

Michał MICHALAK*, **Remigiusz MICHALCZEWSKI***,
Jan WULCZYŃSKI*

MODYFIKACJA TRIBOLOGICZNEGO URZĄDZENIA BADAWCZEGO T-21 PRZEZNACZONEGO DO BADANIA MATERIAŁÓW W WYSOKIEJ TEMPERATURZE

THE MODIFICATIONS OF A T-21 TESTING RIG INTENDED FOR MATERIALS AT HIGH TEMPERATURES

Słowa kluczowe:

stanowisko kula-tarcza T-21, wysoka temperatura, metodyka badawcza, ruch ślizgowy

Key words:

T-21 ball-on-disc tribotester, high temperature, test methodology, sliding conditions

Streszczenie:

Z tribologicznymi badaniami wysokotemperaturowymi elementów, zwłaszcza ceramicznych lub z powłokami, związanych jest wiele problemów technicznych. Do głównych problemów konstrukcyjnych należą: sposób mocowania elementów testowych oraz zadanie i stabilizacja temperatury warstwy wierz-

* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Polska.

niej elementów testowych. Niestety każde z istniejących rozwiązań stosowanych w dostępnych komercyjnie urządzeniach ma wady. W pracy zaprezentowano autorskie rozwiązania obejmujące zmianę sposobu mocowania elementów testowych (kulki i tarczy) oraz zadawania i stabilizacji temperatury w komorze badawczej. Opracowane rozwiązania zastosowano na stanowisku T-21 typu kula/trzpień–tarcza. Wykonane badania weryfikacyjne potwierdziły poprawność przyjętych rozwiązań.

WPROWADZENIE

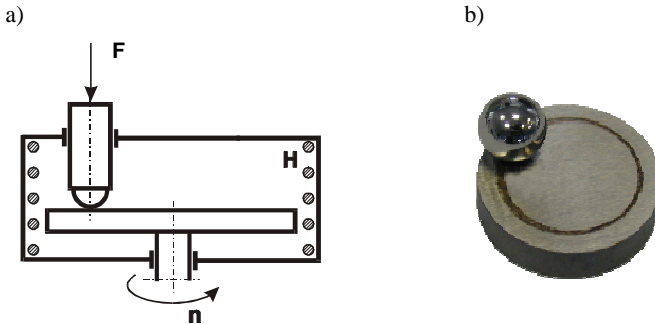
W praktyce dobór komercyjnych powłok PVD/CVD do pracy w wysokich temperaturach dokonywany jest głównie na podstawie informacji katalogowej, m.in. maksymalnej temperatury pracy (np. dla CrN – 700°C, TiAlN – 900°C) i właściwości fizykomechanicznych pozyskanych w temperaturze pokojowej (m.in. odporność na zużywanie, współczynnik tarcia, adhezja). Bazując na tych danych oraz na praktyce przemysłowej, wytwórcy powłok podają potencjalne obszary ich zastosowania, np.: na narzędzia skrawające do drewna [L. 1], formy do ciśnieniowego odlewania metali (stopów aluminium), narzędzia do obróbki plastycznej (np. wyciskanie profili aluminiowych) [L. 2–4]. Założenie, że odporność na zużycie i opory ruchu skojarzeń elementów z powłokami w wysokich temperaturach są podobne do występujących w warunkach temperatury pokojowej może prowadzić do błędnych wniosków.

Z tribologicznymi badaniami wysokotemperaturowymi elementów związanych jest wiele problemów technicznych. Do głównych problemów konstrukcyjnych należy: sposób mocowania elementów testowych oraz zadanie i stabilizacja temperatury warstwy wierzchniej elementów testowych. Obecnie istnieje kilku producentów i dostawców tribologicznych stanowisk do badań wysokotemperaturowych. Niestety każde z istniejących rozwiązań ma istotne wady. Na przykład powszechnie stosowane zaciskowe mocowanie kulek, w przypadku elementów ceramicznych o niższym współczynniku rozszerzalności cieplnej od materiału uchwytu, w wysokich temperaturach nie zapewnia pewności mocowania. Producenci stosują rozwiązania, w których uchwyt mocujący ze względu na duże różnice masy w odniesieniu do samej próbki prowadzi do niepożądanego schładzania strefy tarcia. Z kolei swobodne mocowanie tarczy na uchwycie (np. gwinty o dużych luzach) jest problematyczne ze względu na nieprecyzyjne bazowanie i powstawanie bicia próbki, co niekorzystnie wpływa na powtarzalność wyników badań. Równie wiele kontrowersji budzi sposób grzania strefy tarcia. Systemy indukcyjne podgrzewające stolik, na którym ulokowana jest tarcza, nie powodują najczęściej przegrzania próbek, jednak przeprowadzone pomiary z wykorzystaniem kamery termograficznej dowodzą znacznej różnicy pomiędzy temperaturą próbki a strefą tarcia (nawet 150°C). Z kolei systemy oparte na konwersji ciepła (z grzałek umieszczonych na ścian-

kach komory badawczej) obarczone są błędem wynikającym z różnicy temperatury powietrza wypełniającego komorę i temperatury strefy tarcia. Ponadto rozwiązania takie są podatne na znaczne przegrzanie strefy tarcia na etapie podgrzewania. Bazując na licznych doświadczeniach własnych i użytkowników stanowisk badawczych produkcji krajowej i zagranicznych, autorzy zaproponowali nowe rozwiązania obejmujące zmianę sposobu mocowania elementów testowych (kulki i tarczy) oraz zadawania i stabilizacji temperatury próbek badawczych. Opracowane rozwiązania zastosowano na stanowisku T-21 typu kula–tarcza produkcji ITeE – PIB, Radom. Wykonane badania weryfikacyjne potwierdziły poprawność przyjętych rozwiązań.

URZĄDZENIE BADAWCZE

Stanowisko T-21 przeznaczone jest do oceny właściwości tribologicznych materiałów stosowanych na elementy trące pracujące w wysokiej temperaturze. Za jego pomocą może być zbadana odporność na zużycie i współczynnik tarcia dowolnego skojarzenia materiałowego pracującego w ruchu ślizgowym, w zależności od temperatury otoczenia węzła tarcia, prędkości poślizgu, nacisków powierzchniowych i innych czynników. Skojarzenie badawcze składa się z nieruchomej kuli dociskanej siłą F do obracającej się z zadaną prędkością n tarczy – **Rys. 1**.



Rys. 1. Stanowisko T-21 typu kula–tarcza do tribologicznych badań materiałów konstrukcyjnych w wysokiej temperaturze: a) schemat komory badawczej, b) węzeł tarcia

Fig. 1. T-21 High temperature ball-on-disk testing machine for evaluation of friction and wear of heat-resisting materials: a) test chamber, b) tribosystem

Tarcza może być wykonana z dowolnego materiału. W przypadku badania powłoki nanosi się ją na powierzchnię tarczy. Węzeł tarcia umieszczony jest w izolowanej komorze wyposażonej w element grzewczy H pozwalający na uzyskanie i utrzymanie stałej temperatury w jej wnętrzu.

Urządzenie T-21 wyposażone jest w system sterujący-pomiarowo, w skład, którego wchodzi: zestaw czujników i przetworników pomiarowych, sterownik, cyfrowy wzmacniacz pomiarowy oraz komputer z oprogramowaniem sterująco-pomiarowym.

W czasie biegu badawczego mierzone są następujące wielkości:

- siła tarcia,
- sumaryczne zużycie liniowe elementów węzła tarcia,
- temperatura we wnętrzu komory badawczej,
- prędkość obrotowa,
- czas i liczba obrotów tarczy (droga tarcia).

Przebiegi mierzonych wartości wyświetlane są na bieżąco na ekranie monitora, a po zakończeniu biegu badawczego archiwizowane na dysku komputera. Silnik napędowy urządzenia jest automatycznie zatrzymywany po upływie zadanej czasu albo po osiągnięciu zadanej drogi tarcia (liczby obrotów tarczy). Po zakończeniu biegu badawczego istnieje możliwość wydrukowania raportu przedstawiającego wykresy poszczególnych mierzonych wielkości w funkcji czasu. Parametry techniczne stanowiska T-21 zestawiono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Parametry techniczne stanowiska T-21

Table 1. Technical specifications of T-21 tribotester

Parametr	Wartość
rodzaj ruchu	ślizgowy
geometria styku	skoncentrowany (punktowy)
nominalna średnica kuli	10 mm
nominalna średnica tarczy	25.4 mm (1")
prędkość poślizgu	do 1 m/s
obciążenie	do 100 N
promień tarcia	do 10 mm
temperatura w komorze badawczej	do 750°C
gabaryty urządzenia (S x W x G)	500 x 710 x 300 mm
waga urządzenia	50 kg
zasilanie	AC 230 V / 50 Hz
maksymalny pobór mocy	1.5 kW

Opracowane w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB (Radom) stanowisko T-21 przeznaczone było głównie do badania materiałów litych (głównie stopów metali) [L. 5]. Jednak wychodząc naprzeciw oczekiwaniom specjalistów z zakresu inżynierii materiałowej, postanowiono zastosować je także do badania elementów z powłokami przeciwzużyciowymi. Procedury badań elementów z powłokami przeciwzużyciowymi odbiegają od procedur stosowanych dla materiałów litych i środków smarowych. W badaniach wysokotemperaturowych powłok, podobnie jak w przypadku badań w temperaturze

pokojowej [L. 6] zastrzone są rygory co do otoczenia węzła tarcia i sposobu prowadzenia badania. Zaostżenia te dotyczą przede wszystkim stabilizacji temperatury (powłoki mogą być osadzane na elementach z węglików spiekanych o niskim przewodnictwie cieplnym) i pomiaru zużycia (badania należy prowadzić w takich warunkach, aby nie dopuścić do przetarcia powłoki). Ponadto sporo problemów stwarza umocowanie elementów węzła tarcia w komorze o wysokiej temperaturze, które jest spowodowane m.in. występowaniem odkształceń cieplnych, szczipień materiałów oraz luzowaniem się próbek na skutek różnej rozszerzalności cieplnej, np. metali i ceramiki.

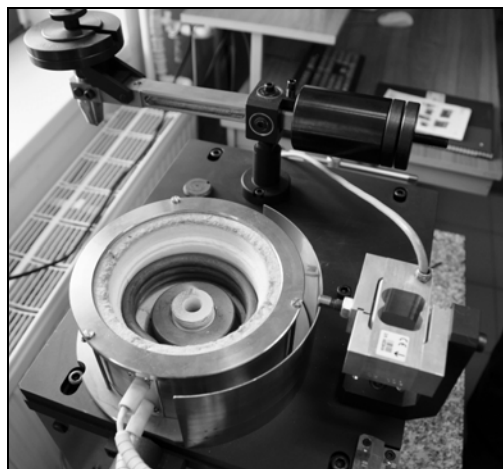
Korzystając z licznych doświadczeń użytkowników stanowisk o skojarzeniu kula–tarcza (różnych producentów) w kraju i za granicą, podjęto się modyfikacji urządzenia obejmującej:

- a) opracowanie sposobu mocowania elementów badawczych,
- b) rozwiązywanie problemu stabilizacji temperatury próbek.

MODYFIKACJA URZĄDZENIA T-21

Sposób mocowania elementów badawczych

Badane skojarzenie materiałowe znajduje się w izolowanej komorze badawczej przedstawionej na **Rys. 2**.



Rys. 2. Komora badawcza stanowiska T-21 typu kula–tarcza

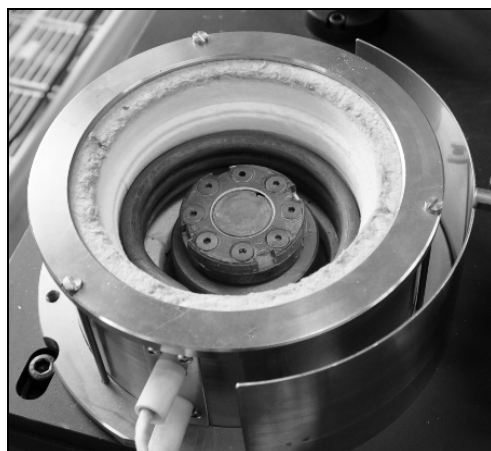
Fig. 2. Test chamber of T-21 ball-on-disc

Połączenie gwintowe stosowane do mocowania tarczy wykonane jest ze stali INCONEL 600 odpornej na działanie wysokiej temperatury (żaroodpornej). Przeprowadzone próby wykazały, że szczipienie gwintu następowało pod-

czas biegu badawczego przy temperaturze komory badawczej przekraczającej 500°C. W celu zabezpieczenia tych połączeń przed szczepianiem pokryto gwint azotkiem boru. Zabezpieczenie to stosowano każdorazowo przed montażem próbek przeznaczonych do badań w temperaturze przekraczającej 500°C. W zakresie temperatur 200°–500°C pokrywano gwint azotkiem boru raz na trzy biegi badawcze (stosowano azotek boru w spreju). W temperaturze poniżej 200°C azotek boru stosowano profilaktycznie, co 10 biegów badawczych.

Kolejna modyfikacja obejmowała mocowanie elementów badanych – tarczy i kulki. Założono, że elementy badawcze będą mocowane w temperaturze pokojowej, a wygrzanie elementów badawczych oraz komory będzie następowało w jednym cyklu. Demontaż odbywał się będzie po wystudzeniu komory badawczej. Dotychczas stosowane rozwiązania konstrukcyjne nie zapewniały należytego mocowania elementów wykonanych z materiałów o znacząco różniącym się od stali współczynniki rozszerzalności cieplnej, np. kulki ceramiczne, tarcze z węglików spiekanych.

Opracowano specjalne uchwyty do mocowania tarczy i kulki. Widok komory badawczej stanowiska T-21 z zamontowaną próbką (tarczą) przedstawia **Rys. 3**.

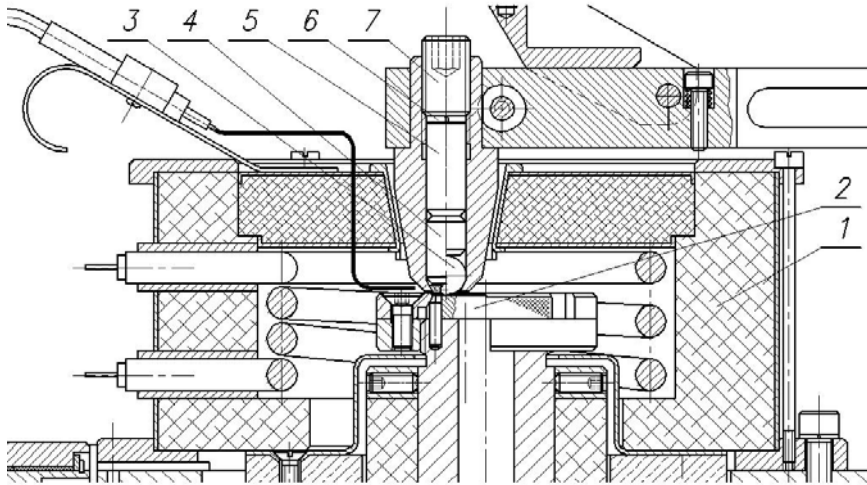


Rys. 3. Widok komory badawczej z zamontowaną próbką (tarczą)

Fig. 3. The view of test chamber with a mounted specimen (disc)

Na **Rys. 4** przedstawiono schemat komory badawczej (1) stanowiska T-21 z zamontowaną wewnątrz tarczą i kulką.

Tarcza (2) mocowana jest z wykorzystaniem dzielonej nakrętki widocznej na **Rys. 5**. Specjalna budowa nakrętki pozwala na jej demontaż w przypadku plastycznej deformacji gwintu.



Rys. 4. Schemat komory badawczej z zamontowanymi próbkami (opis w tekście)

Fig. 4. The scheme of test chamber with mounted specimens (description in the text)

Zespół mocowania przeciwpółki (kulki – 3) składa się z żaroodpornego popychacza (4), trzpienia dystansowego 5, podkładki sprężystej (6) oraz śruby dociskowej (7). Opracowany uchwyt pozwalał na mocowanie kulek ceramicznych o rozszerzalności cieplnej znacznie różniącej się od materiału stosowanego na uchwyt mocujący.

Podobnie jak w przypadku wrzeciona elementy mocujące próbki przed badaniem należy zabezpieczyć azotkiem boru. Elementy mocujące próbkę (tarczę) po demontażu, z widocznym białym osadem azotku boru przedstawia **Rys. 5**.



Rys. 5. Fotografia elementów mocujących próbkę (tarczę)

Fig. 5. The view of specimens (disc) mounting set

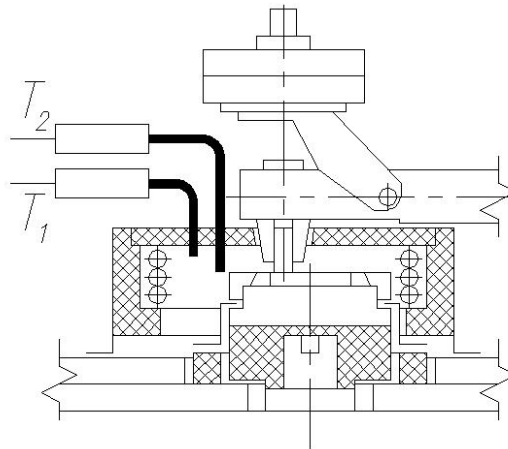
Przeprowadzone próby wygrzewania komory do 800°C potwierdziły skuteczność zabezpieczania przed luzowaniem oraz szczepieniami elementów mocujących próbki.

Sposób stabilizacji temperatury elementów badawczych

Kolejnym etapem prowadzonych prac była poprawa rozkładu temperatury w komorze badawczej. Dotychczas badania prowadzone z wykorzystaniem stanowiska badawczego T-21 realizowano z zastosowaniem dwóch termoelementów. Układ ten sprawdzał się w stanowisku badawczym T-11 stosowanym do badania środków smarowych do temperatury 300°C [L. 7]. Przeprowadzone badania ze stanowiskiem T-21 unaocznily, że wraz ze wzrostem temperatury rośnie różnica pomiędzy wartością zadaną a rzeczywistą temperaturą próbki. Aby tą różnicę zminimalizować, przeprowadzono badania dla 3 wariantów rozmieszczenia termoelementów w komorze badawczej. Do weryfikacji pomiarów wykorzystano kamerę termograficzną Ti-32 firmy FLUKE. Kamera to przenośne urządzenie pomiarowe pracujące w zakresie widma w zakresie promieniowania podczerwonego od 7,5 μm do 14 μm , wyposażone w niechłodzoną matrycę mikrobolometryczną (FPA) o rozdzielczości 320 x 240. Zakres pomiarowy termowizora zawarty jest w przedziale -20°C do +600°C przy dokładności $\pm 2^\circ\text{C}$. Termowizor posiada opcję zmiany współczynnika emisyjności jak i kompensacji odbitej temperatury.

Układ termoelementów, wariant I

Układ termoelementów I w komorze badawczej przedstawia **Rys. 6**. Do komory wprowadzone są dwa czujniki temperatury T1 i T2. Z wykorzystaniem termoelementu T1 realizowana jest regulacja temperatury w komorze. Czujnik termoelektryczny T2 mierzy temperaturę w pobliżu węzła tarcia. W temperaturze



Rys. 6. Układ termoelementów I

Fig. 6. Set of thermocouples I

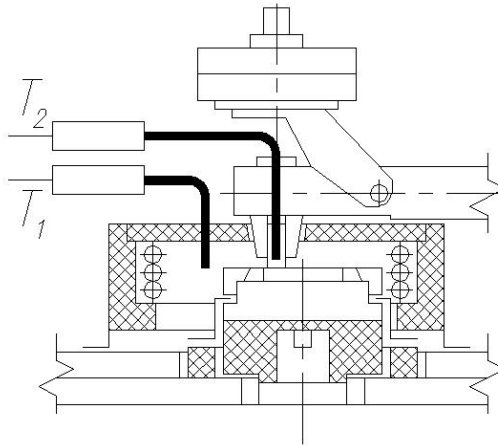
komory badawczej wynoszącej 700°C odczyt z T_2 znacząco odbiegał od odczytu z T_1 (ok. 200°C). Powstała wątpliwość, którą temperaturą należy się kierować przy regulacji temperatury próbki: T_1 czy T_2 ? Niestety pomiary wykonane za pomocą kamery termograficznej potwierdziły, że w tym rozwiązaniu żadna z termopar nie mierzy bezpośrednio temperatury próbek.

Układ termopar I ze względu na znaczne rozbieżności pomiędzy wartością zadaną a rzeczywistą nie nadaje się do regulacji temperatury w komorze badawczej stanowiska T-21.

Układ termoelementów II

W układzie termopar II do komory wprowadzono dwa czujniki temperatury T_1 i T_2 rozmieszczone jak na **Rys. 7**. Z wykorzystaniem termoelementu T_1 realizowana była regulacja temperatury w komorze. Czujnik T_2 mierzył temperaturę w trzpieniu, w odległości od płaszczyzny współpracy ok. 1 mm.

Dla zaprezentowanego układu wykonano badania weryfikacyjne. Wyniki pomiarów temperatury w punktach T_1 i T_2 oraz z powierzchni tarczy (pomiar termowizyjny) podczas nagrzewania komory zestawiono w **Tabeli 2** i na **Rys. 8**.



Rys. 7. Układ termoelementów II

Fig. 7. Set of thermocouples II

Dla zadanej wartości 150°C temperatura próbki (tarczy) wynosiła ok. 68°C , czyli była o ok. 82°C niższa od wartości zadanej. Użytkownik przy programowaniu testu kieruje się wartością zadaną i wskazaniem termopary T_2 . Prowadzi to jednak do znacznych błędów pomiaru temperatury próbki (tarczy). Wyniki analizy błędów pomiarów przedstawiono w **Tabeli 3**. Błąd bezwzględny obliczono ze wzoru:

$$\Delta T = |T_F - T_Z|.$$

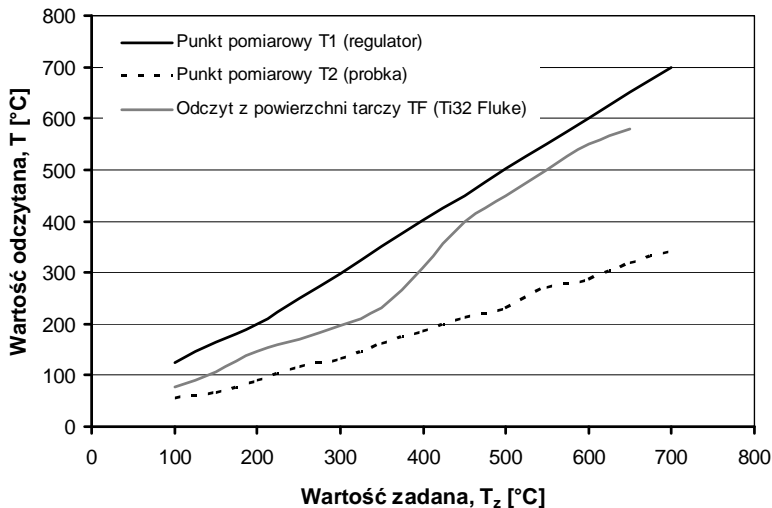
Błąd względny obliczono ze wzoru:

$$\delta = \left| \frac{T_F - T_Z}{T_Z} \right|.$$

Tabela 2. Wyniki pomiaru temperatury w komorze badawczej – układ termoelementów II

Table 2. The results of temperature measurements in test chamber – set of thermocouples II

Lp.	Wartość zadana T_Z °C	Punkt pomiarowy T_1 (regulator) °C	Punkt pomiarowy T_2 (próbka) °C	Odczyt z powierzchni tarczy T_F °C (Ti32 Fluke)
1	100	124	55	76
2	150	166	68	106
3	200	199	90	147
4	250	249	116	170
5	300	299	134	198
6	350	351	162	230
7	400	401	187	308
8	450	450	212	400
9	500	501	230	450
10	550	551	270	500
11	600	600	286	550
12	650	650	320	580
13	700	700	342	<i>poza zakresem</i>



Rys. 8. Wyniki pomiaru temperatury w komorze badawczej – układ termoelementów II

Fig. 8. The results of temperature measurements in test chamber – set of thermocouples II

Tabela 3. Wyniki analizy błędów – układ termoelementów II

Table 3. The results of error analyses – set of thermocouples II

Lp.	Wartość zadana T_z	Punkt pomiarowy T_2 (próbka)	Błąd bezwzględny ΔT	Błąd względny [%] δ
1	100	55	24	24%
2	150	68	44	29%
3	200	90	53	27%
4	250	116	80	32%
5	300	134	102	34%
6	350	162	120	34%
7	400	187	92	23%
8	450	212	50	11%
9	500	230	50	10%
10	550	270	50	9%
11	600	286	50	8%
12	650	320	70	11%
13	700	342	-	-

W układzie termoelementów II błąd bezwzględny pomiędzy wartością zadaną a rzeczywistą temperaturą tarczy przekraczał 100°C . Temperatura tarczy była zawsze niższa niż temperatura zadana T_z . Układ ten charakteryzował się błędem względnym przekraczającym 30%, co dyskwalifikowało go jako układ regulacyjno-pomiarowy komory urządzenia badawczego.

Układ termoelementów III

W wariancie III do komory wprowadzony był tylko jeden termoelement T_1 . Położenie czujnika T_1 w komorze badawczej przedstawiono na **Rys. 10**. Koniec termoelementu znajdował się w odległości nie większej niż 1 mm nad powierzchnią tarczy.

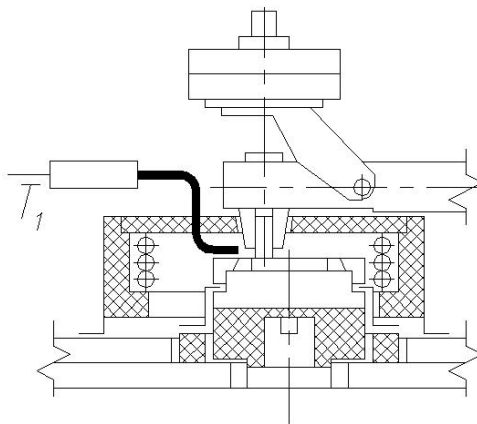
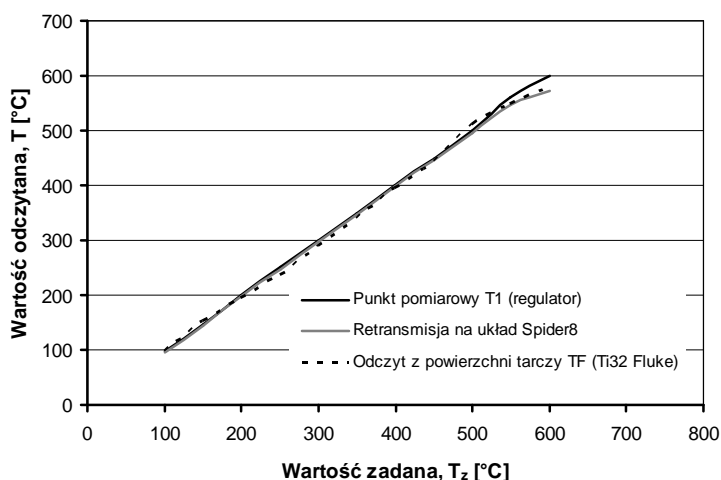
**Rys. 10. Układ termoelementów III**

Fig. 10. Set of thermocouples III

Wyniki pomiarów temperatury w punkcie T_1 oraz powierzchni tarczy zmierzonej za pomocą kamery termograficznej zestawiono w **Tabeli 4** i na **Rys. 11**. Układ termoelementów III pozwolił na znacznie dokładniejszą regulację temperatury w komorze badawczej niż wcześniej omówione rozwiązania. Wyniki analizy błędów pomiarowych wskazania w stosunku do wielkości zadanej zestawiono w **Tabeli 5**. Błąd względny wskazań termoelementów w całym zakresie regulacji nie przekraczał 3%. Układ termoelementów III uznano za właściwy przy wysokotemperaturowych badaniach materiałów litych oraz elementów z powłokami przeciwzużyciowymi.

Tabela 4. Wyniki pomiaru temperatury w komorze badawczej – układ termoelementów III
Table 4. The results of temperature measurements in test chamber – set of thermocouples III

Lp.	Wartość zadana T_z °C	Punkt pomiarowy T_1 (regulator) °C	Retransmisja na układ Spider8 °C	Odczyt z powierzchni tarczy T_F °C (Ti32 Fluke)
1	100	98	95	99
2	150	147	144	152
3	200	200	197	196
4	250	250	247	237
5	300	300	297	290
6	350	349	346	340
7	400	400	397	396
8	450	449	446	444
9	500	500	496	511
10	550	560	546	550
11	600	600	573	580



Rys. 11. Wyniki pomiaru temperatury w komorze badawczej – układ termoelementów III
Fig. 11. The results of temperature measurements in test chamber – set of thermocouples III

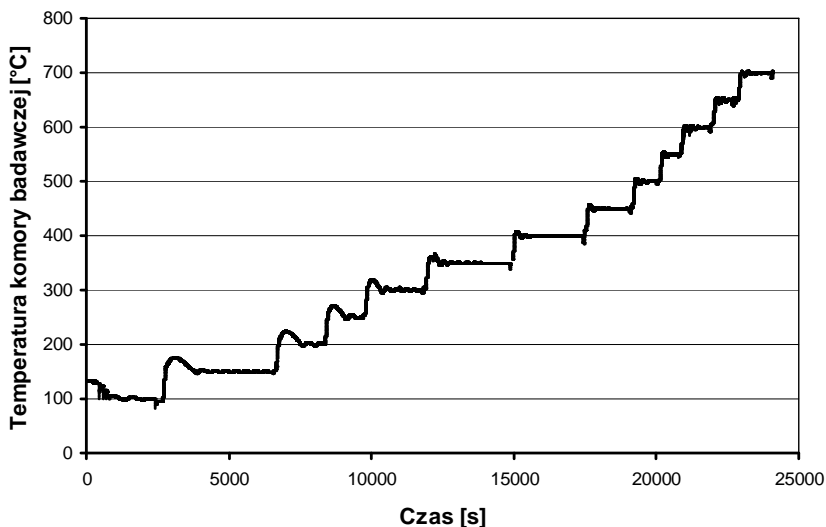
Tabela 5. Wyniki analizy rozkładu temperatury w komorze badawczej – układ termoelementów III

Table 5. The results of temperature distribution analysis in the test chamber – set of thermocouples III

Lp.	Wartość zadana, T_z °C	Punkt pomiarowy T_1 , °C	Błąd bezwzględny ΔT	Błąd wzgl. [%] δ
1	100	98	1,4	1%
2	150	147	2,4	2%
3	200	200	3,8	2%
4	250	250	13,2	5%
5	300	300	9,9	3%
6	350	349	10,0	3%
7	400	400	4,4	1%
8	450	449	5,9	1%
9	500	500	10,9	2%
10	550	560	0,0	0%
11	600	600	20,4	3%

Stabilizacja temperatury w komorze

Przykładowy przebieg temperatury, w trakcie stopniowego nagrzewania komory do 700°C, stosując wybrany układ rozmieszczenia termoelementów, przedstawiono na **Rys. 12**.

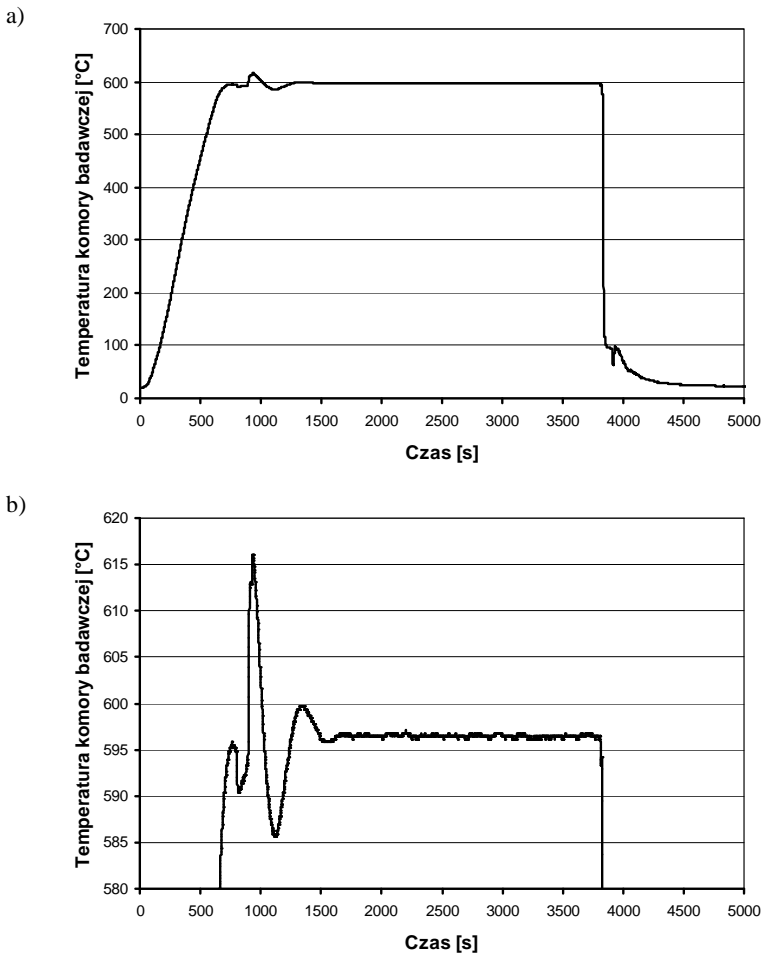


Rys. 12. Temperatura w komorze badawczej przy nagrzewaniu stopniowym do 700°C – układ termoelementów III

Fig. 12. Temperature in test chamber during stepwise heating up to 700°C – set of thermocouples III

Praktycznie przy każdej zadanej temperaturze (od 100°C do 700°C) obserwowano przekroczenie zadanej wartości nawet o kilkanaście procent, co mogło powodować niepożądane zmiany w materiale badanym (przegrzanie).

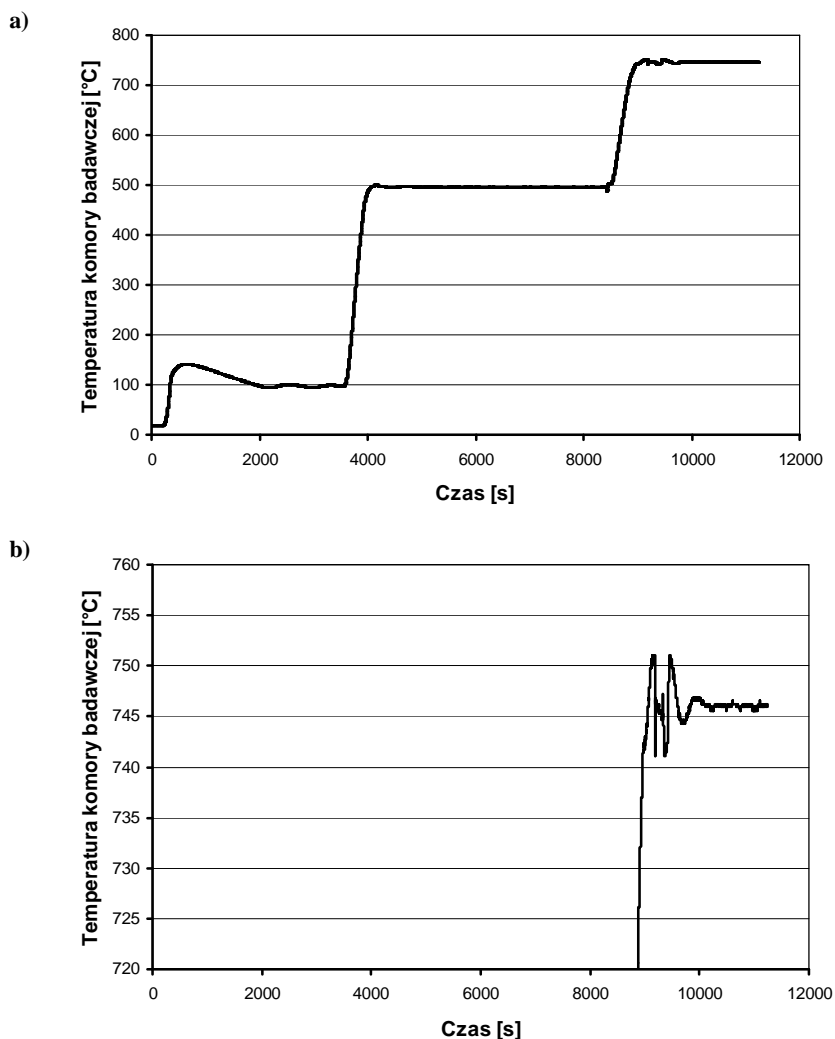
Ze względu na problem przegrzania próbek postanowiono ograniczyć prędkość wzrostu temperatury z 10°C/s do 1°C/s. Przebieg procesu nagrzewania węzła tarcia (w komorze badawczej) z ograniczoną prędkością narastania temperatury przedstawiono na **Rys. 13**. Jak widać z tego wykresu, w początkowym okresie następuje przegrzanie badanego elementu o ok. 16°C.



Rys. 13. Przebieg wygrzewania komory badawczej do temperatury 600°C: a) cały przebieg, b) wybrany fragment – układ termoelementów III

Fig. 13. Temperature in test chamber during heating up to 600°C: a) the whole process, b) selected period – set of thermocouples III

Następnie zastosowano oprócz ograniczonej prędkości nagrzewania dodatkowo stabilizację w temperaturach 100°C i 500°C (**Rys. 14**). Czynności te pozwoliły na znaczne ograniczenie problemu przekraczania zadanej temperatury. Przy temperaturze komory 750°C odnotowano przekroczenie jedynie o kilka stopni Celsjusza.



Rys. 14. Przebieg wygrzewania komory badawczej do temperatury 750°C: a) cały przebieg, b) wybrany fragment (układ termoelementów III)

Fig. 14. Temperature in test chamber during stepwise heating up to 750°C: a) the whole process, b) selected period (set of thermocouples III)

PODSUMOWANIE

Bazując na doświadczeniach własnych i użytkowników stanowisk badawczych produkcji krajowej i zagranicznych autorzy zaproponowali nowe rozwiązania obejmujące zmianę sposobu mocowania elementów testowych (kulki i tarczy) oraz zadawania i stabilizacji temperatury próbek w komorze badawczej. Z przebadanych trzech wariantów rozmieszczenia czujników pomiaru temperatury w komorze badawczej przyjęto rozwiązanie III, w którym błąd względny wskazań termoelementów w całym zakresie regulacji nie przekraczał 3%. Zaproponowany dwustopniowy sposób nagrzewania elementów z ograniczoną prędkością nagrzewania pozwolił na znaczne zmniejszenie uchybu regulacji temperatury węzła tarcia. Opracowane rozwiązania znalazło zastosowanie w stanowisku T-21 typu kula–tarcza produkcji ITeE – PIB i może być wykorzystywane również po odpowiedniej modyfikacji w urządzeniach badawczych innych producentów. Należy również podkreślić, że tak zmodernizowane stanowiska T-21 zostało wykorzystane do wielu projektów i prac dyplomowych [L. 8, 9, 10].

LITERATURA

1. Szparaga J., Ratajski J.: Polioptymalizacja powłok przeciwzużyciowych TiAlN i TiN nakładanych metodą PVD na narzędzia do obróbki drewna. PAK 57 09 (2011) 2–6.
2. Bobzin K., Bagcivan N., Ewering M., Brugnara R.H.: Vanadium Alloyed PVD CrAlN Coatings for Friction Reduction in Metal Forming Applications. Tribology in industry 304 (2012) 101–107.
3. Wang L., Zhou J., Duszczyc J., Katgerman L.: Friction in aluminium extrusion - Part 1: A review of friction testing techniques for aluminium extrusion. Tribology International 56 (2012) 89–98.
4. Bjork T., Bergstrom J., Hogmark S.: Tribological simulation of aluminium hot extrusion. Wear 224 (1999) 216–225.
5. Śleboda T., Krawczyk J., Zimowski S., Kot M.: Wysokotemperaturowe własności tribologiczne stopów Fe-Al. Tribologia 3 (2012) 209–215.
6. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: A method for tribological testing of thin hard coatings. Tribotest Journal. 2002, nr 9, s. 117–130.
7. Drabik J.: Wymuszenia cieplne w testach tribologicznych a skuteczność działania nietoksycznych smarów plastycznych. Tribologia 4 (2012) 49–58.
8. Szczerek M., Michalczewski R., Sánchez Villarreal C., Michalak M.: Tribological Characterisation and Wear Mechanisms of PVD Coatings Designed for High Temperature Applications. Materiały Międzynarodowej Konferencji Asiatrib 2014 w Agra, Indie. 2014. (materiał opublikowany w postaci elektronicznej, nr art. TSI914659).
9. Michalak M., Michalczewski R., Szczerek M., Demófilo Maldonado Cortés, Carlos Sánchez Villarreal: Tribological Characteristics of PVD Coatings Designed for Applications at High Temperatures. Materiały Międzynarodowej Konferencji „23rd

International Baltic Conference on Materials Engineering 2014” 23–24.10.2014. Litwa, Kowno, s. 10.

10. Carlos Sánchez Villarreal: Friction and wear resistance of PVD coated parts at high temperature. (Praca inżynierska. Promotor: R. Michalczewski) Uniwersytet w Monterrey (Monterrey, Meksyk) – ITeE – PIB (Radom, Polska). 2013, 135 stron.

Summary

In high-temperature tribological testing of elements, in particular ceramics or coatings, there are a wide range of technical problems. The main technical problems include the method of fixing of the test specimens and the temperature stabilization of the surface layer of the test elements during the test. Unfortunately, each of the existing solutions used in commercially available devices has drawbacks. The paper presents original solutions involving a change to a method for the fixing of test elements (balls and disks) and the setting and temperature stabilization in the test chamber. The solutions developed were used in a T-21 ball/pin-on-disc tribotester. The verification tests have confirmed the correctness of the solutions adopted.

