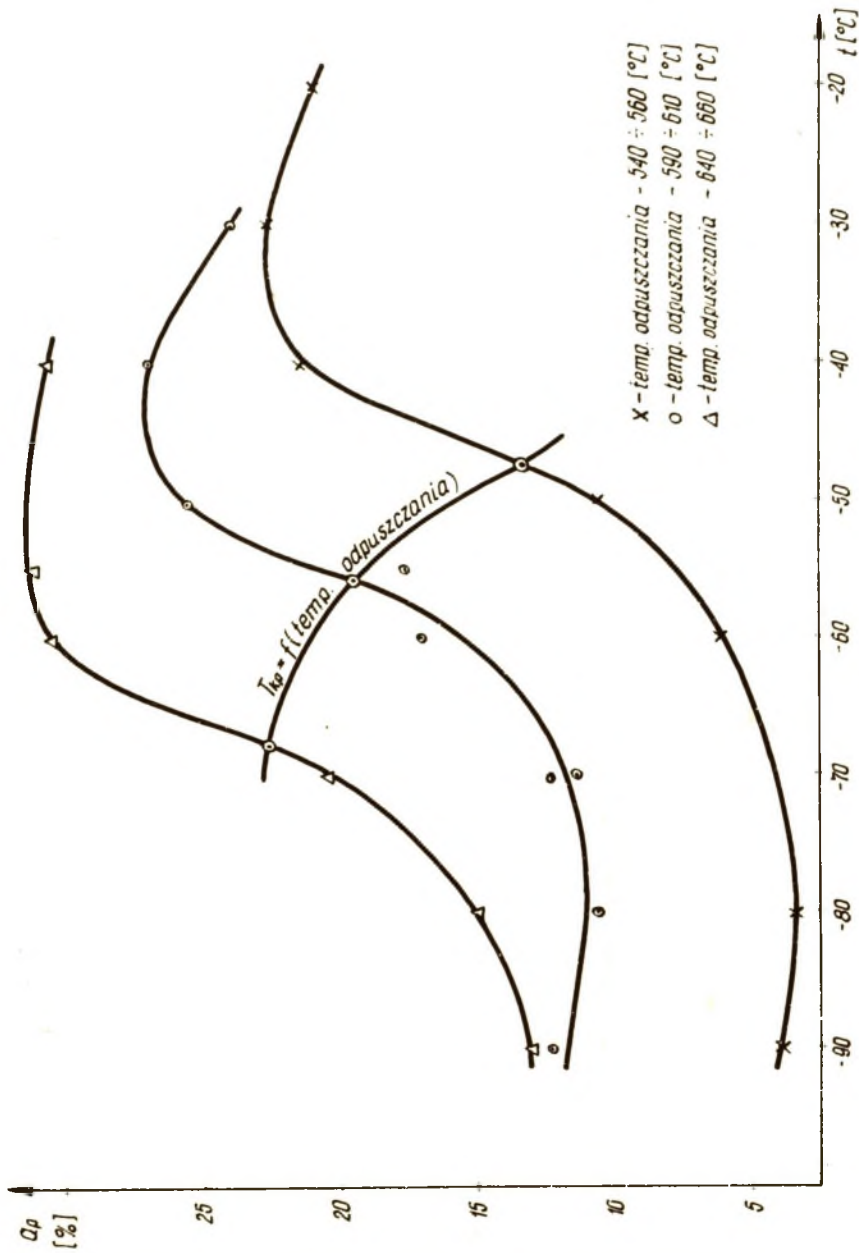
Zbliżone wyniki do podanej metody wyznaczania temperatury przejściowej uzyskuje się z określenia złomu poślizgowego na podstawie wykresu zginania C-pierścieni (rys. 7). Procentową wartość złomu poślizgowego można określić jako stosunek rzędnej odpowiadającej złomowi poślizgowemu do rzędnej odpowiadającej początkowi powstawania złomu kruchego [8]:

$$Z_p = \frac{Y_{zp}}{Y_z} \cdot 100\% \quad (2)$$

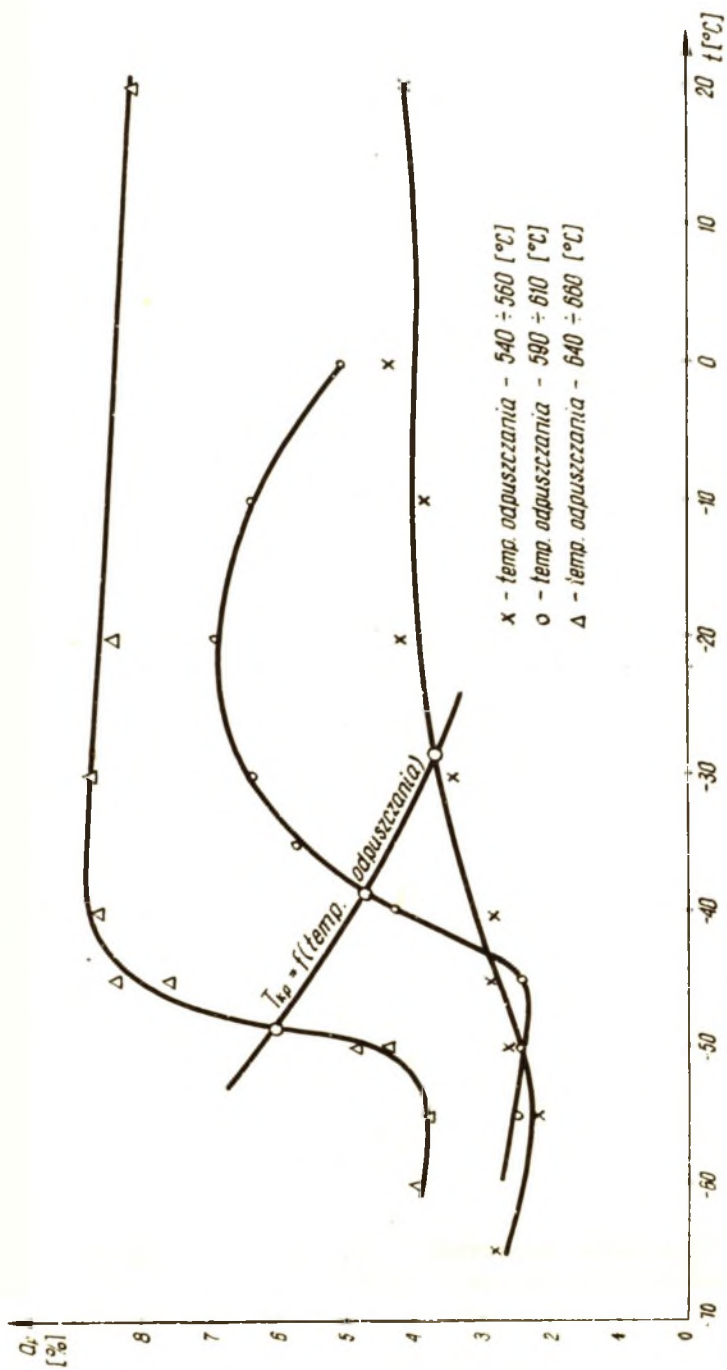
Z uzyskanej w ten sposób charakterystyki złomu poślizgowego można wyznaczyć temperaturę przejściową posługując się konstrukcją przykładowo przedstawioną na rysunku 12.



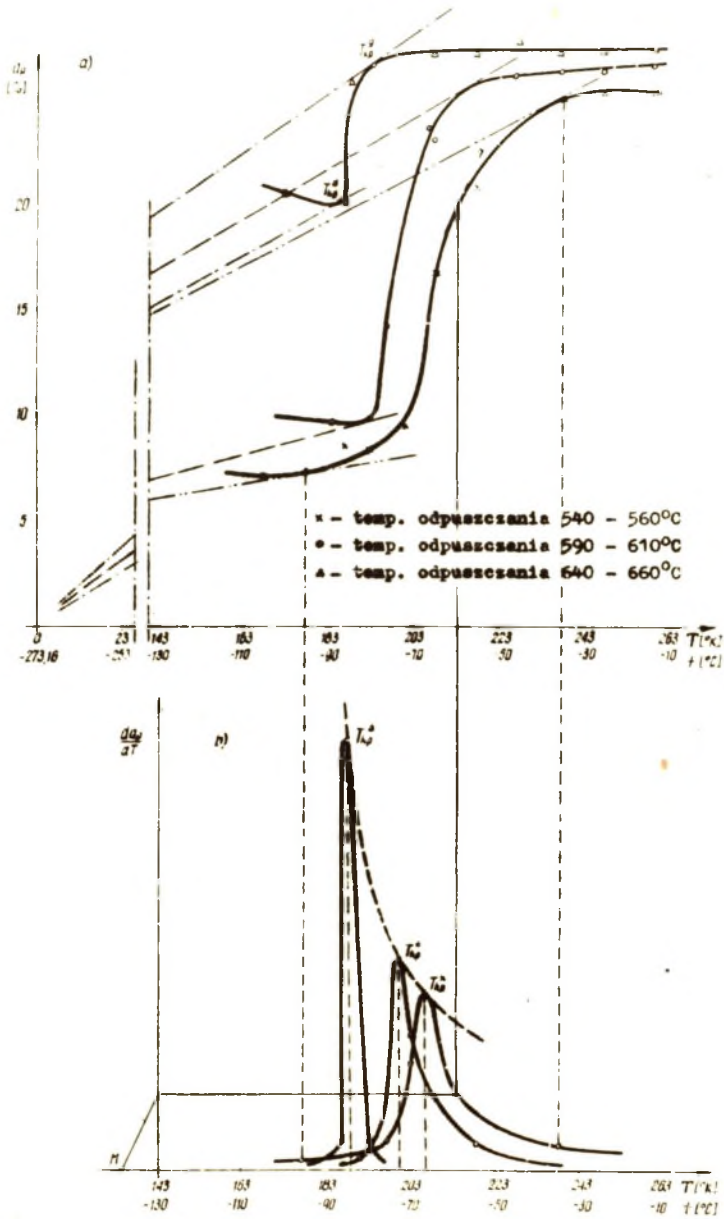
Rys. 8. Temperatura przejściowa rur o  $g = 6,78$  mm w funkcji temperatury badania i temperatury odpuszczenia



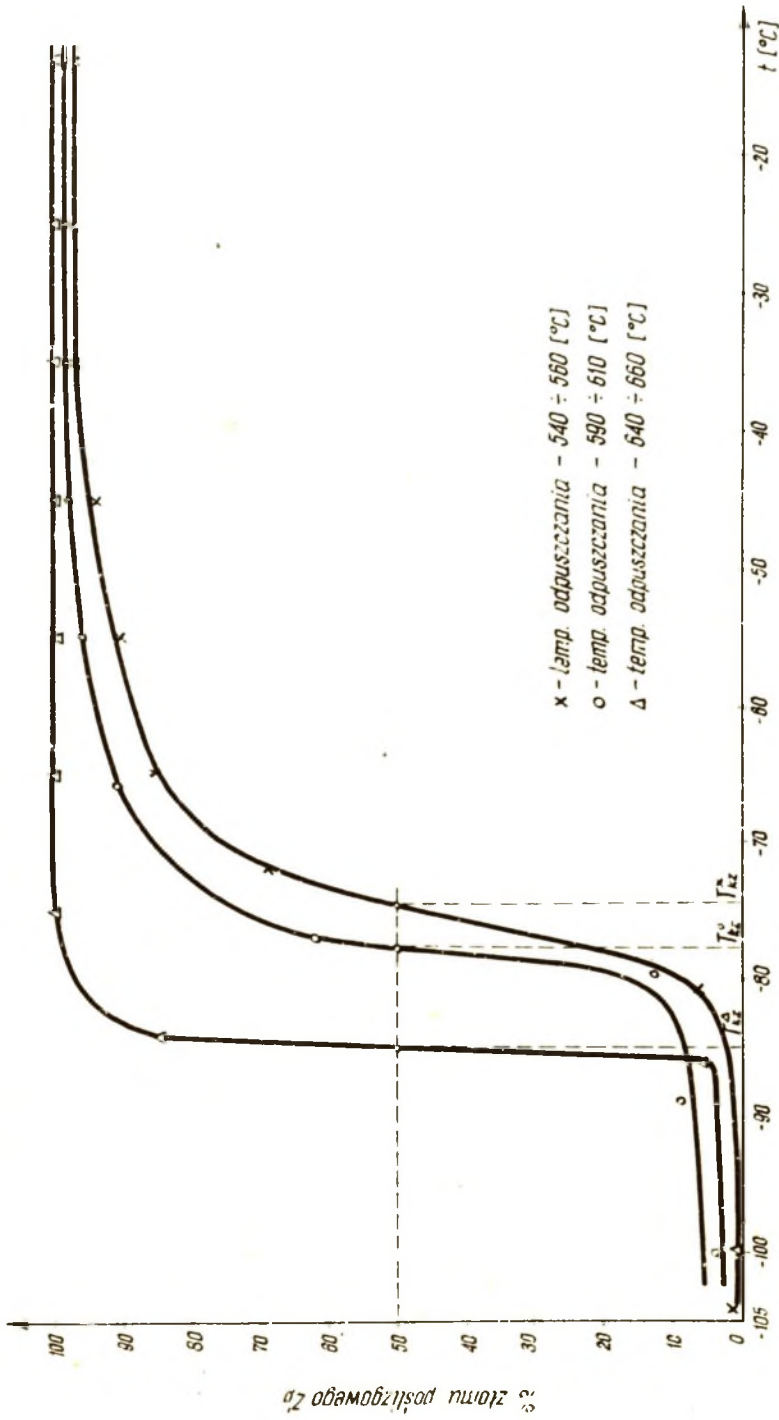
Rys. 9. Temperatura przejściowa rur o  $g = 10,16$  mm w funkcji temperatury badania i temperatury odpuszczania



Rys. 10. Temperatura przejściowa rur o  $g = 16,6$  mm w funkcji temperatury badania i temperatury odpuszczenia

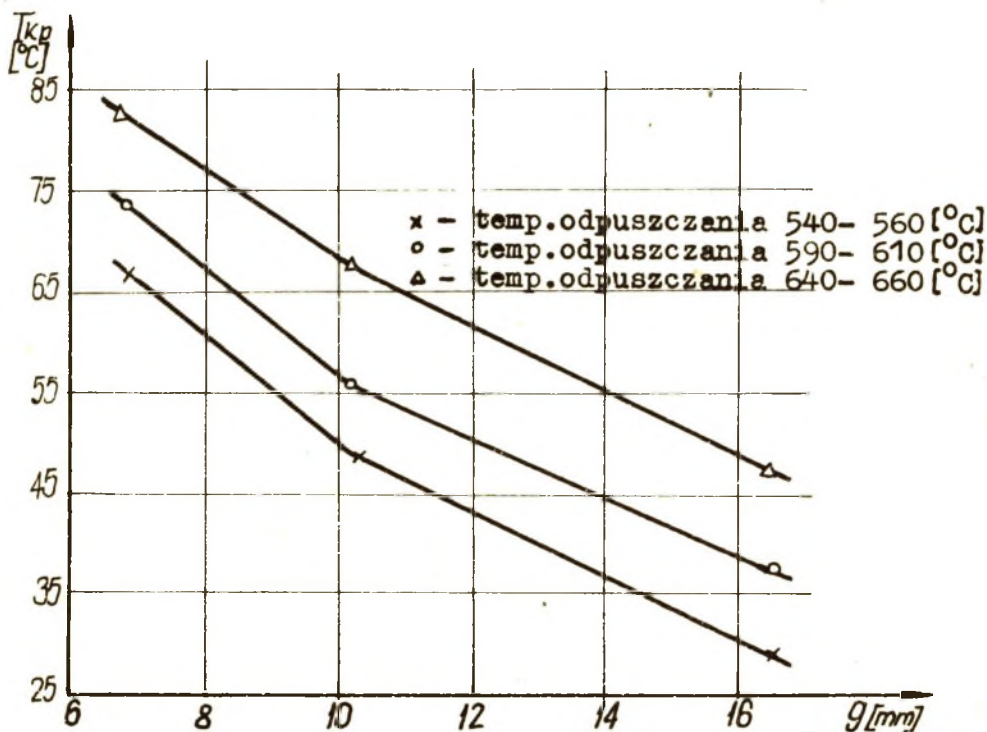


Rys. 11. Wykreślna konstrukcja wyznaczenia temperatury przejściowej metodą różniczkowania wykresów  $v_g = f(T)$



Rys. 12. Sposób wyznaczania temperatury przejściowej na podstawie złomu poślizgowego  $Z_p$  określonego z wykresów zginania C-pierścieni

Uzyskane różnymi metodami temperatury przejściowe dla trzech temperatur odpuszczania i dla trzech grubości C-pierścieni zestawiono w tabelicy 4.



Rys. 13. Zależność temperatury przejściowej  $T_{kp}$  w funkcji grubości ścianki rury i temperatury odpuszczania

Dla zobrazowania wpływu grubości C-pierścieni i temperatury odpuszczania na temperaturę przejściową sporządzono wykresy, które przedstawione są na rysunku 13. Z wykresów tych widoczny jest duży wpływ grubości ścianki rury na temperaturę przejściową.

Przykładowo: dla temperatury odpuszczania  $540-560^{\circ}\text{C}$ , w C-pierścieniach o grubości  $g = 16,5$  mm pojawiły się pęknięcia już w temperaturze otoczenia, podczas gdy dla C-pierścieni o grubości



$g = 6,78$  mm cechy te występowały dopiero w temperaturze  $-40^{\circ}\text{C}$ . Jeżeli skłonność do kruchego pękania rur o małej grubości ścianki ( $g < 7$  mm) można określić temperaturę przejściową materiału uzyskaną z prób udarności, to dla rur o grubości ścianek  $g > 7$  mm jest to niewystarczające. Dla takich rur temperaturę przejściową należy określać wyłącznie na modelach np. C-pierścieniach.

W miejsce zapasu plastyczności można wprowadzić tak zwany temperaturowy współczynnik plastyczności  $a_T$ , obliczany z zależności

$$a_T = \frac{T_0 - T_{kp}}{T_0}, \quad (3)$$

gdzie:

$T_0$  - temperatura pracy konstrukcji w  $^{\circ}\text{K}$ ,

$T_{kp}$  - temperatura przejściowa (krytyczna) w  $^{\circ}\text{K}$ .

Przyjmując, że w czasie eksploatacji rur temperatura może obniżyć się do  $-30^{\circ}\text{C}$ , wyznaczono wartości współczynnika  $a_T$  dla temperatury krytycznej  $T_{kr} = T_{kp}$ . Wyniki zestawiono w tabelicy 5. Dodatnia wartość współczynnika temperaturowego  $a_T$  oznacza, że rury pracujące w danej temperaturze posiadają duży zapas plastyczności, a zatem nie będą wykazywać skłonności do złomu kruchego, co może wystąpić w przypadku ujemnej jego wartości.

Współczynnik ten, podobnie jak temperatura przejściowa, charakteryzuje skłonności rur okładzinowych do przejścia w stan kruchy. W rzeczywistości wielkości  $T_{kp}$  i  $a_T$  charakteryzują w szerszym sensie własności rur, a mianowicie określają ich zapas plastyczności, który może być wyczerpany nie tylko obniżeniem temperatury, lecz prędkością obciążenia, stanem naprężenia, działaniem karbu i innymi czynnikami.

Tablica 5

Porównanie temperatur przejściowych  $T_{kp}$   
z temperaturowym współczynnikiem plastyczności  $a_T$

Rodzaj próbki Temp. odpuszczenia °C	C-pierścień, $D_z$ 203,2 mm					
	g = 6,78 mm		g = 10,16 mm		g = 16,5 mm	
	$T_{kp}$ °K	$a_T$	$T_{kp}$ °K	$a_T$	$T_{kp}$ °K	$a_T$
540 - 560	206,5	0,15	225,0	0,07	244,0	-0,004
590 - 610	199,5	0,18	217,0	0,11	232,5	0,04
640 - 660	188,5	0,22	205,5	0,15	225,0	0,07

## 7. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań nasuwają się następujące wnioski:

1. Dla pełnego określenia odporności rur okładzinowych na pękanie należy oprócz granicy plastyczności podawać ich temperaturę przejściową.

2. Wyniki uzyskane z prób udarności nie są miarodajne dla pełnej oceny odporności rur na obciążenia dynamiczne.

3. Temperatura przejściowa rur maleje ze wzrostem grubości ścianek i można ją uzyskać na podstawie badań na modelu.

4. Określenie temperatury przejściowej rur okładzinowych można uzyskać na podstawie wykresów zginania C-pierścieni z karbem. Metoda ta wydaje się najbardziej właściwa ponieważ uwzględnia efekt skali oraz odkształcenia plastyczne powyżej granicy proporcjonalności, które są związane z powstawaniem i propagacją pęknięcia.

5. Wyznaczona temperatura przejścia z prób zginania C-pierścieni, może stanowić podstawę do badania jakości i klasyfikacji rur wiertniczych w zależności od warunków eksploatacji.

6. Przeprowadzenie selekcji rur w oparciu o próby zginania C-pierścieni w obniżonych temperaturach, pozwoli z dużym poziomem ufności na wykluczanie rur, które na skutek kruchego pęknięcia mogą być przyczyną zniszczenia otworu wiertniczego.

7. Ze względu na znaczny koszt przedstawionych badań można byłoby prowadzić selekcję rur wiertniczych za pomocą prób udarnościowych pod warunkiem, że krytyczny poziom udarności oraz temperaturę badania ustalać się będzie w oparciu o próbę zginania C-pierścieni.

#### LITERATURA

- [1] Lagasse P.E.: Mesure de la fragilite des aciers par less assa is de flexion dynamique, Revue de la Soudure, Nr 2, 1961 r.
- [2] Zakrzewski M.: Hipoteza złomu kruchego, PWN Wrocław 1958 r.
- [3] Report of Task Group on Physical Properties API Pipe Manufacturers Subcommittee, Appendix C, 1959 r.
- [4] Matwiejew J.M.: Ocena skłonności k chrupkemu rozruszeniu po ispitaniu obrazcow na wniecentriennoje roztiażenije. Zawod-skaja Laboratoria Nr 4 1967 (str. 7).
- [5] Irwin G.R.: Trans ASME seria E 1962 nr 4, str. 53.
- [6] Nemeč J.: Statyczna wytrzymałość wielkich elementůw stalowych przy niźszych temperaturach materiału. Rozprawy Inżynierskie - t. 13, Nr 3, 1966 r. - str. 455-473.
- [7] Wolberg J.L.: Plastikzeskaja deformacija pri razruszenii obraz-cow primieniajemnych dla ocenki chrupkoj procznosti. Zawoskaja Laboratoria Nr 1, 1965 r.
- [8] Lamber T.; Wojnarowski J.: Określenie zapasu plastyczności rur okładzinowych metodą Phillipsa. Ref. wstępny-NB-65, 1966 r.

## ПОПЫТКА ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ХРУПКИМ РАЗРУШЕНИЯМ

### Р е з ю м е

Для оценки сопротивления металлов хрупким разрушениям применяются в основном испытания на ударный изгиб стандартного образца при пониженной температуре. Температура, при которой происходит переход из вязкого излома в хрупкий, называется критической или температурой перехода. Температура перехода полученная в результате исследований стандартных образцов, не может непосредственно являться критерием для оценки перехода в хрупкое состояние конструкции.

В работе применён метод определения критической температуры бурильных труб, основанный на статическом изгибе C - колец с надрезом, которые являются моделью конструкции.

## ESTIMATION TEST OF DRILLING TUBES RESISTANCE TO BRITTLE FRACTURES

### S u m m a r y

In order to estimate the metals resistance to brittle fractures there has been applied generally a test of dynamic bending by means of standard specimens in lowered temperatures. This temperature which is a cause of a passage from the skidding scrap to the brittle one has been called a critical or transistory temperature.

Transistory temperature resulting from the impact strength test can't be a criterion for the estimation of a structure passage into the state of fragility. In the paper the method of determining transistory temperature has been applied, depending on static bending of C-rings with a notch, which in this case are the structure models.