

WPLYW CYKLICZNYCH ZMIAN TEMPERATURY W ZAKRESIE 293K-77K NA WŁASNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH MIEDZI MOB I STALI 1H18N9T

WIESŁAW OŚWIĘCIMSKI
BOGUMIŁA KUŹNICKA
JAN SZPIL

*Instytut Mater. i Mech Techn.
Politechniki Wrocławskiej*

Wykaz oznaczeń

$\sigma_T^I, \sigma_T^{II}, \sigma_T^{III}, \sigma_T^R$	— chwilowe wartości zmiennych naprężeń cieplnych odpowiednio pierwszego, drugiego i trzeciego rodzaju oraz wywołanych reakcjami więzów,
σ_{max}	— maksymalna wartość naprężeń pochodzących od zmiennej siły rozciągającej,
N_T	— liczba cykli zmian temperatury w przypadku czystego zmęczenia cieplnego,
N_{TM}	— liczba cykli zmian temperatury w przypadku zmęczenia cieplno-mechanicznego,
T	— temperatura,
t_T, t_{TM}	— czas trwania 1 cyklu zmęczenia cieplnego i cieplno-mechanicznego,
α_{sp}	— współczynnik osłabienia spoiną (równy ilorazowi R_m próbek spawanych i R_m materiału rodzimego).

1. Zagadnienie niskotemperaturowego zmęczenia cieplnego

Zmęczeniem cieplnym niskotemperaturowym nazywane jest zjawisko powstawania i rozwoju uszkodzeń w materiale wskutek cyklicznych zmian temperatury w zakresie temperatur niższych od temperatury otoczenia. Liczba badań poświęconych temu zjawisku jest bardzo mała, zwłaszcza w porównaniu z liczbą badań (o szerokim zakresie) dotyczących zmęczenia cieplnego w temperaturach wyższych od temperatury otoczenia. Związane jest to prawdopodobnie z faktem, że proces powstawania i rozwoju pęknięć wskutek cyklicznych zmian temperatury przebiega intensywniej i jest bardziej niebez-

pieczny w wysokich niż w niskich temperaturach. Wiadomo jest jednak, że w elementach cyklicznie ochłodzonych do niskich temperatur powstają i rozwijają się mikropęknięcia, które mogą spowodować złom, szczególnie w przypadku, gdy elementy te przenoszą dodatkowo obciążenia zewnętrzne. Dlatego też pilną potrzebą stało się poznanie przebiegu niskotemperaturowego zmęczenia cieplnego.

Dotychczasowe badania tego zjawiska zostały zrealizowane w mocno zróżnicowanych warunkach. W większości prac brak jest informacji dotyczących rodzaju naprężeń cieplnych powstających w próbkach w zależności od struktury materiału, wymiarów próbek, sposobu ich mocowania itp. Utrudnia to korzystanie z ich rezultatów.

Jeśli przyjąć kryterium rodzaju naprężeń cieplnych powstających w próbce lub elemencie wskutek cyklicznych zmian temperatury, można wyodrębnić trzy przypadki niskotemperaturowego zmęczenia cieplnego, mianowicie gdy:

1. Zmiany temperatury wywołują w próbce mikroskopowe naprężenia cieplne II i III rodzaju ($\vec{\sigma}_T = \vec{\sigma}_T^{II} + \vec{\sigma}_T^{III}$),

2. Na naprężenia mikroskopowe nakładają się dodatkowo makroskopowe naprężenia cieplne I rodzaju ($\vec{\sigma}_T = \vec{\sigma}_T^{II} + \vec{\sigma}_T^{III} + \vec{\sigma}_T^I$),

3. Stan naprężeń cieplnych w próbce jest sumą stanu naprężeń z przypadku pierwszego lub drugiego i stanu naprężeń wywołanego reakcjami więzów ($\vec{\sigma}_T = \vec{\sigma}_T^{II} + \vec{\sigma}_T^{III} + \vec{\sigma}_T^I$ lub $\vec{\sigma}_T = \vec{\sigma}_T^{II} + \vec{\sigma}_T^{III} + \vec{\sigma}_T^I + \vec{\sigma}_T^A$).

Pierwszy przypadek dotyczy próbek lub elementów maszyn o bardzo małych przekrojach (folie, blachy, druty), wykonanych z materiałów o dużej przewodności cieplnej, w których wyrównanie temperatury w całej objętości następuje bardzo szybko. Cykliczne zmiany temperatury powodują, w tych warunkach, nierównomierne odkształcenie poszczególnych kryształów lub faz materiału wskutek anizotropii ich współczynnika rozszerzalności cieplnej. Powstające wówczas w próbce naprężenia cieplne II i III rodzaju zmieniają się współfazowo z temperaturą. Rozwój uszkodzeń w materiale spowodowany tymi naprężeniami jest nazywany umownie „czystym” zmęczeniem cieplnym [1].

Badaniom czystego zmęczenia cieplnego są poświęcone prace [1-6]. Uszkodzenie materiału, powstałe wskutek cyklicznych zmian temperatury, oceniano mierząc najczęściej zmiany własności mechanicznych ($R_m, R_{0,2}, A, Z$, twardość) [1-4], uzupełniając je badaniami metalograficznymi i rentgenograficznymi. Przebieg zmęczenia cieplnego podlegał obserwacjom na podstawie zmian własności fizycznych materiałów: gęstości [1-4] i rezystancji [5, 6]. Zmiany własności mechanicznych materiałów wyznaczano przeprowadzając po określonej liczbie cykli zmian temperatury statyczną próbę rozciągania w temperaturze otoczenia lub w minimalnej oraz maksymalnej temperaturze cyklu zmęczeniowego. Badane materiały to technicznie czyste metale: miedź, cynk, aluminium, kadm i tytan.

Autorzy prac [1, 2] poddając próbki z aluminium, miedzi i cynku działaniu cykli termicznych w zakresie $297K \rightleftharpoons 77K$ stwierdzili w przypadku każdego z tych metali, że ze wzrostem liczby cykli następuje obniżenie ich wytrzymałości i plastyczności. Spadek własności mechanicznych drutu miedzianego był tym większy im większy był stopień jego wstępnego odkształcenia plastycznego [1]. Podobnej prawidłowości nie zaobserwowano w przypadku płaskich próbek z miedzi a także z aluminium i cynku, które były

poddawane działaniu cykli termicznych po wstępnym odkształceniu plastycznym próbek o różnych wartościach [2]. Stwierdzony spadek własności mechanicznych, mierzonych w temperaturze maksymalnej cyklu, był na ogół większy od spadku własności mierzonych w minimalnej temperaturze cyklu. Według danych w pracy [2], po 720 cyklach zmian temperatury, wytrzymałość R_m aluminium, cynku i miedzi zmniejszyła się o około 20%, natomiast wydłużenie A — o 22% dla aluminium, 12% dla miedzi i 50% dla cynku (w przypadku próbek zrekrytalizowanych i pomiarów w temperaturze 297K).

Znaczniejsze zmiany własności mechanicznych wykazał cynk (w stanie zrekrytalizowanym) poddawany działaniu cykli temperatury w zakresie 318K \rightleftharpoons 77K [3]. Po 300 cyklach zmian temperatury jego granica wytrzymałości R_m , określona w temperaturze 297K, stanowiła 50% granicy wytrzymałości bez zmęczenia cieplnego, wydłużenie natomiast zmalało do 20% swojej początkowej wartości.

Inny charakter zmian własności mechanicznych, spowodowany zmęczeniem cieplnym w zakresie temperatur 373K \rightleftharpoons 77K, stwierdzono dla technicznie czystego α — tytanu [4]. Materiał ten po 1000 cyklach termicznych wykazał wzrost R_m i R_e o 10 - 15% przy jednoczesnym wzroście własności plastycznych — wydłużenia i przewężenia.

Drugi przypadek zmęczenia cieplnego dotyczy próbek czy elementów o dużych przekrojach lub wykonanych z materiałów o małej przewodności cieplnej, w których powstaje, w czasie nagrzewania lub chłodzenia, znaczny gradient temperatury. W takich elementach (próbkach) a także w konstrukcjach spawanych złożonych z elementów o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej, zmiany temperatury powodują, oprócz nierównomiernego odkształcenia poszczególnych ziarn (faz) materiału, nierównomierne odkształcenie poszczególnych warstw przekroju lub różnych części konstrukcji. Ten niejednorodny stan odkształcenia jest wówczas przyczyną powstawania zmiennych naprężeń cieplnych mikroskopowych (II i III rodzaju) oraz sumujących się z nimi naprężeń makroskopowych I rodzaju, które zmieniają się synchronicznie z temperaturą.

W literaturze brak jest danych dotyczących rezultatów badań tego przypadku zmęczenia cieplnego. W pracy [7] dokonano jedynie oceny wielkości naprężeń cieplnych, powstających w złączach spawanych rur, wykonanych z różnych gatunków stali nierdzewnych oraz inwaru (stopu o niskim współczynniku rozszerzalności cieplnej) ochłodzonych cyklicznie do temperatury 4K.

Trzeci przypadek zmęczenia cieplnego występuje wtedy, gdy na próbki lub elementy — określone w pierwszym i drugim przypadku zmęczenia cieplnego — są nałożone więzy uniemożliwiające swobodną zmianę ich wymiarów podczas nagrzewania lub chłodzenia. Powstające wówczas w materiale naprężenia są sumą naprężeń pochodzących od reakcji więzów oraz naprężeń mikroskopowych II i III rodzaju (z przypadku pierwszego) lub naprężeń mikro i makroskopowych I rodzaju (z przypadku drugiego). W literaturze nie znaleziono przykładów badań tego przypadku zmęczenia cieplnego.

Oprócz omówionych powyżej przypadków zmęczenia cieplnego należy wyodrębnić często występujący przypadek jednoczesnego działania na elementy konstrukcji zmiennej temperatury i zewnętrznego obciążenia. Zjawisko powstawania i rozwoju uszkodzeń w materiale wskutek zmian temperatury i zewnętrznego obciążenia nazwać można zmęczeniem cieplno-mechanicznym. W warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego naprężenia cieplne, wynikające ze zmian temperatury, sumują się z naprężeniami pochodzą-

cymi od sił zewnętrznych, które mogą być stałe lub zmienne (zmęczenie mechaniczne). W ogólnym przypadku naprężenia zmęczeniowe mogą zmieniać się niesynchronicznie ze zmianami temperatury.

W dostępnej literaturze nie znaleziono prac poświęconych badaniom zmęczenia cieplno-mechanicznego materiałów spowodowanego działaniem cyklicznie zmieniającej się temperatury i zmiennego obciążenia zewnętrznego. Badania nad zmęczeniem cieplno-mechanicznym zrealizowano jedynie w warunkach cyklicznego chłodzenia próbek, zwykle o dużych przekrojach oraz z ograniczoną możliwością swobodnego odkształcania się pod wpływem temperatury (trzeci przypadek zmęczenia cieplnego), obciążonych stałą siłą rozciągającą [8 - 11]. Badane materiały, to stopy mające zastosowanie w budowie urządzeń kriotechnicznych: stale austenityczne oraz stopy typu inwar.

W pracy [8] stwierdzono, że w przypadku gdy naprężenia stałe od zewnętrznej siły rozciągającej nie przewyższają granicy plastyczności, stal H18N10T nie wykazuje istotnych zmian wartości R_m do 50 cykli zmian temperatury (w zakresie $300\text{K} \rightleftharpoons 77\text{K}$ i $300\text{K} \rightleftharpoons 4,2\text{K}$) przy małym ($\sim 10\%$) obniżeniu wartości $R_{0,2}$. Ta sama natomiast liczba cykli termicznych (w zakresie $300\text{K} \rightleftharpoons 77\text{K}$) powoduje znaczny wzrost ($\sim 100\%$) wartości $R_{0,2}$ stali 000H18NB przy nieznacznym ($\sim 6\%$) obniżeniu wartości R_m . Autor pracy [8] tłumaczy ten anomalny wzrost granicy plastyczności intensywnym powstawaniem martenzytu w tej stali, wskutek czego nastąpił wzrost tej mikrotwardości o około 30%. W przypadku, gdy wartości naprężeń od zewnętrznej siły rozciągającej przewyższają wartość granicy plastyczności, autorzy prac [9, 10] stwierdzili, że próbki z karbem ze stali chromoniklowych ulegają złomowi po nie przekraczającej 1000 liczbie cykli zmian temperatury. Na podstawie przebiegu zmian odkształcenia plastycznego, mierzonego w dnie karbu, autorzy prac [9, 10] stwierdzili również, że w stalach chromoniklowych zmęczenie cieplne przebiega w trzech etapach (przez analogię do niskocyklowego zmęczenia mechanicznego): cyklicznego umacniania się, stabilizacji i osłabienia. W momencie złomu, wartość skumulowanego odkształcenia plastycznego tych stali odpowiada odkształceniu w przypadku statycznego zerwania próbki.

W pracy [11] zasygnalizowano badania połączeń spawanych przewodów rurowych ze stali H18N10T oraz inwaru 39N, obciążonych statyczną siłą rozciągającą (wywołującą naprężenia niższe od granicy plastyczności) i poddanych działaniu zmiennej temperatury (w zakresie $297\text{K} \rightleftharpoons 77\text{K}$). Badania te miały charakter eksploatacyjny, gdyż oceny stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych dokonywano w nich jedynie przez sprawdzenie szczelności złączy spawanych, po określonej liczbie cykli temperatury. Na bazie 10^3 cykli, autorzy pracy nie zaobserwowali jeszcze pojawienia się pęknięć w złączach obydwu materiałów.

Podsumowując powyższy przegląd wyników badań niskotemperaturowego zmęczenia cieplnego można stwierdzić, że:

1. Poddanie próbek z technicznie czystych metali działaniu cykli termicznych, w zakresie niskich temperatur, powoduje zmianę ich własności mechanicznych. O charakterze tych zmian decyduje typ i parametry sieci danego metalu. Własności wytrzymałościowe i plastyczne Cu, Zu i Al obniżają się w miarę wzrostu liczby cykli termicznych, natomiast w przypadku α — Ti własności te rosną. Efekt zmniejszenia własności mechanicznych

Cu, Zu i Al wskutek zmęczenia cieplnego zależy od stopnia odkształcenia tych metali w stanie wyjściowym.

2. Cykliczne zmiany temperatury próbek ze stali austenitycznych obciążonych statycznie powodują niewielkie zmiany ich własności wytrzymałościowych w przypadku, gdy zewnętrzne obciążenie nie przewyższa granicy plastyczności a zmiany temperatury nie wywołują w tych stalach przemian fazowych. Przy dużych obciążeniach zewnętrznych (powyżej granicy plastyczności) zmiany temperatury mogą spowodować złom próbek z tych stali przy stosunkowo małej liczbie cykli.

Mała liczba prac poświęconych niektórym tylko (jak wynika z dokonanego przeglądu) przypadkom, wskazuje na to, że badania niskotemperaturowego zmęczenia cieplnego zaledwie zapoczątkowano. Zauważalny jest też brak danych dotyczących niskotemperaturowego zmęczenia cieplnego złączy spawanych materiałów konstrukcyjnych stosowanych w budowie urządzeń kriotechnicznych.

2. Program badań własnych

Celem pracy było zbadanie, jaki wpływ wywierają cykliczne zmiany temperatury w zakresie $293\text{K} \approx 77\text{K}$ na własności wytrzymałościowe próbek połączeń spawanych wybranych materiałów konstrukcyjnych, stosowanych w budowie urządzeń kriotechnicznych (np. kriostaty, zbiorniki na ciekłe gazy itp.). Urządzenia tego rodzaju i ich elementy są narażone podczas eksploatacji na tego typu oddziaływania termiczne, wywołujące zmianę odkształcenia ich elementów synchroniczną ze zmianami temperatury. W rzeczywistości stan odkształcenia (naprężenia) powstający w konstrukcji jest najczęściej bardzo złożony. W ogólnym przypadku stan ten jest, jak już wspomniano, superpozycją zmiennego stanu odkształcenia wywołanego tylko cyklicznymi zmianami temperatury (zmęczenie cieplne) oraz stanu odkształcenia wywołanego oddziaływaniem zewnętrznego statycznego lub dynamicznego obciążenia (wytrzymałość statyczna, zmęczenie mechaniczne).

W pracy podjęto próbę oddzielnego zbadania przypadku zmęczenia cieplnego zbliżonego do tzw. czystego zmęczenia cieplnego oraz przypadku zmęczenia cieplno-mechanicznego, w którym rozwój uszkodzeń spowodowany zmianami temperatury jest intensyfikowany działaniem zmiennej (synchronicznej ze zmianami temperatury) zewnętrznej siły rozciągającej. Do badań przyjęto próbki złączy spawanych — ze względu na fakt powszechnego stosowania połączeń spawanych w budowie urządzeń kriotechnicznych oraz brak danych o wpływie cykli niskotemperaturowych na własności wytrzymałościowe tych połączeń.

Szczegółowy program badań był następujący:

1. Wyznaczenie własności wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu materiałów rodzimych i ich połączeń spawanych w ekstremalnych temperaturach cyklu zmęczenia 293K i 77K.

2. Przeprowadzenie prób czystego zmęczenia cieplnego próbek połączeń spawanych do liczby cykli zmian temperatury $N_T = 100, 500$ i 1000 oraz wyznaczenie po tychże liczbach cykli wytrzymałości na rozciąganie próbek w temperaturze 297K i 77K.

3. Przeprowadzenie prób zmęczenia cieplno-mechanicznego próbek połączeń spawanych do liczby cykli zmian temperatury $N_{TM} = 100$ i wyznaczenie po tej liczbie cykli, wytrzymałości na rozciąganie próbek w temperaturze 297K i 77K.

Analiza wyników przeprowadzonych badań miała umożliwić ocenę wpływu stosowanych liczb cykli N_T i N_{TM} na wytrzymałość próbek złączy spawanych oraz ewentualnego udziału czystego zmęczenia cieplnego w zmęczeniu cieplno-mechanicznym.

3. Materiały, próbki

Do badań wybrano stal kwasoodporną 1H18N9T oraz miedź beztlenową MOB w postaci cienkich blach, jako materiały stosowane w kriotechnice. Skład chemiczny tych materiałów podano w tabeli 1. Własności mechaniczne materiałów rodzimych, wyznaczone w statycznej próbie rozciągania w temperaturach 293K i 77K, zestawiono w tabeli 2.

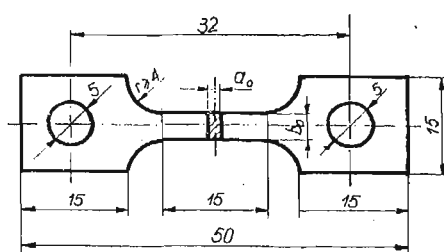
Do badań statycznych i do prób zmęczenia cieplnego wybrano jeden rodzaj próbki, co stwarzało możliwość porównywania wyników statycznej próby rozciągania badanych materiałów przed i po próbach zmęczenia cieplnego. Kształt i wymiary próbki przedstawiono na rys. 1. Tego rodzaju próbka, charakteryzująca się małymi wymiarami przekroju

Tabela 1. Skład chemiczny badanych materiałów

Lp.	Materiał	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	P	S	Cu
		zawartość pierwiastków w %								
1	miedź MOB	—	—	—	—	—	—	—	—	99,96
2	stal 1H18N9T	0,03	1,90	0,50	17,10	8,92	0,16	0,020	0,040	—

Tabela 2. Podstawowe własności wytrzymałościowe i plastyczne badanych materiałów w stanie wyjściowym (wartości średnie)

Lp.	Materiał	Temperatura próby	$R_{0,2}$	R_m	A_5	E
		K	MPa	MPa	%	MPa
1	Miedź MOB	293	101	210	44	$1,20 \cdot 10^5$
2		77	123	318	56	$1,23 \cdot 10^5$
3	Złącze spawane z miedzi MOB	293	—	200	—	—
4		77	—	306	—	—
5	Stal 1H18N9T	293	220	632	61	$1,93 \cdot 10^5$
6		77	275	1536	35	$2,05 \cdot 10^5$
7	Złącze spawane ze stali 1H18N9T	293	—	607	—	—
8		77	—	1412	—	—



Rys. 1

poprzecznego, spełnia w przybliżeniu warunek szybkiego wyrównania temperatury w przekroju poprzecznym w przypadku czystego zmęczenia cieplnego, a jednocześnie jej mała masa ogranicza zużycie ciekłego azotu podczas półcyklu chłodzenia. Jej zaletą jest również łatwość wykonania zarówno z blachy materiału rodzimego jak i z płyty kontrolnej spawanego doczołowego złącza. Próbki materiałów rodzimych wycięto z blachy o grubości $a_0 = 1,9$ mm (miedź MÓB) i $a_0 = 1,5$ mm (stal 1H18N9T) zgodnie z kierunkiem walcowania. Próbki połączeń spawanych natomiast wycięto w podobny sposób ze spawalniczych płyt kontrolnych jako pary wzdłużne z połączeń doczołowych dwóch blach, przy czym uprzednio obrobiono lico i grań spoin w celu usunięcia nierówności. W wyniku tej obróbki grubość a_0 próbek połączeń spawanych była nieco mniejsza od grubości próbek materiałów rodzimych.

Płyty kontrolne ze stali 1H18N9T, z których wycięto próbki, spawano ręcznie metodą TIG w osłonie argonu (przy $I = 110$ A) elektrodą wolframową i drutem spawalniczym Sp 06H19N9.

Płyty kontrolne z miedzi MOB wykonano również przez spawanie ręczne w osłonie argonu (przy $I = 150$ A) elektrodą wolframową. Podczas spawania dokonano jedynie przetopu nie stosując drutu miedzianego jako spoiwa. Na podstawie badań radiograficznych obydwu rodzajów spoin zaliczono je do pierwszej grupy wadliwości wg PN-74/M-69772.

Obserwacje mikroskopowe złączy doczołowych stali austenicznej nie wykazały wad dyskwalifikujących złącze. Materiał rodzimy miał typową poliedryczną strukturę austeniczną z drobnymi, pasmowo rozmieszczonymi ziarenkami ferrytu δ oraz równomiernie rozmieszczonymi wtrąceniami węglikoazotków tytanu. W wąskiej strefie wpływu ciepła zwiększony był udział ferrytu δ i widoczny rozrost ziarn austenitu. Spoina wykazywała typową strukturę dendrytyczną z ferrytem δ w przestrzeniach międzydendrytycznych i słabo zaznaczoną segregacją. Wyznaczony na podstawie danych z tabeli 2 współczynnik osłabienia stali austenicznej na skutek spawania wynosił odpowiednio:

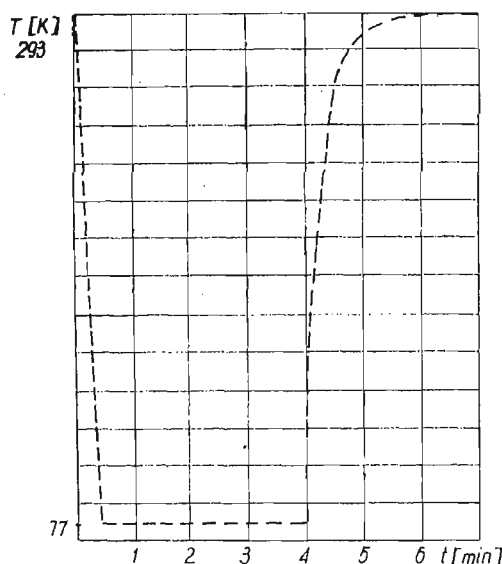
- dla temperatury 293K — $\alpha_{s,p} = 0,96$,
- dla temperatury 77K — $\alpha_{s,p} = 0,92$.

Próbki złączy doczołowych miedzi wykazywały wady, które omijano przy wycinaniu próbek. W badaniach mikroskopowych stwierdzono, że spoina wykazywała nieznaczny segregację w komórkowych dendrytach. W szerokiej strefie wpływu ciepła nastąpił znaczny rozrost ziarn. Na podstawie przeprowadzonej próby rozciągania nie stwierdzono osłabienia miedzi wskutek spawania, zarówno w temperaturze 293K jak i 77K.

4. Próby zmęczenia cieplnego i ciepłno-mechanicznego

Próby zmęczenia cieplnego i ciepłno-mechanicznego przeprowadzono na specjalnie w tym celu skonstruowanym urządzeniu [12], wywołującym cykliczne zmiany temperatury jednocześnie czterech pakietów próbek — przez automatyczne ich zanurzenie na przemian w czynniku chłodzącym (LN_2) i czynniku nagrzewającym do temperatury otoczenia (podgrzewany alkohol etylowy). Urządzenie to daje możliwość regulacji czasu wytrzymywania próbek w kąpeli, w zależności od rodzaju materiału próbek i elementów oraz ich masy.

Biorąc pod uwagę niezbędne czasy ochłodzenia i nagrzania próbek w kąpielach oraz czas ich transportu między zbiornikami, ustalano minimalny czas trwania 1 cyklu temperaturowego czystego zmęczenia cieplnego dla próbek stalowych $t_T = 6$ min i przyjęto ten sam czas dla próbek miedzianych — ze względu na równoczesne zanurzenie w kąpeli obydwu rodzajów próbek. Przykładowy kształt zarejestrowanego cyklu zmian temperatury w próbce stalowej podczas prób zmęczeniowych pokazano na rys. 2.



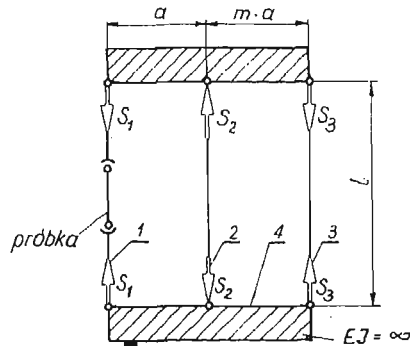
Rys. 2

Do realizacji zmęczenia cieplnego z udziałem siły rozciągającej skonstruowano specjalne uchwyty [12] (rys. 3), które wraz z zamocowanymi w nich próbkami zanurzone były w kąpeli chłodzącej i nagrzewającej. Jednoczesne zmiany temperatury próbki i elementów nośnych uchwytu wywołuje wówczas (na skutek różnic w odkształceniach termicznych) odzerowo zmienne, synchroniczne ze zmianami temperatury, siły rozciągające w próbkach. Ustalony doświadczalnie minimalny czas trwania 1 cyklu temperaturowego tego rodzaju zmęczenia ciepłno-mechanicznego wynosił $t_{TM} = 17$ min dla próbek stalowych i miedzianych. Zarejestrowany przykładowy przebieg zmian temperatury w 1 cyklu dla próbki stalowej przedstawiono na rys. 4. Wartości maksymalnych odkształceń wzdłuż-

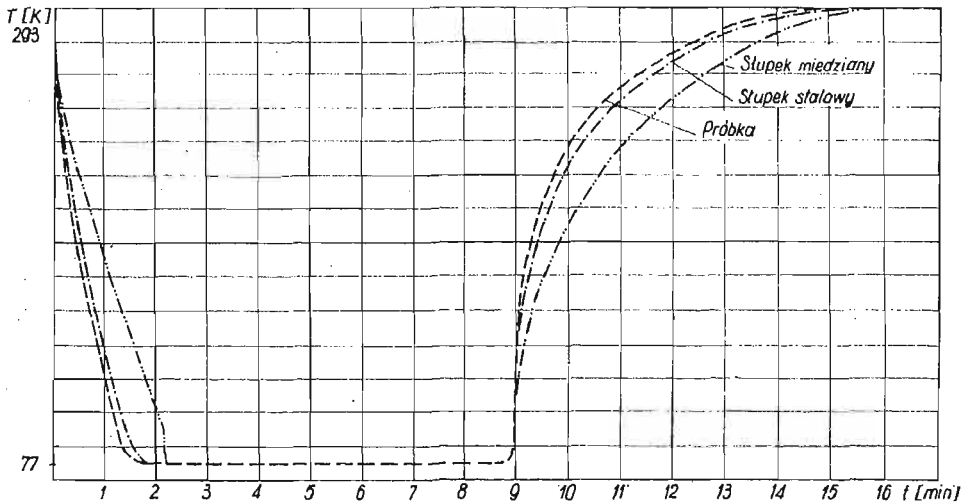
nych, wywołanych działaniem siły rozciągającej, wyznaczono metodą elektrycznej tensometrii oporowej [12], uzyskując w przypadku obydwu materiałów $\varepsilon_{\max} = 6 \cdot 10^{-4} (*)$. Odpowiada to wartościom maksymalnych naprężeń rozciągających w cyklu zmęczeniowym:

- dla miedzi MOB — $\sigma_{\max} = 74$ MPa.
- dla stali 1H18N9T — $\sigma_{\max} = 123$ MPa.

Zaznaczyć należy, że powyższe wartości odkształcenia (naprężenia) od siły rozciągającej w stosowanych uchwytach są wartościami maksymalnymi z możliwych do uzyskania.



Rys. 3



Rys. 4

*) Pomiary przeprowadzono przy użyciu próbki kompensacyjnej (z naklejonym tensometrem kompensacyjnym). Tensometry połączone w układ półmostka zapewniający samokompensację odkształceń nie wywołujących naprężeń termicznych. Szacowana dokładność pomiarów odkształceń wynosiła 5%.

Dokładne informacje dotyczące metody pomiaru znajdują się w pracy [12].

Próbnom czystego zmęczenia cieplnego w zakresie $N_T = 10 - 1000$ cykli poddano ogółem 32 próbki stalowe i 24 próbki miedziane, a próbnom zmęczenia cieplno-mechanicznego do liczby $N_{TM} = 100$ cykli po 8 próbek stalowych i miedzianych. Liczbę $N_{TM} = 100$ cykli przyjęto na podstawie analizy wyników badań czystego zmęczenia cieplnego, w której stwierdzono istotne zmiany granicy wytrzymałości R_m tylko w zakresie tej liczby cykli.

5. Wyniki prób rozciągania oraz ich statystyczna analiza

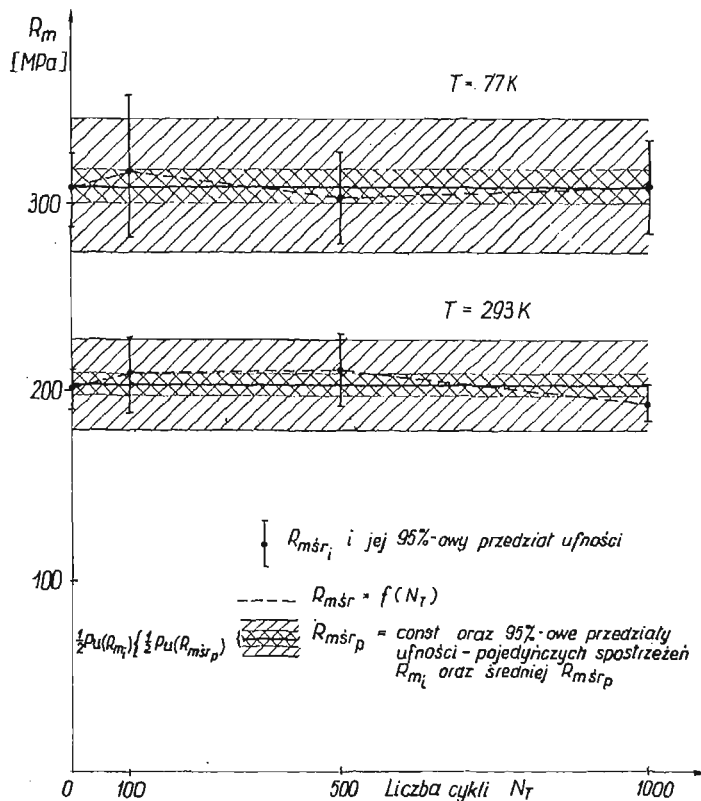
5.1. Wyniki prób po czystym zmęczeniu cieplnym. Próbki połączeń spawanych z miedzi MOB i stali 1H18N9T, po uprzednim poddaniu ich działaniu określonej liczby cykli zmian temperatury, poddano statycznej próbie rozciągania na maszynie wytrzymałościowej INSTRON model 1126. Próby te przeprowadzono w temperaturze 293K i 77K, badając po cztery próbki dla każdej liczby cykli N_T . Podczas prób w temperaturze 77K, próbki były zanurzane w ciekłym azocie. Uzyskane wyniki prób rozciągania, opracowane statystycznie, przedstawiono w tab. 3 oraz na rys. 5 i 6.

Tabela 3. Wytrzymałość na rozciąganie próbek połączeń spawanych po różnych liczbach cykli zmian temperatury N_T (czyste zmęczenie cieplne)

Material	Temperatura próby T	Liczba cykli zmian tempera- tury N_T	$R_{m\bar{s}r}^*$	$1/2 PUR_{m\bar{s}r}^{**}$	$R_{m\bar{s}r}_{min}$	$R_{m\bar{s}r}_{max}$
	K	cykle	MPa			
MOB	293	0	200,5	11,0	189,5	211,5
		100	209,5	19,0	190,5	228,5
		500	212,5	19,0	193,5	231,5
		1000	195,0	9,5	185,5	204,5
	77	0	306,5	19,0	287,5	325,5
		100	319,0	38,5	280,5	357,5
		500	303,0	24,0	279,0	327,0
		1000	309,5	24,5	285,0	334,0
1H18N9T	293	0	607,5	22,5	585,0	630,0
		10	644,5	19,0	625,5	663,5
		100	675,5	16,0	659,5	691,5
		500	680,5	47,0	633,5	727,5
		1000	665,0	14,5	650,5	679,5
	77	0	1412,0	11,5	1400,5	1423,5
		10	1480,5	59,0	1421,5	1539,5
		100	1520,5	30,0	1490,5	1550,5
		500	1503,5	51,5	1452,0	1555,0
		1000	1533,5	35,0	1498,5	1568,5

(*) Wartości średnie z 4 prób

(**) Połowa 95%-owego przedziału ufności wartości $R_{m\bar{s}r}$



Rys. 5

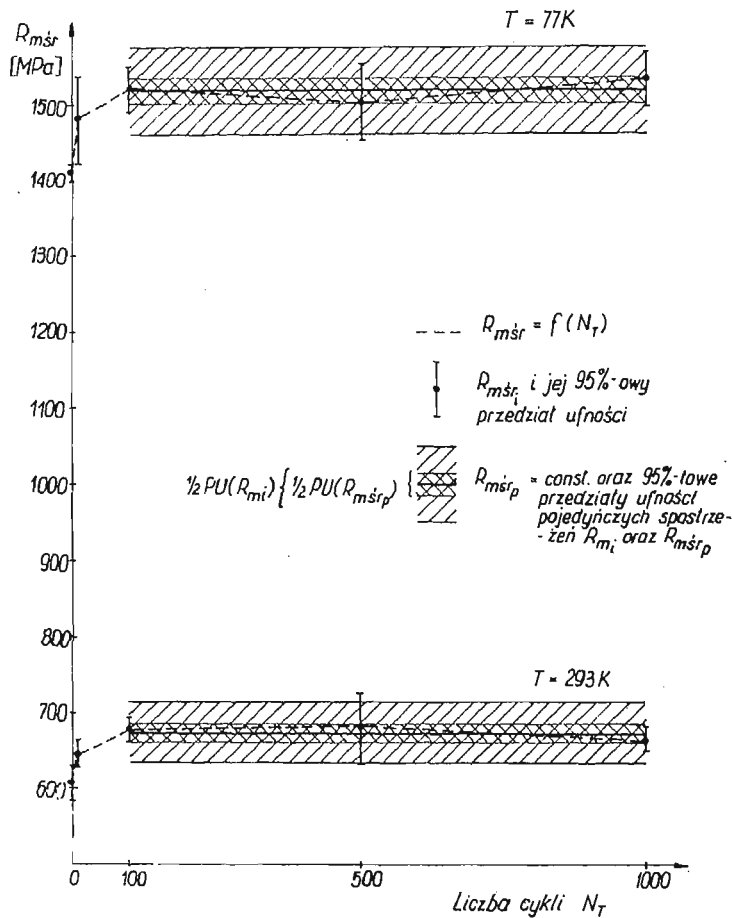
O wpływie cyklicznych zmian temperatury na wytrzymałość badanych próbek połączeń spawanych wnioskowano na podstawie analizy wariancyjnej odpowiednich grup średnich (test F do porównywania kilku średnich [13]). Analiza ta w przypadku miedzi wykazała brak statystycznie istotnych różnic między średnimi wartościami $R_{m_{sr}}$ wyznaczonymi po $N_T = 0, 100, 500$ i 1000 cykli zmian temperatury — w obydwu temperaturach próby rozciągania. Wobec tego dokonano łącznego oszacowania średniej wartości wytrzymałości $R_{m_{sr_p}}$ oraz 95% przedziałów ufności wartości średniej i pojedynczych wyników prób. Wartości średnie są równe (rys. 5):

— dla temperatury 293K — $R_{m_{sr_p}} = 204,5 \pm 6,0$ MPa

— dla temperatury 77K — $R_{m_{sr_p}} = 309,5 \pm 9,0$ MPa.

W przypadku próbek połączeń spawanych ze stali podobna analiza wykazała statystycznie istotne różnice w rozpatrywanych grupach średnich wyznaczonych po $N_T = 0, 10, 100, 500$ i 1000 cykli termicznych. Na podstawie dalszej analizy statystycznej, w której stosowano zmodyfikowany test rozstępu Duncana [14], stwierdzono brak statystycznie istotnych różnic między wartościami $R_{m_{sr}}$ wyznaczonymi po $N_T = 100, 500$ i 1000 cyklach termicznych (po oszacowaniu łącznym $R_{m_{sr_p}}^{293\text{K}} = 673,5 \pm 11,5$ MPa i $R_{m_{sr_p}}^{77\text{K}} = 1519,0 \pm 16,5$ MPa) oraz istnienie tych różnic między wartościami $R_{m_{sr_p}}$ a wartościami $R_{m_{sr}}$ wyznaczonymi po $N_T = 0$ i 10 cykli (rys. 6).

5.2. Wyniki prób po zmęczeniu cieplno-mechanicznym. Próbki połączeń spawanych miedzi MOB i stali 1H18N9T, po przeniesieniu określonej liczby cykli zmian temperatury i siły rozciągającej, poddano próbie rozciągania w sposób opisany w punkcie 5.1. Uzyskane wyniki, po opracowaniu statystycznym, przedstawiono w tabeli 4.



Rys. 6

Analiza statystyczna tych wyników (analogiczna jak w punkcie 5.1) wykazała w przypadku miedzi brak statystycznie istotnych różnic między średnimi wartościami $R_{m\dot{s}r}$ próbek w stanie wyjściowym, po $N_T = 100$ cykli (czyste zmęczenie cieplne) oraz po $N_{TM} = 100$ cykli (zmęczenie cieplno-mechaniczne) — w obydwu temperaturach próby rozciągania, natomiast w przypadku stali — różnice statystycznie istotne. W dalszej analizie statystycznej (test rozstępu Duncana) wyników uzyskanych dla próbek stalowych stwierdzono istnienie statystycznie istotnych różnic w przypadku każdej pary z wymienionych wyżej trzech wartości $R_{m\dot{s}r}$, w temperaturach 293K i 77K.

Tabela 4. Wytrzymałość na rozciąganie próbek połączeń spawanych po $N_{TM} = 100$ cykli zmian temperatury (zmęczenie cieplno-mechaniczne)

materiał	Tempera- tura próby T	Liczba cykli zmian temperatury N_{TM}	Napręże- nie roz- ciągające σ_{max}	$R_{m\dot{s}r}^{*})$	$^{1/2}PU R_{m\dot{s}r}^{**})$	$R_{m\dot{s}r_{min}}$	$R_{m\dot{s}r_{max}}$
	K	cykle	MPa				
MOB	293	0	0	200,5	11,0	189,5	211,5
		100	74	201,5	15,0	186,5	216,5
MOB	77	0	0	306,5	19,0	287,5	325,5
		100	74	311,0	19,0	292,0	330,0
1H18N9T	293	0	0	607,5	22,5	585,0	630,0
		100	123	704,0	21,0	683,0	725,0
1H18N9T	77	0	0	1412,0	11,5	1400,5	1423,5
		100	123	1553,0	20,0	1533,0	1573,0

(*) Wartości średnie z czterech prób

(**) Połowa 95%-owego przedziału ufności wartości $R_{m\dot{s}r}$

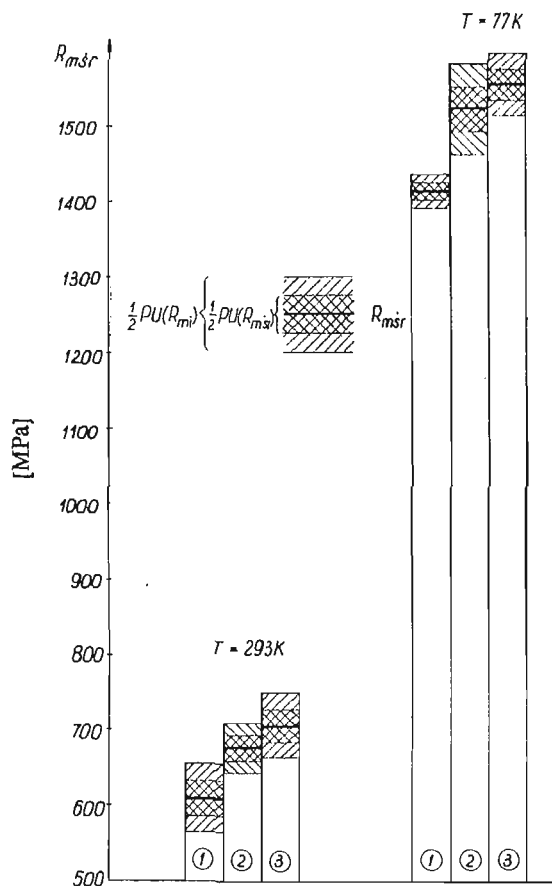
6. Podsumowanie wyników badań i wnioski

Analiza wyników statycznej próby rozciągania wykazała, że poddanie próbek połączeń spawanych z miedzi MOB działaniu cyklicznych zmian temperatury (czyste zmęczenie cieplne) pomiędzy 293K a 77K w zakresie $N_T = 0 - 1000$ cykli, nie powoduje istotnych zmian ich wytrzymałości $R_{m\dot{s}r}$ wyznaczonej tak w temperaturze 293K jak i 77K. Stwierdzony brak zmiany wytrzymałości potwierdziły obserwacje na mikroskopie świetlnym w których nie stwierdzono zmian w mikrostrukturze spoiny i materiału rodzimego. Badany w pracy [1], w podobnych warunkach, drut z czystej miedzi (w stanie zrekrystalizowanym) wykazał również brak wrażliwości na działanie cykli termicznych. Inny wynik uzyskano natomiast w pracy [2], w której dla płaskich próbek z czystej miedzi badanej w podobnych warunkach stwierdzono zmniejszenie wartości R_m niemal o 20%.

W przypadku próbek połączeń spawanych ze stali 1H18N9T po $N_T = 10$ cykli zmian temperatury nastąpił statystycznie istotny wzrost ich wytrzymałości $R_{m\dot{s}r}$ — o 6,0% i 4,8% odpowiednio w temperaturach 293K i 77K. Zwiększenie liczby cykli do $N_T = 100$ cykli spowodowało dalszy wzrost wytrzymałości $R_{m\dot{s}r}$ do 10,9% i 7,6% — w temperaturach 293K i 77K w stosunku do wartości $R_{m\dot{s}r}$ próbek w stanie wyjściowym. Dalsze zwiększenie liczby cykli do $N_T = 500$ i 1000 cykli nie spowodowało już istotnych zmian wytrzymałości próbek w stosunku do wyznaczonej po $N_T = 100$ cykli. Wydaje się, że stwierdzone umocnienie połączeń spawanych stali 1H18N9T, objawiające się wzrostem ich wytrzymałości, spowodowane zostało, jak wykazały obserwacje mikroskopowe [12], zmianami w mikrostrukturze stali, polegającymi na przemianie martenzytycznej i powstawaniu bliźniaków zarówno w spoinie jak i materiale rodzimym. W miarę wzrostu liczby cykli zmian tempe-

ratury zwiększała się liczba bliźniaków oraz udział objętościowy martenzytu w strukturze. W dostępnej literaturze nie znaleziono danych dotyczących czystego zmęczenia cieplnego stali chromoniklowych.

Poddanie próbek połączeń spawanych z miedzi MOB stu cyklom zmian temperatury (zmęczenie cieplno-mechaniczne $N_{TM} = 100$ cykli) wywołującym w nich współfazowy do zmian temperatury pulsujący cykl naprężeń o wartości $\sigma_{max} = 74 \text{ MPa} = 0,74 R_{0,2}^{293K} = 0,6 R_{0,2}^{77K}$, również nie wpływa w istotny sposób na ich wytrzymałość R_m . W tym przypadku nie zaobserwowano także zmian struktury w spoinie i materiale rodzimym próbek, dostrzegalnych na mikroskopie świetlnym. Należy zauważyć, że dotychczas nie zajmowano się przypadkiem zmęczenia cieplno-mechanicznego metali czystych.



Rys. 7. 1 — $N_T = 0$ cykli, 2 — $N_T = 100$ cykli, 3 — $N_{TM} = 100$ cykli

Analogicznie jak w przypadku miedzi badania zmęczenia cieplno-mechanicznego próbek połączeń ze stali 1H18N9T (przy $\sigma_{max} = 123 \text{ MPa} = 0,59 R_{0,2}^{293K} = 0,45 R_{0,2}^{77K}$) wykazały, że poddanie próbek stu cyklom zmian temperatury ($N_{TM} = 100$ cykli) powoduje statystycznie istotny wzrost ich wytrzymałości R_{msr} w stosunku do wytrzymałości próbek w stanie wyjściowym (dla $N_T = 0$ cykli) wynoszący (rys. 7):

- w temperaturze 293K — 16%
- w temperaturze 77K — 10%.

Wzrost ten jest wyższy odpowiednio o 5,0% i 2,4% niż stwierdzony po stu cyklach w przypadku czystego zmęczenia cieplnego. Jeśli przyjąć, że wzrost ten jest superpozycją skutków czystego zmęczenia cieplnego oraz zmiennej siły rozciągającej, to stwierdzone różnice przypisać należy działaniu obciążeń mechanicznych. Stwierdzone umocnienie materiału próbek i w tym przypadku znalazło potwierdzenie w obserwacjach mikroskopowych [12]. Zmiany struktury złączy stalowych wskutek zmęczenia cieplno-mechanicznego miały podobny charakter jak w przypadku czystego zmęczenia cieplnego ale były większe.

W literaturze brak jest przykładów badań zmęczenia cieplno-mechanicznego przy tak niskiej jak przyjęto w niniejszych badaniach, wartości $\sigma_{\max} = 0,59 R_{0,2}^{293K}$. Z pracy [8] wynika, że stosowanie wyższych naprężeń rozciągających $\sigma = 0,9 R_{0,2}$ w przypadku stali 000H18N8 spowodowało nieznaczny (o około 6%) spadek jej wytrzymałości natomiast brak zmiany wytrzymałości w przypadku stali H18N10T. Podkreślić należy, że dopiero w przypadku działania naprężeń rozciągających przewyższających granicę plastyczności, cykliczne zmiany temperatury prowadzą do złomu stali chromoniklowych w zakresie do 1000 cykli [9, 10].

Z przeprowadzonych badań wynika ponadto, że obniżenie temperatury z 293K do 77K powoduje znaczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie badanych materiałów i ich połączeń spawanych. W szczególności stwierdzono, że względny procentowy wzrost tej wytrzymałości w stosunku do wyznaczonej w temperaturze 293K wynosi:

- dla miedzi MOB — 51%,
- dla złączy spawanych miedzi MOB — 53%,
- dla stali 1H18N9T — 143%,
- dla złączy spawanych stali 1H18N9T — 132%.

Należy zauważyć, że obniżenie temperatury z 293K do 77K wywołuje również znaczny wzrost wytrzymałości R_m próbek połączeń spawanych zbliżony do wzrostu R_m materiałów rodzimych. Uzyskane wyniki potwierdzają wpływ obniżenia temperatury na własności wytrzymałościowe miedzi MOB oraz stali 1H18N9T i jej połączeń spawanych, które stwierdzono we wcześniejszych badaniach tych materiałów [15].

Reasumując, na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Poddanie próbek połączeń spawanych z miedzi MOB działaniu 1000 cykli zmian temperatury w zakresie 293K \rightleftharpoons 77K nie powoduje istotnych zmian ich granicy wytrzymałości na rozciąganie. Natomiast w przypadku próbek połączeń spawanych ze stali 1H18N9T po 100 cyklach zmian temperatury następuje niewielki wzrost ich wytrzymałości (o około 10%) a dalsze zmiany temperatury (do 1000 cykli) nie wpływają już w sposób istotny na ich wytrzymałość.

2. Poddanie próbek połączeń spawanych z miedzi oraz ze stali działaniu 100 cykli zmian temperatury w zakresie 293K \rightleftharpoons 77K i zmiennej siły rozciągającej (wywołującej naprężenia niższe od granicy plastyczności) również nie powoduje istotnych zmian ich wytrzymałości na rozciąganie w przypadku miedzi i podwyższa (o około 15%) wytrzymałość próbek połączeń spawanych ze stali.

3. Wzrost wytrzymałości na rozciąganie połączeń spawanych z miedzi MOB i stali 1H18N9T, spowodowany obniżeniem temperatury do 77K jest znaczny (52% — dla miedzi i 132% dla stali) i zbliżony do wzrostu wytrzymałości materiałów rodzimych.

Literatura

1. BZYTA A., ZAKRZEWSKI M., *Wpływ cyklicznych zmian temperatury w zakresie 77-297K na gęstość i własności wytrzymałościowe przy rozciąganiu drutu miedzianego i aluminiowego*, Konferencja Problemy dekohezji i wytrzymałości materiałów w niskich temperaturach, Wrocław, wrzesień (1975) 28 - 32.
2. BZYTA A., *Wpływ anizotropii na niektóre własności fizyczne i wytrzymałościowe próbek wykonanych z Al, Cu, Zn, poddanych cyklicznym zmianom temperatury i wstępnym odkształceniom trwałym*, Raport nr 84, Inst. Mater. PWr, Wrocław (1976).
3. PSZONKA A., ZIAJA J., *Strukturelle Aspekte der Waermeermuedung im Tieftemperaturbereich des Zinks*, Metall 35 (1981) 227 - 231.
4. ZIAJA J., *Niskotemperaturowe zmęczenie cieplne jako stymulator procesu zmęczenia mechanicznego w temperaturze LN₂*, Pr. Nauk. Inst. Mater., SPR11 (1983) 4, 5.
5. LEVI F. A., *Fracture and plastic deformation caused by low-temperature thermal fatigue in zinc*, Scripta Metallurgica, 11, 1 (1977) 91 - 93.
6. LEVI F. A., *Difetti indotti da fatica termica: osservazioni microscopiche di Zn e Cd cidati a basse temperature*, La metallurgia Italiana, 2 (1975) 65 - 86.
7. Юценко К. А., Махненко В. И., Старуценко Т. М., *Термические напряжения в сварных соединениях инвара и нержавеющей сталей при криогенной температуре*. Автоматическая сварка, 247, 10 (1973) 27 - 29.
8. Медведев Е. М., *Установка для niskotemperатурного термоциклирования*. Заводская лаборатория, 42, 8 (1976) 1011 - 1013.
9. Степанов Г. А., Киви Е. А., *Методика испытаний на термическую усталость при отрицательных температурах*. Заводская лаборатория, 38, 11 (1972) 1374 - 1376.
10. Степанов Г. А., Скольцов В. И., *Термическая усталость аустенитных сталей при криогенных температурах*. Проблемы прочности, 10 (1975) 112 - 115.
11. Степанов Г. А., Куранов В. А., Коновалова А. И., Киви Е. А., *К методике оценки термической усталости сварных швов трубопроводов при сложном напряженном состоянии*. Проблемы прочности, 10 (1970) 94 - 97.
12. Praca zbiorowa, *Wpływ niskotemperатурowego zmęczenia cieplnego na własności wytrzymałościowe połączeń spawanych z miedzi MOB i stali 1H18N9T*, Pr. Nauk. Inst. Mater. PWr., SPR 10 (1983)
13. VOLK W., *Statystyka stosowana dla inżynierów*. WN-T. Warszawa (1973) 117 - 128, 132 - 138.
14. ОКТАВА W., *Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa*, PWN, Warszawa (1962) 132 - 136.
15. Praca zbiorowa, *Badania wytrzymałościowe przy rozciąganiu w zakresie temperatur 293 - 4,2K*, Pr. Nauk. Inst. Mater. P. Wr., SPR7 (1980).

Резюме

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 293К - 77К НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ MOB И СТАЛИ 1Х18Н9Т

Вступительно проведен всесторонний анализ возможных случаев термической усталости; по литературным данным проанализировано также влияние niskotemperатурного циклирования на механические свойства материалов.

Настоящая статья посвящена исследованию влияния термоциклирования в интервале температур 293К - 77К, на предел прочности образцов сварных соединений меди МОБ и стали 1Х18Н9Т. Образцы испытывались в условиях, т.н., чистой термоусталости и термомеханической усталости (при наличии переменной растягивающей силы) в интервале 0 - 1000 термоциклов. Обнаружено, что в случае образцов сварных соединений меди МОБ, не наблюдается существенного изменения предела прочности ни после термоусталостных, ни после термо-механических исследований. В случае стальных образцов сварных соединений наблюдается рост предела прочности на 10% и 15% вследствие соответственно чистой термоусталости и термо-механической усталости.

S u m m a r y

THE EFFECT OF CYCLIC TEMPERATURE VARIATIONS WITHIN THE INTERVAL OF 293K - 77K ON TENSILE STRENGTH OF WELDED SPECIMENS OF MOB COPPER AND 1H18N9T STEEL

Problems of low temperature thermal fatigue are analysed and the investigations of the effect of cyclic temperature variations on strength of materials are reviewed.

Results of authors investigation of the effects of cyclic temperature variations (within the interval of 293K - 77K) on tensile strength of welded specimens of MOB copper and 1H18N9T steel are presented. Specimens were subjected to the so called pure thermal and thermal — mechanical (with variable tensile force) fatigue within the interval of 0 - 1000 thermal cycles. Both thermal and thermal — mechanical cycles were found not to affect the strength of welded joints of copper and to increase slightly the strength of joints of steel specimens.

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 18 czerwca 1984 roku.
