



JAROSŁAW MIKOŁAJCZYK

# TRIBOTESTERY

BUDOWA I PRZEZNACZENIE

**Jarosław Mikołajczyk**

# **TRIBOTESTERY**

# **BUDOWA I PRZEZNACZENIE**

**RADA WYDAWNICZA:**

Donat Mierzejewski (przewodniczący), Joanna Kryza (sekretarz), Jan Polcyn, Paweł Dahlke,  
Feliks Jaroszyk, Wojciech Maliszewski, Piotr Gorzelańczyk, Sylwester Sieradzki

**RECENZENT:**

Prof. dr hab. inż. Bogdan Żółtowski

**REDAKCJA TECHNICZNA, PROJEKT OKŁADKI:**

Damian Leszczyński



© Copyright by Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica w Pile

Sto dziewięćdziesiąta piąta publikacja  
Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica w Pile

Piła 2019

e-ISBN  
978-83-62617-90-6

„...Przedstawiona do recenzji publikacja stanowi kontynuację prac wcześniejszych autora związanych z rozwiązaniami konstrukcyjnymi różnych maszyn tarciovych. Tribologia, a z nią konstrukcje maszyn tarciovych rozwijają się bardzo dynamicznie, a treści tego opracowania stanowią istotny wkład w bogactwo rozwiązań technicznych, materiałowych, koncepcyjnych oraz informatycznych”.

Z recenzji prof. dr hab. inż. Bogdana Żółtowskiego

## Spis treści

1. GENEZA I PROBLEMATYKA PRACY.....	6
2. CHARAKTERYSTYKA PODSTAWOWYCH CZYNNIKÓW ZWIĄZANYCH Z BADANIAM I TRIBOLOGICZNYMI.....	7
2.1. Warstwa wierzchnia .....	7
2.1.1. Wielkości opisujące stan warstwy wierzchniej.....	8
2.1.1.1. Cechy fizykochemiczne warstwy wierzchniej.....	10
2.1.1.2. Cechy struktury geometrycznej powierzchni .....	11
2.2. Rodzaje procesów zużycia tribologicznego.....	19
2.3. Środki smarowe i dodatki uszlachetniające.....	26
2.4. Preparaty eksploatacyjne.....	30
2.4.1. Preparaty o działaniu chemicznym.....	31
2.4.2. Preparaty z cząsteczkami środków smarowych stałych.....	33
2.4.3. Preparaty umożliwiające smarowanie na zasadzie tzw. przenoszenia selektywnego (PS).....	40
3. SIECI I KOMÓRKI ELEMENTARNE.....	41
4. MASZYNY TARCIOWE .....	45
4.1. Automatyczny zespół przeznaczony do badania węzła tarcia wg patentu RU 2165 077 .....	45
4.2. Komora badawcza maszyny tarciowej z węzłem tarcia typu pierścień-kłoczek wg patentu RU 2163 013 C2 .....	56
4.3. Stanowisko do badania trwałości zazębienia obiegowej przekładni cykloidalnej.....	61
4.4. Urządzenie do badań tribologicznych materiałów wg patentu SU 1219962 A .....	66
4.5. Urządzenie do badań tribologicznych materiałów w szczególności środków smarowych wg patentu SU 1670520 A1.....	68
4.6. Tribometr do badań frettingu typu trzpień-tarcza wg zgłoszenia patentowego 396512 .....	70
4.7. Tester zmęczeniowy SKMR-2.....	70
4.8. Zmodernizowany węzeł tarciowej maszyny Amslera .....	71
4.9. Stanowisko do badań tribologicznych z rejestracją sygnałów emisji akustycznej .....	75
4.10. Stanowisko do przyspieszonego badania zużycia grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych.....	77
4.11. Urządzenie do badania ścieralności T-07 .....	80
4.12. Tribotester T-20 typu kula-tarcza .....	90
4.13. Maszyna do badania zużycia w glebie typu „wirująca misa” .....	100
4.14. Stanowisko do badań zużycia elementów roboczych w glebie metodą „ground tunneling” .....	107
4.15. Stanowisko badawcze z płótnem ściernym.....	108
4.16. Stanowisko do badań ściernych wysokotemperaturowych typu HT-ET .....	110
4.17. Stanowisko badawcze zbudowane w oparciu o metodę Hawortha .....	111
4.18. Aparat Millera .....	112
4.19. Urządzenie do pomiaru odporności na zużycie ścierne metodą MWT .....	114
4.20. Tribotester typu CIAT .....	115
4.21. Tribotester typu zbiornik gleby (soil bin).....	116
4.22. Tribotester typu HT-CIAT .....	120
4.23. Tribotester CML-2 (SMC-2).....	121
5. PODSUMOWANIE.....	150
LITERATURA .....	151

## SYMBOLE I AKRONIMY CZĘŚCIEJ UŻYWANE W PRACY

### Symbole

$F$	–	siła obciążająca, N,
$L$	–	droga tarcia, m,
$H$	–	stan materiału – jego twardość, HRC,
$P$	–	moc, kW,
$Ra$	–	średnia arytmetyczna rzędnych profilu, $\mu\text{m}$ ,
$Rpk$	–	zredukowana wysokość wzniesienia profilu chropowatości, $\mu\text{m}$ ,
$Rq$	–	średnia kwadratowa rzędnych profilu, $\mu\text{m}$ ,
$Rt$	–	całkowita wysokość profilu, $\mu\text{m}$ ,
$Spk$	–	zredukowana wysokość wzniesień powierzchni chropowatości, $\mu\text{m}$ ,
$Sq$	–	średnie kwadratowe odchylenie od płaszczyzny średniej, $\mu\text{m}$ ,
$St$	–	całkowita wysokość powierzchni, $\mu\text{m}$ ,
$T$	–	temperatura, $^{\circ}\text{C}$ ,
$v$	–	prędkość ruchu względnego, m/min,
$\alpha$	–	kąt skojarzenia (przecięcia) charakterystycznych śladów po obróbce (kierunkowość struktury), $^{\circ}$ ,
$\Delta l$	–	zmiana (ubytek) wymiaru liniowego, $\mu\text{m}$ ,
$\Delta m$	–	zmiana (ubytek) masy, mg,

### Skróty i akronimy

2 D	–	układ dwuwymiarowy,
3 D	–	układ trójwymiarowy,
EWV	–	eksploatacyjna warstwa wierzchnia,
PE	–	preparat eksploatacyjny,
PS	–	przenoszenie selektywne,
SGP	–	struktura geometryczna powierzchni,
SM	–	kompozycja smarowa – rodzaj,
TWW	–	technologiczna warstwa wierzchnia,
WW	–	warstwa wierzchnia.

## 1. GENEZA I PROBLEMATYKA PRACY

Praktycznie wszystkie procesy zużywania są nieodłącznie związane z istnieniem obiektów technicznych. Wpływają one destrukcyjnie na ich stan techniczny, prowadzą do dających się obserwować uszkodzeń. Ponieważ większość tych uszkodzeń zachodzi w warstwie wierzchniej (WW) współpracujących elementów, to właśnie warstwie tej nadaje się cechy zwiększające odporność na niszczące działanie wymuszeń podczas pracy maszyn i urządzeń. Warstwa wierzchnia jest więc obiektem badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych krajowych i zagranicznych. Stwierdzono, że od cech warstwy wierzchniej ukonstytuowanej w wyniku realizacji założonego procesu technologicznego zależy mechanizm i intensywność procesu zużywania, np. [Godet 1984; Piekoszewski i inni 2000; Rigney i inni 1978; Styp-Rekowski 2001]. Uzasadnione jest więc podejmowanie badań mających na celu lepsze poznanie mechanizmu tego procesu a zwłaszcza sposobów sterowania nim, gdyż w rezultacie pozwala to na zmniejszenie niepożądanych jego skutków.

Podstawowym sposobem, zmniejszającym intensywność procesu zużywania jest smarowanie współpracujących powierzchni. Do tego celu używa się środków smarowych stanowiących zazwyczaj mieszaninę oleju bazowego i dodatków smarowych. Poznając jak najobszerniej reguły i mechanizmy, które występują podczas zużywania elementów pary ciernej, można dobrać dodatki smarowe w taki sposób, aby podczas eksploatacji zapewniały minimalne zmiany w warstwie wierzchniej, a zarazem jak najdłuższy czas pracy z niezmiennymi, założonymi konstrukcyjnie cechami pary trącej.

Praktycznie każdy techniczny obiekt charakteryzuje się pewnym zbiorem użytkowych cech. Jeżeli myślimy o maszynach, to ich osiągi oraz możliwości techniczne jak np. niezawodność, trwałość, wynikają z pewnych cech reprezentowanych przez zespoły, które tworzą konstrukcyjną strukturę danego obiektu. Zespoły te tworzą zbiór kinematycznych par, więc można powiedzieć, że dany zbiór użytkowych cech zdeterminowany jest przez pewne cechy przypisane danym kinematycznym parom. Cechy danych obiektów zależą również od stanu warstwy wierzchniej. Warstwa wierzchnia (WW), która konstytuuje się w procesie wytwórczym, nadal ulega zmianom w czasie eksploatacji obiektu. Aby zminimalizować niekorzystne jej zmiany w czasie stosuje się smarowanie. W wielu ośrodkach od wielu lat prowadzone są badania, m.in. nad wpływem dodatków smarowych na proces zużywania par kinematycznych przy kryteriach tribologicznych, np. [Mikołajczyk 2009; Styp-Rekowski i inni 2009; Styp-Rekowski, Świerk, Mikołajczyk 2010; Mikołajczyk 2012; Styp-Rekowski 2001; Styp-Rekowski 1990; Mikołajczyk 2011; Mikołajczyk 2012; Mikołajczyk i inni 2012; Mikołajczyk i inni 2015; Mikołajczyk i inni 2016]. Ogólnie prace te można podzielić na teoretyczne i praktyczne. Prace teoretyczne przedstawiają różne hipotezy, teorie, natomiast prace praktyczne albo je potwierdzają albo odrzucają. Przeprowadzanie badań praktycznych wymaga stanowisk badawczych. Tym właśnie stanowiskom badawczym – tribotesterom – przeznaczona jest niniejsza publikacja. Przedstawia ona co prawda tylko kilkadziesiąt tribologicznych stanowisk badawczych, co stanowi oczywiście mały ułamek z całości wszystkich rodzajów tribotesterów na świecie, ale może stanowić inspirację do dalszych prac nad rozwojem tribologicznych stanowisk badawczych.

## 2. CHARAKTERYSTYKA PODSTAWOWYCH CZYNNIKÓW ZWIĄZANYCH Z BADANAMI TRIBOLOGICZNYMI

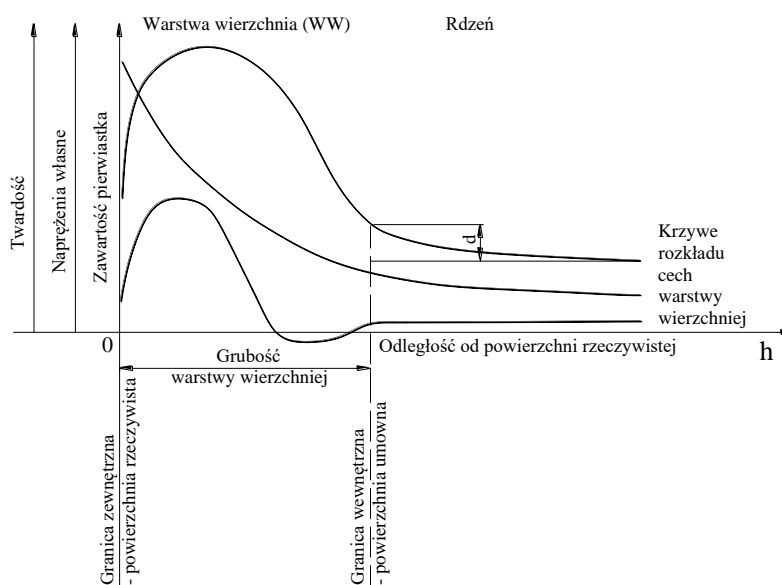
### 2.1. Warstwa wierzchnia

W literaturze tematu można znaleźć bardzo liczne definicje WW. Choć niekiedy różnią się one między sobą to istota WW pozostaje zawsze taka sama. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia mogą być przytoczone poniżej definicje.

Zgodnie z fundamentalną pozycją [Burakowski, Wierzchoń 1995], jako warstwę wierzchnią elementu rozumie się: „... zbiór punktów materialnych zawartych pomiędzy jego powierzchnią zewnętrzną a pewną powierzchnią umowną, będącą granicą zmian wartości cech strefy podpowierzchniowej, powstałych w wyniku różnych wymuszeń zewnętrznych: nacisku, temperatury, czynników chemicznych, elektrycznych, bombardowania cząstkami naładowanymi i innymi. Pozostała część materiału przedmiotu poza warstwą wierzchnią – to rdzeń.”

Powierzchnia rzeczywista elementów urządzeń, która charakteryzuje się bardzo złożoną budową stereometryczną – występują na niej nierówności o różnych wymiarach, kształtach i położeniu – stanowi zewnętrzną część warstwy materiału zwanej warstwą wierzchnią (WW).

W polskiej normie dotyczącej warstwy wierzchniej [PN-87/M-04250] zdefiniowano ją jako: „... warstwa materiału ograniczona rzeczywistą powierzchnią przedmiotu, obejmująca tę powierzchnię oraz część materiału w głąb od powierzchni rzeczywistej, która wykazuje zmienione cechy fizyczne a czasami chemiczne w stosunku do cech tego materiału w głębi przedmiotu”. Zmiany cech WW w funkcji odległości od powierzchni, zgodnie z wyżej wymienioną definicją przedstawiono schematycznie na rysunku 2.1. Przedstawione na nim wielkości stanowiące cechy charakterystyczne WW są tylko przykładowe.



Rys. 2.1. Rozmieszczenie przykładowych cech w WW [PN-87/M-04250]

Definicję WW bardzo podobną do zawartej w cytowanej normie, przedstawiono także we wcześniejszym opracowaniu [Górecka, Polański 1983].

Zwiększenie zainteresowania i zintensyfikowania badań WW elementów maszyn obserwuje się od przełomu XIX i XX w. Początkowo, za jedyną cechę charakterystyczną powierzchni uzyskanej w rezultacie obróbki skrawaniem uznawano jej gładkość (chropowatość). W późniejszym okresie badania rozszerzono na warstwy wierzchnie uzyskane innymi technikami. Rozszerzono także zbiór wielkości, które opisują stan WW. Prace te umożliwiają bliższe poznanie

i rozszerzenie wiedzy o cechach powierzchni uzyskanych jako wynik różnych procesów obróbki, głównie wykończeniowej.

Liczne badania, np. [Bezjazyčný 2002; Czarniecki 2005; Daca i inni 2003; Dagnall 1986; Kolman 1965; Latoś 1999; Lawrowski 2002; Lawrowski 2009, Legutko, Nosal 2004; Leszek 1994; Leśniewski, Krawiec 2004; Pietrusewicz 1985; Sadowski 1997; Sadowski 2003; Styp-Rekowski 1990; Szulc 1965; Thomas 1999; Wieczorkowski i inni 1996; Zakościelny 1981; Zwierzycki, Grądkowski 2000; Żurowski, Sadowski 2001] wykazały ścisły związek między stanem WW elementów maszyn, a cechami tribologicznymi tych elementów, np. odpornością na zatarcie, odpornością na zużywanie, współczynnikiem tarcia, trwałością tribologiczną. Można zatem stwierdzić, że stan WW w decydujący sposób determinuje cechy użytkowe całej maszyny. Stwierdzono także, że od stanu WW utworzonej w wyniku realizacji założonego procesu technologicznego, zależy przebieg zużywania – jego intensywność, mechanizm oraz skutki działania [Fleischer 1999; Godet 1984; Styp-Rekowski 2006; Piekoszowski, Szczerek 2000; Piekoszowski i inni 1999; Pietrusewicz 1985; Rigney 1978; Roylance i inni 1991; Sadowski 2006; Styp-Rekowski 2001; Styp-Rekowski, Szala 1989; Żurowski, Sadowski 2001]. Z tego powodu WW jest przedmiotem badań realizowanych w wielu ośrodkach naukowych – zagranicznych i krajowych. Zainteresowanie to podtrzymują ciągle powiększające się zbiory tworzyw konstrukcyjnych oraz technik konstituowania WW, a także zwiększające się możliwości badawcze zarówno w sferze aparaturowej jak i stosowanych metod.

Warstwa wierzchnia elementów maszyn konstituowana podczas procesu wytwarzania jest nazywana technologiczną warstwą wierzchnią (TWW) [Burakowski 2004; Burakowski 1998; Burakowski 1993; Burakowski 1996; Burakowski, Wierchoń 1995; Legutko, Nosal 2004; Leszek 1994]. Jej cechy, tzn. właściwości, własności i struktura, w największym stopniu zależą od parametrów i rodzaju stosowanej obróbki wykończeniowej oraz od rodzaju materiału konstrukcyjnego, z którego wykonano współpracujące elementy.

Uzyskane w procesie wytwórczym cechy technologiczne nie są stałe. Pod wpływem eksploatacyjnych wymuszeń zewnętrznych, np. obciążenia, temperatury, oddziaływania środowiska itp., ulegają one zmianom. Zmiany mogą również wystąpić samorzutnie, bez udziału czynników zewnętrznych, np. w rezultacie starzenia się, czy też odprężania. Warstwa wierzchnia w tej fazie istnienia maszyny nazywa się eksploatacyjną warstwą wierzchnią (EWW) [Burakowski 2004; Burakowski 1988; Burakowski, Marczał 1999; Lawrowski 2002; Legutko, Nosal 2004].

Uwzględniając fazy istnienia („życia”) maszyny dwie wymienione wyżej odmiany WW występują odpowiednio w fazach:

- wytwarzania elementów maszyn i montażu ich w całość – TWW, przy czym jej cechy są określone już w fazach konstruowania i projektowania,
- eksploataowania maszyny – EWW.

W literaturze znaleźć można zróżnicowane informacje jak należy kwalifikować WW elementów w fazie przejściowej, tj. podczas magazynowania i transportu – do EWW czy TWW. W pracy [Burakowski, Marczał 1995] proponuje się zaliczyć ją do EWW, natomiast autor pracy [Nosal 2012] zalicza ją do TWW. Należy zaznaczyć, że swoje propozycje autorzy popierają merytorycznymi argumentami. Jest to o tyle istotne, że w tej fazie istnienia elementu cechy jego warstwy wierzchniej też mogą ulegać zmianom, samorzutnie, szczególnie jeśli ten okres jest długi, bądź pod wpływem wymuszeń zewnętrznych, np. oddziaływanie składników aktywnych substancji konserwujących, czy też drgania podłoża. Odnosząc WW w tej fazie do istniejących jej odmian, tj. TWW i EWW, nazywa się ją potehnologiczną lub przedeksploatacyjną warstwą wierzchnią.

### **2.1.1. Wielkości opisujące stan warstwy wierzchniej**

Cechy użytkowe maszyn są funkcją m.in. wartości wielkości określających stan warstwy wierzchniej wywołanych obróbką oraz eksploatacją. Trwałość elementów maszyn i niezawodność



obiektów technicznych, powinna więc dać się opisać cechami WW elementów par kinematycznych biorących udział w procesie tarcia z uwzględnieniem przewidywanych wymuszeń zewnętrznych. Z tego powodu celowe są próby utworzenia zbioru istotnych parametrów stanu WW elementów maszyn, na podstawie których będzie można wnioskować o stanie obiektu technicznego oraz przewidywać możliwe uszkodzenia. Zadania te są podstawowymi czynnościami diagnostyki technicznej, i są to odpowiednio: diagnozowanie i prognozowanie [Żółtowski 1996; Żółtowski, Cempel 2004]. Mają one na celu podniesienie jakości użytkowej maszyn oraz wszelkich urządzeń, poprzez umożliwienie sterowania cechami trwałościowo–niezawodnościowymi.

Stan warstwy wierzchniej wyznaczany jest przez zbiór cech, które można opisać parametrami: stereometrycznymi, fizykochemicznymi i stereometryczno–fizykochemicznymi [Burakowski 1998; Burakowski 2004; Burakowski, Wierzchoń 1995; Dagnall 1986; Daca i inni 2003; Hebda, Wachal 1980; Szczerek, Wiśniewski 2000; Szulc 1965].

O własnościach i właściwościach WW w największym stopniu decydują parametry opisujące strukturę stereometryczną powierzchni, nazywaną częściej strukturą geometryczną powierzchni (SGP) [Burakowski 2002; Burakowski 1989; Burakowski 1988; Burakowski i inni 1992; Burakowski, Marczak 1999; Burakowski, Wierzchoń 1995; Czarnecki 2005; Dagnall 1986; Dąbrowski, Marciniak 1999; Górecka, Polański 1983; Górski 1970; Hebda, Wachal 1980; Hutchings 1992; Vorburger 1997; Whitehouse 1982]. Strukturę tę tworzą nierówności powierzchni, czyli wzniesienia i wgłębienia będące śladami realizowanej obróbki lub będące skutkami procesu zużywania. W zależności od rozmieszczenia charakterystycznych elementów SGP powierzchnia może mieć charakter anizotropowy – o ukierunkowanym usytuowaniu wzniesień i wgłębien (kierunkowość struktury) lub izotropowy – nie wykazujący takiego ukierunkowania [Nowicki 1991; Nyc 2001; Oczóś, Lubomow 2002; Oczóś, Lubomow 1998; Oczóś, Lubimow 2003].

Do grupy parametrów opisujących SGP zalicza się następujące parametry [Burakowski, Wierzchoń 1995; Godet 1984; Górecka, Polański 1983; Nowicki 1985; Nowicki 1991; Nowicki, Stefko 1970; Oczóś, Lubimow 2001; Oczóś i inni 2001; Wieczorkowski i inni 1996; Wieczorkowski i inni 2003]:

- chropowatość,
- kierunkowość,
- defekty SGP,
- falistość.

Do parametrów fizykochemicznych określających stan WW zalicza się wielkości opisujące następujące cechy [Burakowski 1998; Burakowski, Wierzchoń 1995; Handzel-Powierża 1990]:

- strukturalne materiału ( jego budowa),
- mechaniczne (kruchość, naprężenia własne, twardość),
- chemiczne (skład chemiczny, adsorpcja chemiczna, absorpcja),
- fizyczne (adsorpcja fizyczna, adhezja),
- magnetyczne (przenikalność, koercja),
- elektryczne (rezystancja, konduktywność).

Jako parametry stereometryczno–fizykochemiczne przyjmuje się [Hebda, Wachal 1980]:

- energię powierzchniową,
- napięcie powierzchniowe,
- emisyjność,
- odbijalność.

W każdej z wymienionych grup parametrów są wielkości w większym lub mniejszym stopniu istotne dla procesu eksploatacji, a tym samym dla procesu zużywania. Poza tym, ich znaczenie nie jest takie same w każdych warunkach pracy pary kinematycznej.

Z punktu widzenia własności tribologicznych elementów par ciernych do najistotniejszych wielkości opisujących stan WW należy zaliczyć [Burakowski, Wierzchoń 1995; Górecka, Polański 1983; Peters 2001]:

- wśród stereometrycznych:
  - chropowatość;
  - kierunkowość struktury;
- spośród fizykochemicznych:
  - rodzaj tworzywa konstrukcyjnego,
  - jego budowę,
  - naprężenia własne,
  - twardość.

#### **2.1.1.1. Cechy fizykochemiczne warstwy wierzchniej**

Rodzaj tworzywa konstrukcyjnego elementów pary kinematycznej i ich mikrostruktura (struktura metalograficzna) wpływa na właściwości warstwy wierzchniej tych elementów. Mikrostruktura jest definiowana jako budowa WW obejmująca rozmieszczenie elementów składowych (kryształów, ziaren, uporządkowanie atomów w sieci krystalicznej) oraz zespół relacji między tymi elementami [Burakowski, Wierzchoń 1995; Górecka, Polański 1983].

##### **Mikrostruktura tworzywa konstrukcyjnego**

Metale oraz większość niemetali mają strukturę krystaliczną, czyli budowę wewnętrzną złożoną z kryształów, o ściśle określonym rozmieszczeniu jonów, atomów, czy cząsteczek w komórkach elementarnych kryształu.

Warstwa wierzchnia może mieć następującą mikrostrukturę:

- pierwotną – powstałą przy przejściu metalowej fazy ciekłej w fazę stałą,
- wtórną – powstałą z mikrostruktury pierwotnej po przekształceniu w stanie stałym na skutek różnych przemian fazowych lub też obróbki plastycznej.

Mikrostruktura pierwotna w warstwie wierzchniej występuje raczej rzadko, np. przy przetopieniach (elektronowym, laserowym, plazmowym), natomiast mikrostruktura wtórna występuje prawie zawsze, przy czym przemiany mikrostruktury mogą zachodzić wielokrotnie bądź w trakcie procesu wytwarzania, bądź w trakcie eksploatacji.

##### **Naprężenia własne**

Naprężenia własne odzwierciedlają stan sił wewnętrznych, który wynika z wzajemnego oddziaływania w rozpatrywanym miejscu dwóch części materiału, położonych po obu stronach umownego przekroju materiału, odniesionych do danej jednostki przekroju.

Wynikiem działania obciążeń zewnętrznych jest zmiana położenia atomów sieci krystalicznej materiału. Zakłócana jest w ten sposób budowa sieci. Zakłócenia te pociągają za sobą powstawanie naprężeń własnych materiału. Po zaprzestaniu oddziaływań zewnętrznych zanika pierwsza część zmian, w formie odkształceń sprężystych (zmiany odwracalne) i wywołanych nimi naprężeń, natomiast pozostaje w materiale druga część w postaci np. odkształceń plastycznych (zmiany nieodwracalne) i wynikających stąd naprężeń, które od tego momentu stanowią naprężenia własne materiału [Hebda, Wachal 1980; Szumniak 1997].

Naprężenia własne klasyfikować można według następujących kryteriów [Burakowski, Wierzchoń 1995; Górecka, Polański 1983]:

- ze względu na obszar równoważenia się – mikro-, makro- i subnaprężenia własne (równoważące się odpowiednio: w obszarze całego przedmiotu lub warstwy wierzchniej, w obszarze ziarna czy też w obrębie kryształu),
- ze względu na przyczynę powstania – mechaniczne (odkształcenia plastyczne), cieplne (rozszerzalność cieplna) oraz strukturalne (zmiany objętości właściwej składników strukturalnych),

- ze względu na oddziaływanie – ściskające oraz rozciągające,
- ze względu na wywołujące je operacje obróbkowe – odlewnicze, hartownicze, spawalnicze.

Z uwagi na to, że naprężenia własne sumują się z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń zewnętrznych, ze względu na wytrzymałość bardzo korzystne jest, aby w warstwie wierzchniej materiału występowały naprężenia ściskające (ze znakiem ujemnym). Wówczas naprężenia te odejmują się od naprężeń pochodzących od sił zewnętrznych.

### Twardość

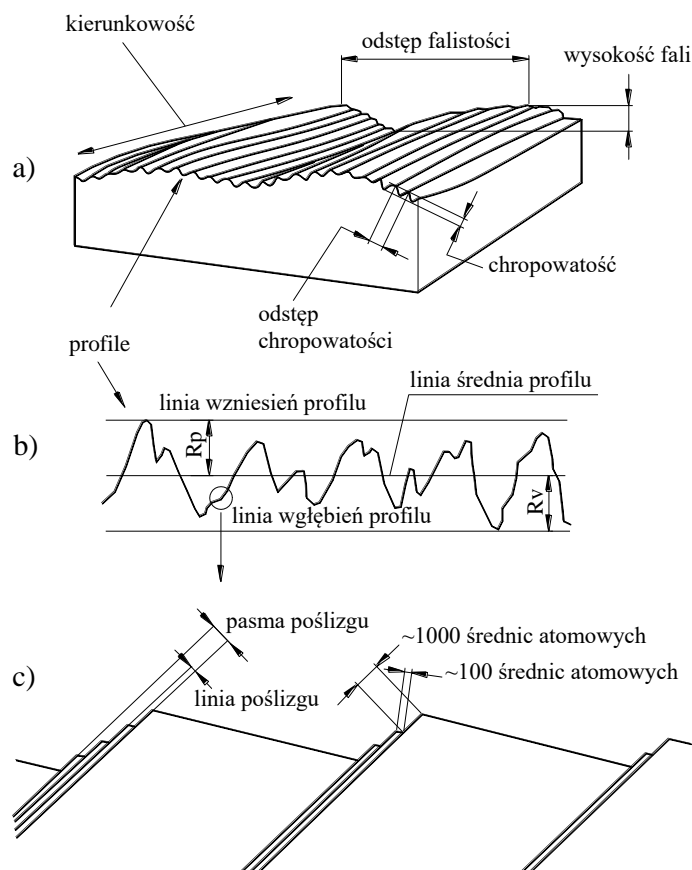
Twardość jest właściwością ciała stałego charakteryzującą się stawianiem oporu odkształceniom plastycznym lub pęknięciom przy lokalnym, silnym oddziaływaniu na jego powierzchnię innego twardszego materiału.

Twardości nie można zdefiniować poprzez inne wielkości fizyczne. Jest to więc cecha umowna, która umożliwia porównywanie odporności różnych materiałów na uszkodzenia powierzchni.

Ogólnie, twardość WW elementów par kinematycznych powinna być tym większa, im większe naciski będzie ona przenosić. Twardości jednak często wiąże się z kruchością – cechą najczęściej ujemną – która jest odwrotnością twardości, dlatego zakładając określoną twardość elementów należy również uwzględnić dopuszczalną kruchość materiału.

#### 2.1.1.2. Cechy struktury geometrycznej powierzchni

Wielkości charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni przedstawione zostały na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Struktura geometryczna powierzchni: a) schemat falistości i ukierunkowania chropowatości, b) profil chropowatości, c) submikrochropowatość [Szumniak 1996]

Ze względu na skalę obserwacji, cechy SGP można przyporządkować jako [Wiśniewski 1995]:

- makroskopowe (falistość),
- mikroskopowe (parametry kierunkowości i chropowatości),
- submikroskopowe (submikrochropowatość – nierówności o wysokości poniżej  $0,01 \mu\text{m}$ ).

Pośród wielkości opisujących strukturę geometryczną powierzchni jako podstawowe przyjmuje się parametry kierunkowości powierzchni oraz jej chropowatości [Burakowski, Wierzchoń 1995; Górecka, Polański 1983; Nowicki 1991; Oczóś, Lubimow 2003; Oczóś, Lubimow 2001; Oczóś i inni 2001; Pawlus 2006; Pawlus, Gałda 2007; Peters 2001; Terry, Broun 1997; Thomas 1999; Tripp, Ioannides 1990].

Potwierdzeniem tego spostrzeżenia może być również klasyfikacja SGP przedstawiona w pracach [Oczóś, Lubimow 1999; Oczóś, Lubimow 2001; Stout i inni 1990]. Jako kryteria jej klasyfikacji przyjęto:

- sposób obróbki wykończeniowej,
- kierunkowości śladów obróbki (kierunkowość SGP),
- wartości parametrów chropowatości.

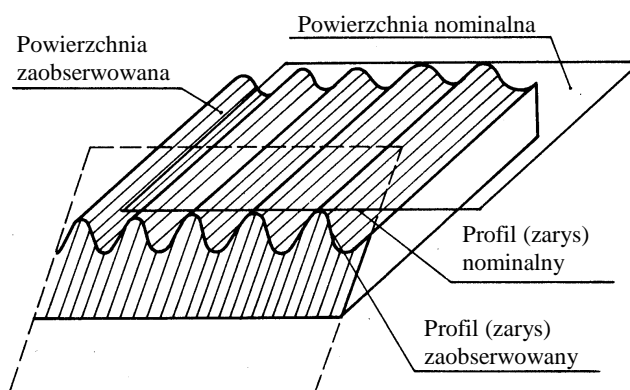
### Chropowatość powierzchni

Zgodnie z definicją chropowatość powierzchni określana jest w Polskiej Normie [PN-EN ISO 4287: 1999], jako zbiór nierówności powierzchni rzeczywistej, umownie określanych jako odchyłki profilu zmierzonego od linii odniesienia w granicach odcinka, na którym nie uwzględnia się odchyłek falistości i kształtu.

Chropowatość wyznaczana jest na podstawie profilu powierzchni. Można zatem powiedzieć, że profil powierzchni (profil chropowatości) jest podstawowym elementem charakterystyki chropowatości powierzchni. Zmierzony profil powierzchni stanowi profil uzyskany przez przecięcie powierzchni przedmiotu płaszczyzną o określonym położeniu względem powierzchni nominalnej (rys. 2.4). Bardzo często przecięcie jest prostopadłe do powierzchni przedmiotu lub do płaszczyzny stycznej do niej, i wykonane w kierunku dającym przypuszczalnie największą odchyłkę profilu (kąt prosty do kierunkowości struktury powierzchni) [Burakowski 1998; Burakowski, Wierzchoń 1995; Górecka, Polański 1983; Wieczorkowski i inni 1996; Wieczorkowski i inni 2003; Williams 2005].

Linie, która opisuje profil chropowatości oznacza się funkcją:

$$z = f(x)$$



Rys. 2.4. Profil powierzchni z elementami chropowatości [Burakowski, Wierzchoń 1995; PN-EN ISO 4287: 1999]

Takie ujęcie zagadnienia sprowadza je do określenia parametrów chropowatości w układzie dwuwymiarowym (2D).

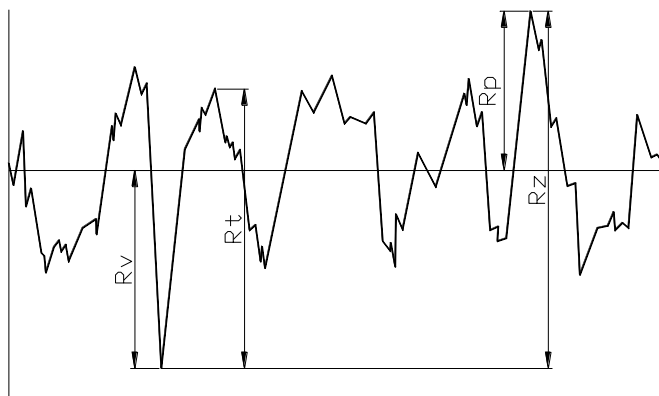
Parametry chropowości, określające SGP w układzie dwuwymiarowym, ujęte zostały w normie [PN-EN ISO 4287: 1999]. Sklasyfikowano je w następujących grupach [Pawlus 2006; PN-EN ISO 4287: 1999; Wieczorkowski i inni 1996; Wieczorkowski i inni 2003]:

- parametry pionowe (amplitudowe),
- parametry poziome (odległościowe),
- parametry hybrydowe (mieszane),
- charakterystyczne krzywe.

Wśród parametrów pionowych, wyróżnia się te, których wartość można odczytać bezpośrednio z profilogramu (z wyjątkiem  $R_c$ ) – rys. 2.5 oraz takie, które się oblicza na podstawie wyników pomiarów.

Do pierwszej grupy zalicza się parametry:

- $R_c$  – średnia wysokość elementów profilu,
- $R_v$  – głębokość najniższego wgłębienia profilu,
- $R_z$  – największa wysokość profilu,
- $R_p$  – wysokość najwyższego wzniesienia profilu,
- $R_t$  – całkowita wysokość profilu.



Rys. 2.5. Parametry chropowości amplitudowe (pionowe)

Natomiast parametry pionowe, obliczane na podstawie profilogramu (wartości średnie rzędnych) to:

- $Rku$  – współczynnik nachylenia profilu,

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right],$$

- $Ra$  – średnia arytmetyczna rzędnych profilu,

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx,$$

- $Rq$  – średnia kwadratowa rzędnych profilu,

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx},$$

- $Rsk$  – współczynnik asymetrii profilu,

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right],$$

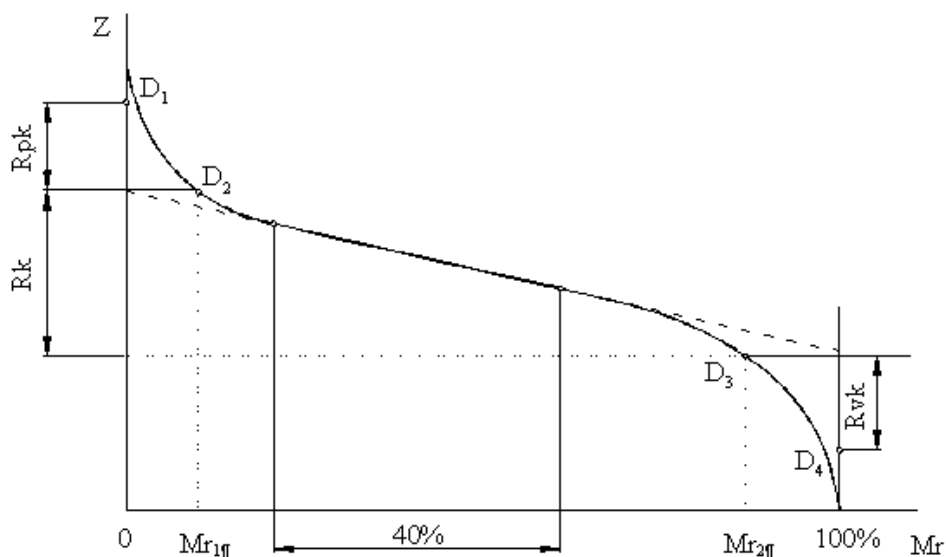
Do pozostałych parametrów chropowatości wg normy [PN-EN ISO 4287:1999] zaliczono m.in.:

- parametr odległościowy (poziomy) to:
  - $RSm$  – średnia szerokość rowków elementów danego profilu,
- parametr hybrydowy (mieszany) to:
  - $R\Delta q$  – średni kwadratowy wznios profilu,
- charakterystyczne krzywe to:
  - $Rmr$  – udział materiałowy profilu,
  - krzywa udziału materiału profilu – krzywa nośności (Abbotta–Firestone’a),
  - $R\delta c$  – różnice między dwoma poziomami cięcia,
  - krzywa gęstości amplitudowej.

Charakterystyki nierówności powierzchni w postaci krzywych wprowadza się w celu pełniejszej oceny właściwości powierzchni. Największe zastosowanie ma krzywa udziału materiału – krzywa nośności (rozkład względnej długości nośnej). Krzywa ta jest nazywana również wykresem Abbotta–Firestone’a i opisuje ona rozkład materiału w profilu [Pawlus 2006; Abbott, Firestone 1993]. Ponieważ krzywa ta informuje o przebiegu profilu można z niej odczytać właściwości danego profilu w aspekcie funkcji powierzchni [Abbott, Firestone 1993; Lubimow i inni 2000; Nyc 2001]. Parametry, które otrzymujemy z krzywej nośności profilu, jednocześnie charakteryzujące tę krzywą to [Abbott, Firestone 1993; Pawlus 2006; Panicz 2000; DIN 4776]:

- $Rk$  – zredukowana wysokość chropowatości,  $\mu\text{m}$ ,
- $Rpk$  – zredukowana wysokość wzniesienia profilu chropowatości,  $\mu\text{m}$ ,
- $Rvk$  – zredukowana wysokość wgłębienia profilu chropowatości,  $\mu\text{m}$ ,
- $Mr_1$  – udział nośny wierzchołków, %,
- $Mr_2$  – udział nośny wgłębień, %.

Interpretację graficzną wyżej wymienionych parametrów przedstawiono na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Typowy wykres krzywej nośności [Piekoszowski i inni 2000; PN-EN ISO 4287: 1999]

Strukturę częstotliwościową profilu opisuje funkcja autokorelacji oraz związana z nią przekształceniem Fouriera funkcja gęstości widmowej mocy. W badaniach, w zależności od ich celu, przyjmują się jedną z powyższych funkcji. Częściej jednak wykorzystuje się funkcję gęstości widmowej mocy, na podstawie której ocenić można wpływ składowych siły skrawania [Boryczko 1987] oraz stanu ostrza skrawającego [Konczakowska, Konczakowski 1978; Leppert 2008;

Leppert 2009; Lubimow, Oczoś 1997; Mori, Kumehara 1976] na SGP bądź zachodzące w niej zmiany podczas eksploatacji.

W literaturze przedmiotu proponowane są także inne klasyfikacje parametrów i ich zbiorów, np. w pracach [Nowicki 1980; Nowicki 1985; Nowicki 1991], wprowadzono następujący podział grup parametrów:

- wysokościowe:  $R_a, R_q, R_p, R_v, R_t$ ,
- wzdłużne:  $S_m, S, S_{wm}, \lambda_q$ ,
- pochylenia:  $\Delta\alpha, \Delta q, \theta, \gamma$ ,
- określające promienie zaokrąglenia wierzchołków chropowatości,
- stanowiące funkcje autokorelacji i gęstości widmowej mocy,
- rozkłady nośności i wierzchołków.

Współczesne maszyny pomiarowe (profilografometry) umożliwiają pomiar i rejestrację bardzo wielu parametrów chropowatości. Część z nich jest powiązana ze sobą i zależna od siebie. Prowadzi to często do sytuacji, w której użytkownik sam musi decydować, które parametry wybrać do oceny powierzchni.

W pracy [Nowicki 1985] autor przedstawił 39 parametrów, natomiast normy ISO zawierają 57 parametrów [De Chiffre 1999]. Różne wskaźniki chropowatości przedstawione są także w pracach [Dong i inni 1994; Kaczmarek, Klimczak 1986; Panicz 2000; Willis 2005; Wiśniewski 1995; Wolf 1969].

Obecnie na świecie istnieje tendencja do ujednocniania i zmniejszania liczby uprzywilejowanych parametrów w normach krajowych.

Autorzy pracy [Kędziora i inni 2004] ostrzegają przed używaniem nadmiernej liczby parametrów. Wprowadzanie nowych parametrów powinno być bardzo przemyślane i poprzedzone dokładnymi badaniami. Autorzy proponują też podział parametrów na dwie grupy parametrów: naukowe i przemysłowe. Podział taki może być jednak trudny do zrealizowania i budzi pewne wątpliwości.

W praktyce przemysłowej najczęściej stosowanym w pomiarach parametrem chropowatości jest  $R_a$ . Pozostałe, niezbędne do oceny chropowatości wybiera się na podstawie analizy zadań jakie ma dana powierzchnia spełniać.

Wszystkie przedstawione wyżej parametry chropowatości są w układzie dwuwymiarowym (2D). Ze względu na ograniczony obszar profilografowania, losowość wyboru miejsca pomiaru, trudności dokładnego odczytu wartości oraz trudność profilografowania powierzchni o złożonych kształtach metoda 2D charakteryzuje się ograniczoną dokładnością oceny powierzchni. Z tego też powodu coraz szersze zastosowanie ma pomiar chropowatości w układzie trójwymiarowym (3D) [Kaczmarek, Klimczak 1986; Nyc 2000; Oczoś, Lubimow 1998; Oczoś, Lubimow 2002; Oczoś, Lubimow 1999; Oczoś, Lubimow 2003; Stout i inni 1993; Tsukada, Kanad 1986], mimo że nie ma jeszcze normy dotyczącej pomiarów w tym układzie. Według projektu takiej normy [Stout i inni 1993] SGP można scharakteryzować parametrami sklasyfikowanymi w następujących grupach:

- I grupa – parametry amplitudowe – korelujące z parametrami pionowymi 2D zawartymi w normie [PN-EN ISO 4287: 1999]:

- $S_a$  – średnie arytmetyczne odchylenie od płaszczyzny średniej,

$$S_a = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |Z_{x,y}|,$$

- $S_q$  – średnie kwadratowe odchylenie od płaszczyzny średniej,

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} Z_{x,y}^2},$$

- $S_t$  – całkowita wysokość powierzchni,
- $S_p$  – wysokość najwyższego wzniesienia,
- $S_v$  – głębokość najniższego wgłębienia,

- $Sz$  – wysokość według 10 punktów,
- $Ssk$  – symetria krzywej rozkładu głębokości,

$$Ssk = \frac{1}{NMSq^3} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} Z_{x,y}^3,$$

- $Sku$  – płaskość krzywej rozkładu głębokości,

$$Sku = \frac{1}{NMSq^4} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} Z_{x,y}^4,$$

- II grupa – parametry objętościowe:
  - $STp$  – nośność względna,
  - $SHTp$  – wysokość nośności względnej,
  - $Smvr$  – średnia objętość przestrzeni pustej,
  - $Smmr$  – średnia objętość przestrzeni wypełnionej (materiału),
- III grupa – parametry przestrzenne:
  - $SPc$  – gęstość pików między dwoma poziomami,
  - $Sds$  – gęstość wierzchołków,
  - $Sal$  – długość najszybszego spadku,
  - $Str$  – stosunek względny struktury,
  - $Std$  – kierunkowość struktury,

parametry hybrydowe:

- $Sdq$  – średnie kwadratowe pochylenie,
- $Ssc$  – średnia arytmetyczna krzywej wierzchołków,
- $Sdr$  – rozwinięcie powierzchni,
- $Sfd$  – wymiar fraktalny,

– parametry charakteryzujące krzywą nośności (podobnie jak dla 2D):

- $Sk$  – zredukowana wysokość chropowatości,
- $Spk$  – zredukowana wysokość wzniesień powierzchni chropowatości,
- $Svk$  – zredukowana wysokość wgłębień powierzchni chropowatości,
- $Sr1$  – udział nośny wierzchołków,
- $Sr2$  – udział nośny wgłębień,
- $Sbi$  – wskaźnik nośności,
- $Sci$  – wskaźnik zatrzymania płynów (rdzeń),
- $Svi$  – wskaźnik zatrzymania płynów (dolina).

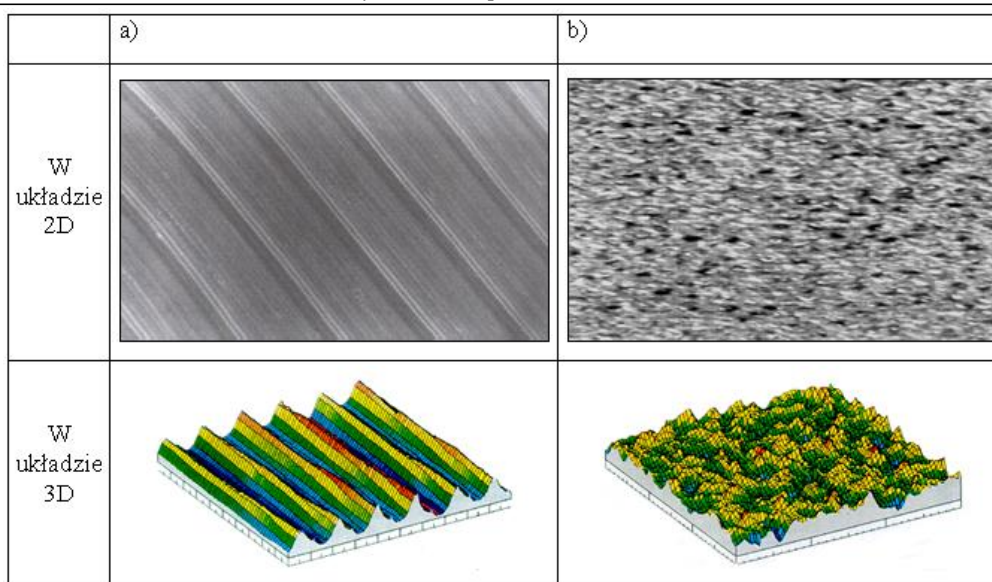
Charakterystyka trójwymiarowa chropowatości powierzchni nie może być pełna bez funkcji autokorelacji i gęstości widmowej mocy. Na podstawie wykresów tych funkcji – częściowej autokorelacji – można określić czy powierzchnia ma charakter anizotropowy czy izotropowy.

Funkcja autokorelacji jest bardziej przydatna do oceny struktury o charakterze losowym, zaś funkcja widmowej gęstości mocy – zdeterminowanym [Feld, Konczakowski 1988; Whitehouse 1978; Whitehouse 1982; Whitehouse 2001].

### Kierunkowość struktury

Kierunkowość SGP charakteryzuje wzajemne usytuowanie śladów powstających na powierzchni w procesach: obróbkowym lub zużywania. Z tego powodu wszystkie powierzchnie można ogólnie podzielić na ukierunkowane, mieszane oraz nieukierunkowane (rys. 2.7).





Rys. 2.7. Struktura geometryczna powierzchni: a) ukierunkowanej, b) nieukierunkowanej [Oczoś, Lubimow 2003]

Charakter kierunkowości SGP regulują normy krajowe i międzynarodowe [DIN 4761; PN-EN ISO 1302: 2004]. W tabeli 2.1. przedstawiono klasyfikację kierunkowości SGP według w/w norm.

Struktury posiadające uprzywilejowane kierunki nazywamy strukturami anizotropowymi, natomiast struktury, które nie posiadają uprzywilejowanych śladów – strukturami izotropowymi. Jeżeli struktura ma prostoliniowe, równoległe ślady obróbki to nosi nazwę struktury ortotropowej.

Ogólnie, izotropia cech danego ośrodka znamieną jest tym, że w każdym kierunku wykazuje on te same właściwości geometryczne czy fizyczne. Izotropowość SGP oznacza więc strukturę jednakową we wszystkich kierunkach. Można powiedzieć, że jest to idealnie symetryczna struktura względem wszystkich możliwych osi symetrii [Oczoś, Lubimow 2003; Oczoś i inni 2001].

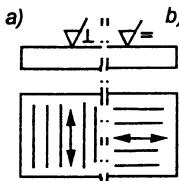

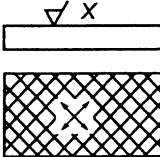
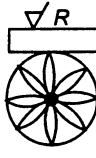
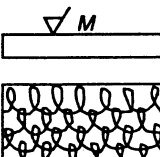
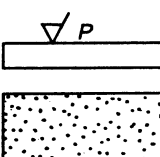
Za miarę izotropowości (lub anizotropowości) w układzie 2D przyjmuje się zwykle stosunek wartości wybranych parametrów chropowatości, zmierzonych dla dwu typowych wzajemnie uzupełniających się kierunków. Podstawą oceny są parametry wzdłużne lub pionowe [Cichosz, Kowalski 2004; Czarniecki 2005; Oczoś, Lubimow 1999; Oczoś, Lubimow 2002; Oczoś i inni 2003; Pawlus 2006; Pawlus, Gałda 2007].

Wskaźnik izotropowości ( $I_z$ ) wyrażać można bądź to w procentach od 0% do 100%, bądź w zakresie wartości od 0 do 1. Zdarza się, że zamiast wskaźnika izotropowości przyjmuje się jego odwrotność czyli wskaźnik anizotropowości. W pracy [Oczoś, Lubimow 2003] autorzy określają wskaźnik izotropowości wyrażony w %, natomiast autorzy prac [Dong i inni 1994; Li i inni 2000] wyznaczają wskaźnik anizotropowości zawierający się w granicach od 0 do 1.

Wartości wskaźnika izotropowości bliskie zeru oznaczają strukturę całkowicie anizotropową, a bliskie jedności czy też 100% oznaczają strukturę całkowicie izotropową. Analogicznie określa się charakter struktury opisany wskaźnikiem anizotropowości. Przyjmuje się umownie podział poziomu izotropowości następująco [Oczoś, Lubimow 2003]:

- $I_z < 20\%$  (0,2) – struktura anizotropowa,
- $20\% \leq I_z \leq 80\%$  - struktura mieszana,
- $I_z > 80\%$  (0,8) – struktura izotropowa.

**Tabela 2.1. Kierunkowość SGP uzyskiwana różnymi sposobami obróbki wg [DIN 4761; PN-EN ISO 1302: 2004]**

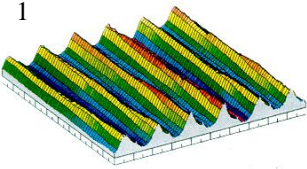
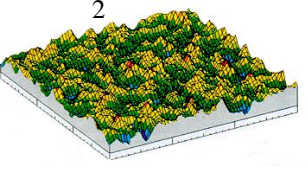
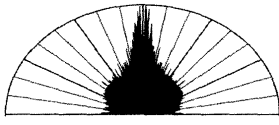
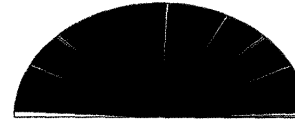
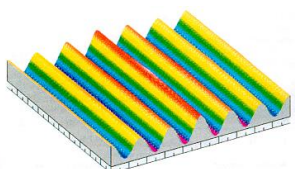
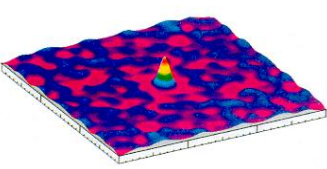
Rodzaj kierunkowości	Odmiana kierunkowości	Symbol	Ślady obróbki i sposób oznaczania	Przykładowe obróbki dające daną strukturę
jednokierunkowa	prostokąta (a), równoległa (b) – do krawędzi, na której podano znak	$\perp$ =		toczenie wzdłużne, struganie, dłutowanie, frezowanie walcowe, przeciąganie, szlifowanie
	współśrodkowa	<b>C</b>		toczenie czołowe, frezowanie czołowe
wielokierunkowa	krzyżowa	<b>X</b>		frezowanie czołowe, honowanie (gładzenie)
	promieniowa	<b>R</b>		szlifowanie czołowe
	nieuporządkowana	<b>M</b>		skrobanie, docieranie, dogładzanie
bezkierunkowa	punktowa	<b>P</b>		obróbka elektroiskrowa, strumieniowo-ścierna, ultradźwiękowa

W tabeli 2.2. przedstawiono przykładowe struktury po różnych obróbkach, ich wykresy izotropowości oraz postaci funkcji autokorelacji w układzie 3D. Analiza topografii powierzchni w układzie 3D wykazuje tę pozytywną cechę w stosunku do możliwości analizy profili nierówności (2D), że istnieje możliwość obliczenia parametrów charakteryzujących izotropię. Istnieje bardzo wiele sposobów określenia poziomu izotropowości SGP [Barre i inni 1997; Bartoszewicz i inni 2002; Dong i inni 1994; Górecka, Polański 1983; Greń 1982; Lubimow 1992; Oczóś, Lubimow 1999; Sato, O-hori 1981; Thomas 1999; Wiczorkowski i inni 1995]. Najbardziej uzasadniony

wydaje się być sposób polegający na analizie funkcji autokorelacji (względnie widmowej gęstości mocy), której kształt jest smukły, wydłużony i asymetryczny w jednym kierunku w przypadku powierzchni anizotropowych, natomiast symetryczny i okrągły dla powierzchni izotropowych [Dong i inni 1994; Oczos, Lubimow 2002; Oczos, Lubimow 2003; Thomas 1999].

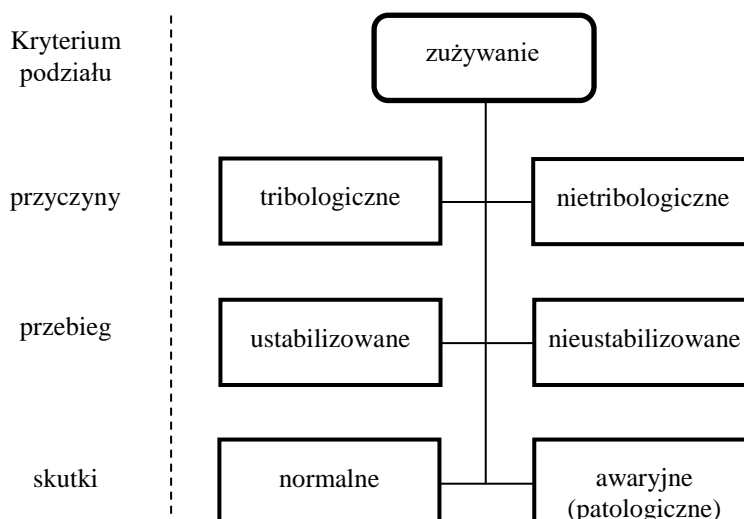
**Tabela 2.2. Izotropowość przykładowych SGP: 1 – toczenie wykończeniowe,**

2 – kulkowanie [Oczos, Lubimow 2003]

Obraz powierzchni		
Wykres izotropowości	 <p>180° Izotropowość – 3,02 %° 0°</p>	 <p>180° Izotropowość – 90,1 %° 0°</p>
Funkcja autokorelacji w układzie 3D		

## 2.2. Rodzaje procesów zużywania tribologicznego

W rezultacie oddziaływania na elementy pary kinematycznej wymuszeń eksploatacyjnych zachodzi proces zużywania. Gdy procesowi temu towarzyszy tarcie: ślizgowe bądź toczne to zużywanie takie nazywamy tribologicznym – rys. 2.8.



Rys. 2.8. Klasyfikacja procesów zużywania elementów maszyn dla różnych kryteriów [Lawrowski 2009]

Jako zużywanie tribologiczne przyjmuje się zużywanie ścierne, zmęczeniowe, adhezyjne oraz przez utlenianie, natomiast do nietribologicznego zalicza się skutki procesów korozyjnych

i erozyjnych. Ze względu na zakres pracy w dalszej części pracy zostanie uwzględnione tylko zużywanie tribologiczne. Zużywaniem elementów par kinematycznych nazywa się ciągle proces zmian zachodzących w ich warstwie wierzchniej, prowadzący do niekorzystnych zmian cech WW. Zmiany te spowodowane są wzajemnym oddziaływaniem współpracujących powierzchni elementów tworzących pary i może być intensyfikowany otoczeniem środowiska pracy [Hebda, Wachal 1980; Janecki, Hebda 1969; Lawrowski 2009; Stachowiak, Batchelor 2001; Szczerek, Wiśniewski 2001; Williams 2005; Woropay 1996]. Proces zużywania jest wynikiem destrukcyjnych zmian zachodzących w eksploatacyjnej warstwie wierzchniej. Za pomocą parametrów opisujących zużywanie, można wyznaczyć ilościowo zmiany w EWW. Skutkiem procesu zużywania jest zużycie. Do oceny intensywności procesów zużywania, a tym samym wartości zużycia, wykorzystuje się różne bezwzględne albo względne miary [Lawrowski 2009; Sadowski 2005; Sadowski 2006; Woropay 1996]. Bezwzględną miarę zużywania ( $Z$ ) stanowi objętość  $V_z$  albo masa  $m_z$  oddzielonego materiału od warstwy wierzchniej elementu lub też grubość  $h_z$  oddzielonej lub odkształconej części WW. Miary te można opisać następującymi zależnościami:

$$V_z = L_t \cdot b_t \cdot h_z$$

gdzie:  $L_t$  – długość drogi tarcia,

$b_t$  – szerokość drogi tarcia,  $h_z$  – grubość oddzielonej lub odkształconej strefy WW; oraz:

$$m_z = V_z \cdot \rho$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość materiału.

Względną miarą zużywania jest natomiast intensywność zużywania  $I$ , będąca odniesieniem ubytku objętościowego ( $\Delta V_z$ ), masowego ( $\Delta m_z$ ) lub liniowego ( $\Delta l_z$ ) do czasu ( $\tau$ ), pracy tarcia ( $P_t$ ) lub drogi tarcia ( $L_t$ ). Intensywność zużywania można więc zapisać odpowiednio:

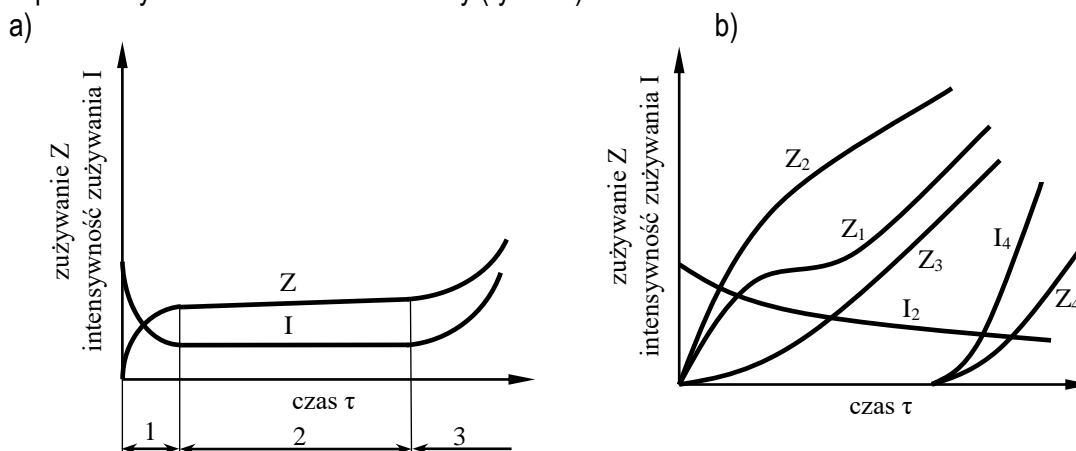
$$I_\tau = \frac{Z}{\tau};$$

$$I_L = \frac{Z}{L_t};$$

$$I_P = \frac{Z}{P_t};$$

gdzie:  $Z$  może przyjmować postaci:  $\Delta V_z$ ,  $\Delta m_z$ ,  $\Delta l_z$ .

Gdy intensywność zużywania jest stała w czasie, proces przyjmuje się jako ustabilizowany, w przeciwnym razie – nieustabilizowany (rys. 2.9).



Rys. 2.9. Charakterystyki procesów zużywania [Lawrowski 2009]: a) ustabilizowany, b) nieustabilizowany

Odwrotność intensywności zużywania nazywa się odpornością na zużywanie [Lawrowski 2009; Sadowski 2005; Sadowski 2006]. Wielkość tę można również interpretować w sposób energetyczny jako pracę właściwą zużywania, czyli stosunek pracy tarcia do masy produktów zużywania [Sadowski 1997; Sadowski 2003] lub gęstość energii tarcia, czyli stosunek pracy tarcia do objętości usuniętego materiału [Fleischer 1999].

Na rysunku 2.9a widać, że przy zużywaniu ustabilizowanym można wyróżnić trzy okresy. Okres pierwszy (1) o zmiennej, ale malejącej intensywności zużywania – jest to okres docierania (dopasowywania) elementów, co odbywa się przy zwiększonej intensywności zużywania. Po dotarciu następuje okres drugi (2) – ustabilizowanej eksploatacji, w którym intensywność zużywania jest niemal stała. Zakończenie tego etapu i rozpoczęcie trzeciego (3) ujawnia się znacznym zwiększeniem intensywności zużywania, np. pod wpływem zwiększenia luzów w węzłach tribologicznych, czy też w wyniku zużycia utwardzonej strefy warstwy wierzchniej. Do pracy w tym okresie nie należy dopuszczać, ponieważ intensywność uszkodzeń elementów maszyn wzrasta bardzo gwałtownie, powodując tym samym znaczne zwiększanie kosztów usuwania skutków tych uszkodzeń.

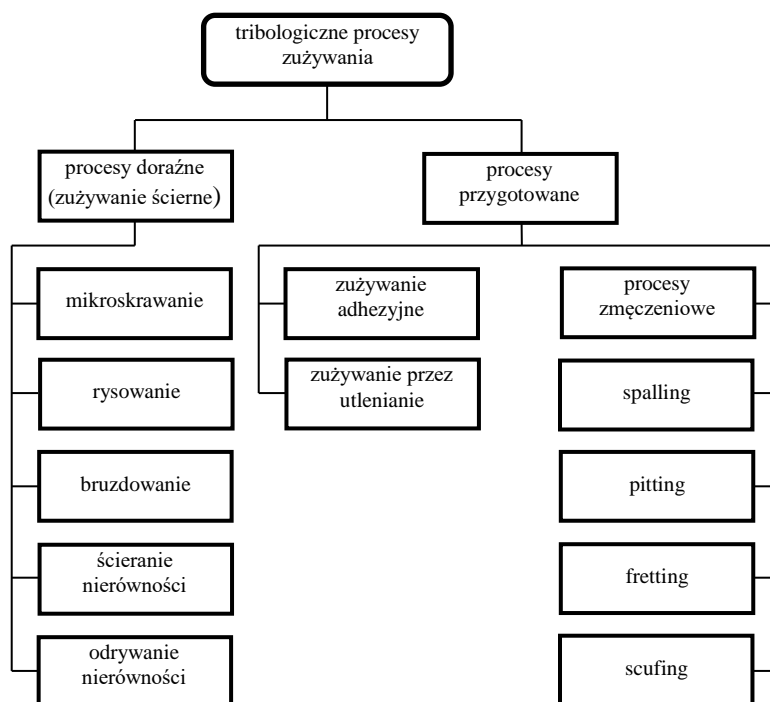
W niektórych układach tribomechanicznych po okresie docierania nie występuje zużywanie ustabilizowane (rys. 2.9.b). Przyczyną takiego przebiegu mogą być np.: produkty zużywania znajdujące się w nie wymienionym i nie filtrowanym oleju – krzywa z indeksem 1, utwardzanie się metali pod wpływem obciążeń normalnych – krzywa z indeksem 2 (zmniejszanie się intensywności zużywania), zużywanie się przeciwzużyciowej warstewki powierzchniowej – krzywa z indeksem 3 (zwiększanie się intensywności zużywania), cykliczne naprężenia stykowe – krzywe z indeksami 4 (pewien czas pracy prawie bez zużycia).

Widoczne skutki zużywania w drugim okresie występują wówczas jeśli nie zachodzi dekohezja (utrata spójności) w obszarze rdzenia materiału rodzimego, a odkształcenia plastyczne i dekohezja przebiegają tylko w cienkich warstewkach struktur wtórnych oraz gdy istnieje równowaga dynamiczna między tworzeniem się tych struktur i ich zużywaniem. O skutkach awaryjnych – trzeci okres, mówimy wtedy, gdy zachodzi kohezja i węzeł cierny nie nadaje się już do dalszej pracy. Kontynuowanie procesu użytkowania w takich warunkach może spowodować rozległe uszkodzenie całej maszyny.

Przyczyny zużywania mają charakter czysto mechaniczny bądź mechaniczny połączony z chemicznym oddziaływaniem otaczającego ośrodka i jako podstawowe przyjmuje się [Burakowski, Wierzchoń 1995; Hebda, Wachal 1980; Janecki, Hebda 1969]:

- odkształcenia sprężyste i plastyczne wierzchołków nierówności i ich zgniot,
- powstawanie na powierzchni tarcia warstewek tlenków, zapobiegających wprawdzie zacieraniu i głębokiemu wrywaniu cząsteczek materiału, ale ponieważ tlenki są kruche, łuszczące się i odpadające, to miejsca odsłonięte ulegają powtórnemu utlenianiu itd.,
- wbudowywanie się cząstek WW jednego materiału trącego w powierzchnię materiału drugiego, co podczas ślizgania powoduje rysy i zadrapania powierzchni, a w rezultacie niszczenie powierzchni o mniejszej twardości,
- adhezję połączeń stykających się powierzchni, która prowadzi do przyspieszonego zużywania, przenoszenia materiału z jednej WW na drugą,
- gromadzenie wodoru w warstwach wierzchnich części stalowych i żeliwnych powodujące zużywanie wodorowe [Starczewski 2002].

Klasyfikacja zużywania tribologicznego uwzględniającą mechanizm procesu niszczenia warstwy wierzchniej przedstawiona została na rysunku 2.10.



Rys. 2.10. Klasyfikacja zużywania tribologicznego [Hebda, Wachal 1980; Lawrowski 2009]

Największy wpływ na zużywanie tribologiczne wykazuje stan SGP elementów trących i to zarówno w warunkach tarcia suchego, jak i z substancją smarującą. Spośród parametrów opisujących stan SGP na przebieg zużywania najbardziej wpływa chropowatość powierzchni oraz wzajemne ukierunkowanie nierówności powierzchni trących – kąt współpracy (przecięcia) pomiędzy charakterystyczną kierunkowością danej powierzchni [Budinski 1988; Burakowski, Wierzchoń 1995; Łunarski 1989; Marczak 2002; Stanley, Body 1993; Stachowiak, Batchelor 2001; Zakościelny 1981; Zielecki 1993].

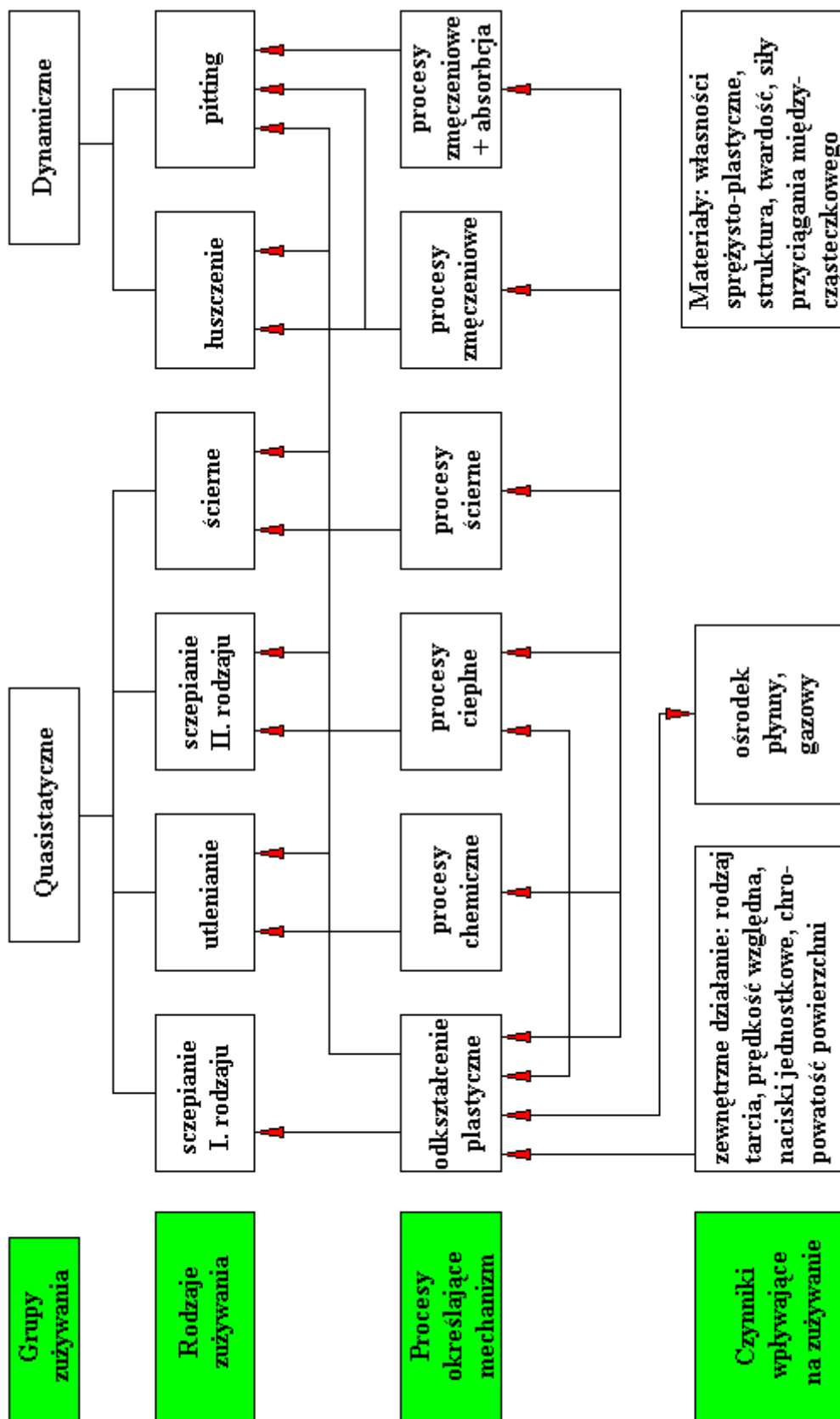
Zużywanie tribologiczne następuje w wyniku współpracy trących o siebie elementów pary kinematycznej, i jest rozumiane jako proces niszczenia i usuwania materiału z powierzchni ciał stałych w wyniku tarcia, przejawiający się ciągłą zmianą wymiarów i kształtów trących elementów.

Oddzielenie materiału w procesie zużywania jest wynikiem doraźnego, mechanicznego oddziaływania stykających się elementów, albo jest poprzedzone innymi zjawiskami, które powodują mechaniczne oddzielenie materiału elementu lub je ułatwiają. Mając te mechanizmy na uwadze procesy niszczenia materiału można podzielić na [Lawrowski 2009]:

- przygotowane,
- doraźne.

**Zużywanie ściernie** powstaje wówczas, gdy proces niszczenia warstwy wierzchniej przyjmuje formę: rysowania, mikroskrawania, bruzdowania, ścinania nierówności, odrywania nierówności powierzchni lub obtaczania ziaren ściernych. Ubytek materiału WW w procesie zużywania ściernego jest wynikiem głównie oddziaływania mechanicznego. W obszar lub obszary tarcia współpracujących elementów dostają się twarde cząstki ciał obcych i zachowują się jak mikroostrza skrawające. Taką samą rolę mogą spełniać wystające nierówności twardszego materiału współpracujących powierzchni [Hebda, Wachal 1980].

Tab. 2.1. Rodzaje zużycia przedstawione w pracy [Janecki, Gołąbek 1971]



Podobne określenie zużycia ściernego podano w pracy [Janecki, Gołąbek 1971], które zdefiniowano jako zachodzące w wyniku procesu/procesów m.in. rysowania, bruzdowania nierówności współpracujących powierzchni warstwy wierzchniej (niekoniecznie powierzchni metalu) z cząstkami ścierniwa (np. piasku, pyłu itp.) lub też z wyraźnie twardszymi nierównościami jednego z trących ciał oraz procesu ścinania. Zużycie ściernie jest najbardziej intensywnym rodzajem zużycia, którego stopień zależy od m.in. różnicy twardości współpracujących powierzchni ciernych, wielkości i ilości ziaren ścierniwa, prędkości tarcia, nacisku jednostkowego, rzeczywistej powierzchni styku. W zależności od intensywności tego rodzaju zużycia ubytek materiału współpracujących par ciernych może być znaczny. Najczęściej zużycie ściernie jest charakterystyczne dla tarcia suchego. Nawet w przypadku wymieszania ścierniwa ze środkiem smarowym, mimo zachodzenia smarowania, dominuje w takiej parze cierniej również zużycie ściernie. Aczkolwiek w takim przypadku jest ono mniej intensywne niż przy tarcu suchym. Powierzchnia tarcia, na której występuje zużycie ściernie ma strukturę oraz wygląd podobny do powierzchni po obróbce szlifowaniem. Natomiast odkształcenia materiału warstwy wierzchniej współpracujących par ciernych najczęściej zalegają dość płytko. Zlikwidowanie tego rodzaju zużycia lub jego znacznym ograniczeniem może być nie tyle dodanie środka smarnego do obszaru tarcia, ile uszczelnienie, jeżeli to jest możliwe, powierzchni trących w ten sposób, aby wnikanie cząstek ścierniwa nie miało miejsca. Autorzy pracy [Janecki, Gołąbek 1971] podają, że jeżeli jest niemożliwe z pewnych przyczyn, np. z warunków pracy, ograniczenie wnikania ścierniwa do obszaru tarcia, to korzystnym jest zwiększenie twardości trących metali do wartości rzędu ok. 55 ÷ 65 HRC.

*Mikroskrawanie* polega na wykrawaniu w materiale określonej mikroobjętości wskutek skrawającego działania elementu ściernego. Oddzielony materiał ma postać wiórków.

*Rysowanie* polega na tworzeniu rysy w materiale elementu przez przemieszczający się występ elementu współpracującego lub ziarno ściernie, częściowo wskutek wykrawania, a częściowo przez odsuwanie materiału na boki. Jest to zjawisko pośrednie między mikroskrawaniem a mikrobruzdowaniem.

*Mikrobruzdowanie* polega na wgłębianiu się występu elementu w materiał elementu współpracującego i plastycznym wyciskaniu w nim mikrobruzd pod wpływem ruchu względnego.

*Ścinanie nierówności* występuje wówczas, gdy wartość siły niezbędnej do ścięcia występu jest mniejsza od wartości oporu odkształcenia współdziałającego występu lub mniejsza od wartości oporu jego przemieszczania w elemencie współpracującym. Spełnienie tych warunków zależy od kształtu nierówności powierzchni, wysokości zahaczeń i mechanicznych właściwości materiałów.

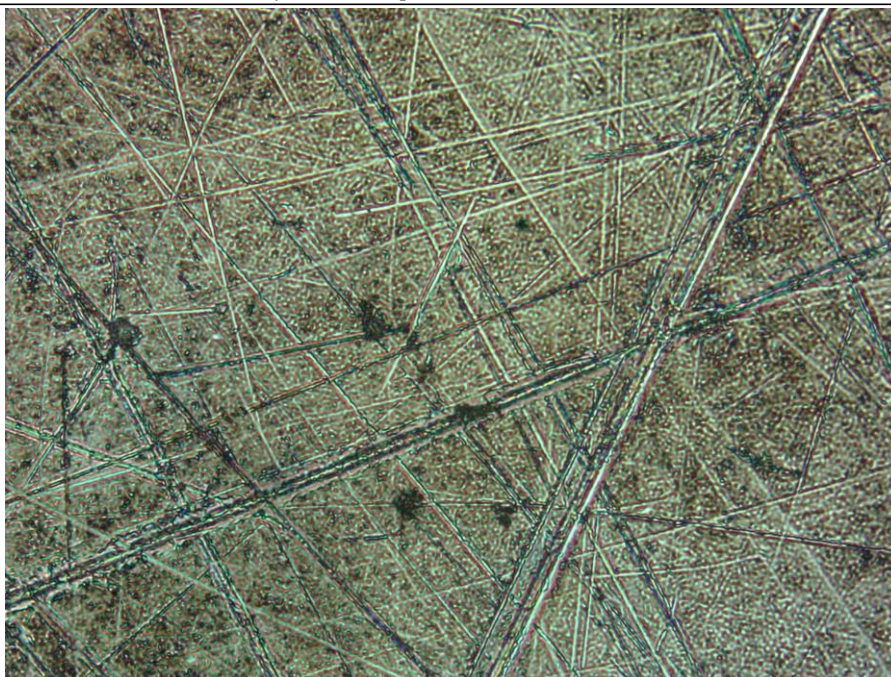
*Odrywanie nierówności* występuje przy zahaczaniu się występow elementów pary cierniej, gdy materiał występow (jednego lub obu) ma budowę niejednorodną.

*Obtaczanie ziaren ściernych* występuje wówczas, gdy w przestrzeń (luz) między współpracującymi elementami przedostaną się cząstki ściernie, które mają odpowiedni kształt i dużą wytrzymałość na ściskanie, wówczas może wystąpić ich obtaczanie. Spowoduje ono powstawanie, wskutek odkształcenia plastycznego, mikrowgłębień z wypływkami materiału na brzegach. W wyniku wielokrotnego odkształcenia powodującego zmęczenie wypływki te zostają oddzielone w postaci cząstek zużycia.

Ścieranie jest najbardziej powszechnym rodzajem zużywania, obejmuje około 80÷90% wszystkich przypadków zużywania tribologicznego [Burakowski, Wierzchoń 1995; Lawrowski 2009]. Dominuje ono przy braku smarowania wężła ciernego – tarcie suche, lub gdy smarowanie jest niedostateczne – tarcie mieszane. W warunkach tarcia płynnego może wystąpić, gdy środek smarny zawiera cząstki ściernie (np. zanieczyszczenia lub produkty zużywania).

Zużywanie ściernie zależy od rodzaju, struktury oraz właściwości materiałów elementów współpracujących, np. przyjmuje się, że ze wzrostem twardości zwiększa się odporność na zużywanie [Burakowski, Wierzchoń 1995; Burakowski i inni 1992].





Rys. Powierzchnia warstwy wierzchniej po zużyciu ściernym, pow. 50x. Fot. J. Mikołajczyk

**Zużywanie adhezyjne** jest rezultatem rozrywania połączeń adhezyjnych powstałych w punktach rzeczywistego styku powierzchni, przy ich ruchu względnym. Warunkiem wystąpienia sczepiania jest zbliżenie współpracujących powierzchni na odległość mniejszą od zasięgu działania sił wiązań między atomami oraz brak warstw adsorbowanych lub tlenkowych, mających wiązania o charakterze niemetalicznym [Burakowski, Wierzchoń 1995; Hebda, Wachal 1980; Harasymowicz i inni 1991; Lawrowski 2009].

Proces ten występuje przy małych prędkościach względnych i dużych naciskach jednostkowych, przy niedostatecznym smarowaniu – tarcie mieszane, lub jego braku – tarcie suche.

**Zasada działania zużywania przez utlenianie** polega na adsorpcji tlenu w obszar tarcia i jego dyfuzji w odkształcone plastycznie i sprężyste mikroobjętości metalu, a następnie na usuwaniu powstałych w ten sposób warstewek tlenków na skutek tarcia. Jest to więc chemiczno–mechaniczna postać zużywania.

Zużywanie przez utlenianie jest dominującym procesem jeśli szybkość ciągłego procesu tworzenia się warstw tlenków, a następnie ich usuwania jest większa od innych procesów zużywania (np. ścierania).

**Zużywanie zmęczeniowe** polega na niszczeniu warstwy wierzchniej elementów w wyniku występowania cyklicznych naprężeń kontaktowych (sprężysto–plastycznych). Naprężenia kontaktowe wielocyklowe w WW powodują zmęczenie materiału, a następnie lokalną utratę spójności, co powoduje powstawanie i rozwój mikropęknięć, a w konsekwencji pęknięcia i ubytki materiału.

Proces zmęczenia może zachodzić w całej objętości elementu lub tylko w jego warstwie wierzchniej. W pierwszym przypadku występuje objętościowe zużywanie zmęczeniowe, w drugim zaś – powierzchniowe (stykowe). W niniejszej pracy, ze względu na jej tematykę rozważania ograniczono do drugiego przypadku.

Powierzchniowe zużywanie zmęczeniowe występuje przy współpracy ciał sprężystych o prostej i krzywoliniowej powierzchni tarcia lub o powierzchniach krzywoliniowych, stykających się punktowo lub liniowo, gdzie zachodzi poślizg z tarciem tocznym [Burakowski i inni 1992; Burakowski, Wierzchoń 1995; Łunarski 1989, Marczak 2002].

Do zużywania zmęczeniowego można zaliczyć następujące rodzaje zużywania [Burakowski, Marczak 1995; Burakowski, Wierzchoń 1995; Burakowski i inni 1992; Hebda, Wachal 1980; Lawrowski 2009]:

- łuszczenie (spalling),
- pitting,
- fretting,
- scuffing.

Autorzy pracy [Janecki, Gołabek 1971] zaliczają zużycie przez łuszczenie oraz pitting do grupy zużycia dynamicznego, zaznaczając przy tym, że jest to proces zużycia zmęczeniowego, który występuje przy tarcia tocznym uwarunkowanym powtarzającymi się cyklicznie odkształceniami plastycznymi współpracujący par ciernych prowadzących do pojawienia się pęknięć zmęczeniowych WW i wykruszeń.

*Łuszczenie* (spalling) polega na oddzielaniu się materiału w postaci łusek w wyniku cyklicznych naprężeń kontaktowych. Występuje przy braku smarowania (tarcie suche) niekiedy także przy niedostatecznym smarowaniu (tarcie mieszane) podczas toczenia. Procesowi temu towarzyszy zazwyczaj utlenianie się materiału w warstewce przypowierzchniowej.

*Pitting* polega na niszczeniu warstwy wierzchniej w wyniku cyklicznych naprężeń kontaktowych przy fizykochemicznych oddziaływaniach substancji smarującej, objawiające się w formie miejscowych ubytków materiału.

*Fretting* (zużywanie ścierno–korozyjne) polega na niszczeniu warstwy wierzchniej w postaci miejscowych ubytków materiału elementów poddanych działaniu drgań lub niewielkich poślizgów przy ruchu postępowo–zwrotnym, w wyniku cyklicznych naprężeń kontaktowych oraz intensywnego oddziaływania środowiska korozyjnego.

*Scuffing* (zużywanie ścierno–adhezyjne) to zużywanie występuje jako łączny skutek oddziaływania procesów zużywania ściernego i adhezyjnego prowadzących do zacierania.

### 2.3. Środki smarowe i dodatki uszlachetniające

Środki smarowe są to substancje wprowadzane między współpracujące powierzchnie trące w celu zmniejszenia skutków procesu zużywania, m.in. oporów tarcia. Ich głównym zadaniem jest wyeliminowanie tarcia suchego ze skojarzeń trących. Środki smarowe zbudowane są z bazy smarowej stanowiącej niejako fundament oraz dodatków uszlachetniających. Rodzaj dodatków oraz ich proporcje zdeterminowane są przeznaczeniem danego środka smarowego. Do grupy dodatków uszlachetniających zalicza się:

- dodatki przeciwkorozyjne,
  - inhibitory korozji,
  - inhibitory utleniania,
  - inhibitory rdzewienia,
  - deaktywatory metali,
- depresatory,
- dodatki przeciwstarzeniowe,
- dodatki przeciwpienne,
- dodatki smarnościowe,
- dodatki dyspergujące,
- dodatki myjące (detergenty),
- dodatki wiskozowe (poprawiające wskaźnik lepkości).

W grupie dodatków przeciwkorozyjnych zostały wyżej wymienione cztery rodzaje dodatków, które mimo że należą do tej samej grupy, różnią się jednak mechanizmem działania. Poniżej opisane zostały dwie z nich.

**Inhibitory utlenienia** - zapobiegają łańcuchowym i katalitycznym reakcjom utleniania, redukują nadtlarki organiczne, hamują procesy tworzenia się kwasów, żywic, osadów i szlamu. Są one używane w szerszym zakresie niż inne dodatki uszlachetniające. Ich zadaniem jest spowolnienie rozkładu oleju bazowego przez utlenianie. Działają one poprzez rozkład wodoronadtlenków, utworzonych w reakcji tlenu z węglowodorami, albo wolnych rodników nadtlarkowych.

Olej smarowy lub smar plastyczny w czasie pracy jest w kontakcie z tlenem powietrza, a wysoka temperatura i katalityczne właściwości metalu powierzchni tarcia stwarzają dobre warunki do utleniania oleju. Zachodzą złożone reakcje utleniania, które są autokatalityczne. Produkty utleniania zwiększają lepkość oleju, powstają kwaśne zanieczyszczenia o właściwościach korozyjnych oraz osady typu żywic, laków i polimerów. Inhibitory utlenienia przeciwdziałają tworzeniu wyżej wymienionych produktów.

**Inhibitory rdzewienia** - cząsteczki polarne tych dodatków mocno przylegające do powierzchni metalu tworzą warstwę odporną na działanie wody; reagując z metalem w warunkach tarcia tworzą nową warstwę wierzchnią, bardziej odporną na zużywanie.

Przykładowe typy tych związków chemicznych to: fosforany aminowe, sodowe, wapniowe, sulfoniany naftowe, alkilowane kwasy bursztynowe, kwasy tłuszczowe, dwualkilodwutiofosforany cynku, trójkrezylofosforany.

**Depresatory** - obniżają temperaturę krzepnięcia przez otaczanie zarodków kryształów węglowodorów parafinowych cząsteczkami depresatora. Podczas ich krystalizacji tworzą one zamknięte, siatkowe struktury przestrzenne, które adsorbują polimer i tworzą masę podobną do żelu. Depresatory pokrywają małe kryształy parafiny cienką błonką, nie dopuszczając do łączenia się ich w większe skupiska, tworząc w ten sposób strukturę szkieletową, która utrudnia płynięcie oleju. Depresatory nie wstrzymują krystalizacji stałych węglowodorów, lecz powodują powstawanie skrajnie małych i nieposiadających zdolności kohezyjnych kryształów, które nie tworzą dużych konglomeratów. Masy cząsteczkowe depresatorów wg [Lawrowski 2002; Lawrowski 2009] są znacznie mniejsze niż dodatków lepkościowych, zwykle w zakresie od 500 do 100 000 Da.

**Dodatki przeciwstarzeniowe** - zadaniem ich jest stabilizacja możliwie wszystkich pozytywnych cech środka smarowego.

Przykładowe typy tych związków chemicznych: pochodne fenoli, fenyloaminy.

**Dodatki przeciwpienne** - zapobiegają tworzeniu się piany przez zmianę napięcia powierzchniowego. Dodatki te tworzą na powierzchni oleju cieniutką warstwę, nie pozwalającą na utrzymanie się piany w oleju. Jako dodatki przeciwpienne stosowane są oleje silikonowe, dodawane w ilości tysięcznych części procentu.

Przykładowe typy tych związków chemicznych: polimery silikonowe.

**Dodatki smarnościowe** - w warunkach tarcia ulegają rozpadowi i reagują z metalem, tworząc nowe związki (siarczki, chlorki), które łatwiej ulegają ścinaniu niż metal podstawowy. Uczestniczą w reakcjach tribochemicznych w zakresie najszerszym spośród wszystkich dodatków uszlachetniających. Dodatki te dzielimy na:

- a) przeciwzatarciowe,
- b) przeciwzużyciowe,
- c) modyfikatory tarcia.

Dodatki przeciwzatarciowe, zwane dodatkami EP (Extreme Pressure), są organicznymi związkami chemicznymi, które przeciwdziałają nadmiernemu zużyciu powierzchni tarcia w czasie smarowania. Dodatki te w swojej cząsteczce zawierają jeden lub więcej heteroatomów, takich jak siarka, fosfor lub chlor. Funkcje przeciwzatarciowe posiada również grupa karboksylowa, czy to w postaci kwasu czy też soli. Wszystkie te związki w trudnych warunkach tarcia granicznego i mieszanego reagują z metaliczną powierzchnią tarcia tworząc prosty związek nieorganiczny. Utworzone związki nieorganiczne (siarczek, fosforan, tiofosforan, chlorek) mają mniejszą od

metalu wytrzymałość na ścinanie i przeciwdziałają szepianiu adhezyjnemu powierzchni tarcia (zespawaniu powierzchni styku tarcowego).

Związkami chemicznymi efektywnie działającymi jako dodatki EP są siarkowane: tłuszcze, węglowodory, estry metylowe nienasyconych kwasów tłuszczowych oraz terpeny. Zaliczamy do nich ponadto alifatyczne i aromatyczne sylfidy, organiczne fosforyny i fosforany, fosforany amoniowe, fosforosiarkowane węglowodory, dialkilo(arylo)ditiiofosforany i dialkilo-ditiokarbaminiany metali oraz chlorowane parafiny, chlorosiarkowane oleje tłuszczowe oraz naftenian ołowiu.

Siarkowane substancje chemiczne posiadają w swojej cząsteczce wiązania sulfidowe składające się z jednego lub większej liczby atomów siarki. Są to mono-, di-, tri- (i więcej) sulfidy. Ze wzrostem liczby atomów siarki w wiązaniu sulfidowym powyżej dwóch, znacznie rośnie reaktywność chemiczna tych substancji z powierzchnią tarcia i stają się one wtedy korozyjne. W wyniku siarkowania węglodorów tworzą się w cząsteczce związku mostki siarkowe.

Z disulfidów organicznych najlepsze własności EP wykazuje disulfid dibenzylowy, a przeciwzużyciowe – disulfid difenylowy.

Olej syntetyczny typu estru kwasu fosforowego z fenolami stosowany jest jednocześnie jako dodatek EP przeciwzużyciowy.

Jako dodatki przeciwzatarciowe stosowane są również fosforyny. Dobrymi dodatkami przeciwzatarciowymi są także wielofunkcyjne dodatki – dialkilotio-karbaminiany ołowiu lub antymonu.

Dodatki przeciwzużyciowe zmniejszają zużycie powierzchni tarcia przy umiarkowanych obciążeniach. Najszerzej stosowane są dialkilo(arylo)-ditiiofosforany cynku, fosforany trójkrezolu, fosforany, tiofosforyny, siarkowane węglowodory, dialkilotiokarbaminiany cynku oraz kompleksy dwurdzeniowe tiooksomolibdenu.

Dodatki przeciwzużyciowe w kontakcie i reakcji z metalem powierzchni tarcia tworzą warstwy adsorpcyjne i związki reakcyjne, zmniejszają opory tarcia, w wyniku czego uzyskuje się również zmniejszenie zużycia.

Dodatki zmniejszające współczynnik tarcia działają na zasadzie zwiększenia trwałości zaadsorbowanej fizycznie warstwy powierzchniowej. Wysokopolarne cząsteczki dodatków adsorbują się na powierzchni tarcia i pozostają tam w czasie procesu tarcia, zapobiegając stykowi metal-metal. Do dodatków zmniejszających tarcie (modyfikatory tarcia) należą głównie kwasy i aminy tłuszczowe, tłuszcze oraz niektóre sole ditiiofosforanów, N-acylosarkozydy i ich pochodne, mieszaniny kwasów organofosforowych i tłuszczowych.

Przykładowe typy tych związków chemicznych: siarkowane oleje roślinne lub zwierzęce, chlorowane węglowodory, sole ołowiowe kwasów organicznych, chlorowana siarka, estry kwasów tłuszczowych, związki fosforu [Lawrowski 2002; Lawrowski 2009; Krawiec 2011; Laber 2001; Laber 2003].

**Dodatki dyspergujące** - hamują one tworzenie się szlamu, otaczają cząsteczki zanieczyszczeń, zapobiegają ich aglomeracji i wydzielaniu. Dodatki te mają dobre właściwości rozpraszające (dyspergujące). Ich cząsteczki, podobnie jak detergenty, zbudowane są z długiego łańcucha węglodorowego zapewniającego dobrą rozpuszczalność dodatku w oleju, do którego dołączona jest grupa polarna. Grupa polarna zawiera jeden lub więcej heteroatomów azotu, tlenu, czasem fosforu, nie zawiera metali, stąd są to dodatki bezpopiołowe. Najszerzej stosowane są dodatki z heteroatomem azotu, jak alkilomono- i bis-imidy kwasu bursztynowego.

Dodatki rozpraszające, adsorbując się grupą polarną na powierzchni stałych zanieczyszczeń oleju, przeciwdziałają ich łączeniu się w większe aglomeraty i w ten sposób tworzą ich trwałą zawiesinę.

Przykładowe typu tych związków chemicznych: bursztynoimidy, metakrylany, polimery zawierające azot, polimetakrylany, aminy wielkocząsteczkowe, amidy, sulfoniany barowe, wapniowe.

**Dodatki myjące (detergenty)** - regulują one procesy tworzenia się aglomeracji osadów, zapobiegają odkładaniu się osadów, utrzymują je np. w postaci zawiesiny. Są to związki organiczne o właściwościach powierzchniowo czynnych. Stosowane w olejach detergenty zmniejszają ich napięcie powierzchniowe i temperatury rozkładu niektórych dodatków uszlachetniających. Są one też dodatkami przeciwdrożdżycowymi oraz inhibitorami rdzewienia, a sole sodowe używane są jako emulgatory oleju w wodzie w produkcji cieczy chłodząco-smarujących.

Budowa chemiczna dodatków myjących jest typowa dla środków powierzchniowo-czynnych. Częsteczka detergentu składa się z hydrofobowego długiego łańcucha węglowodorowego i polarnego końca cząsteczki.

Najczęściej stosowane dodatki myjące to obojętne i zasadowe sulfoniany i fenolany metali (wapnia i magnezu).

**Dodatki poprawiające wskaźnik lepkości (dodatki wiskozowe)** - zadaniem ich jest zmniejszenie wpływu temperatury na zmianę lepkości.

Wszystkie dodatki lepkościowe są związkami wielkocząsteczkowymi. Najbardziej rozpowszechnionymi są:

- poliizobutyleny,
- polimetakrylany i poliakrylany (estry alkoholi posiadających od 4 do 8 atomów węgla w cząsteczce),
- kopolimery olefinowe (kopolimery etylenowo-propylenowe, kopolimery etylenu, propylenu i heksadienu),
- polistyren,
- kopolimery styrenowo-dienowe.

W niskich temperaturach cząsteczki polimerów skrócone spiralnie są zawieszane w oleju i znajdują się w nim w stanie koloidalnym. W temperaturach wyższych rozpuszczają się w oleju i następuje rozprostowanie ich łańcuchów na całą długość. Zwiększa się w ten sposób powierzchnia styku dodatek – olej, hamując ruchliwość oleju i zwiększając wewnętrzne tarcie między jego cząsteczkami, co powoduje zwiększenie lepkości i wskaźnika lepkości.

Efekt działania dodatków lepkościowych zależy od ich zawartości w oleju, masy cząsteczkowej oraz właściwości oleju bazowego. Masa cząsteczkowa dodatków mieści się w zakresie 50 000÷1000 000 Da. Ze wzrostem masy cząsteczkowej dodatku efektywność zwiększania wskaźnika lepkości oleju rośnie, natomiast jego odporność na ścinanie maleje. Zmniejszenie wymiarów cząsteczek polimerów, w wyniku ich ścinania oraz występujących w styku tarciovym:

- procesów utleniania,
- podwyższonej temperatury,
- hydrolizy,

pogarsza właściwości dodatku. Dlatego niektóre polimery, jako dodatki lepkościowe, stosowane są w obecności innych dodatków, które zwiększają ich chemiczną stabilność.

Kopolimery zawierające grupy karboksylowych estrów oraz jedną lub więcej polarnych grup, takich jak:

- amidowa,
- eterowa
- hydroksylowa,
- aminowa,
- epoksydowa,

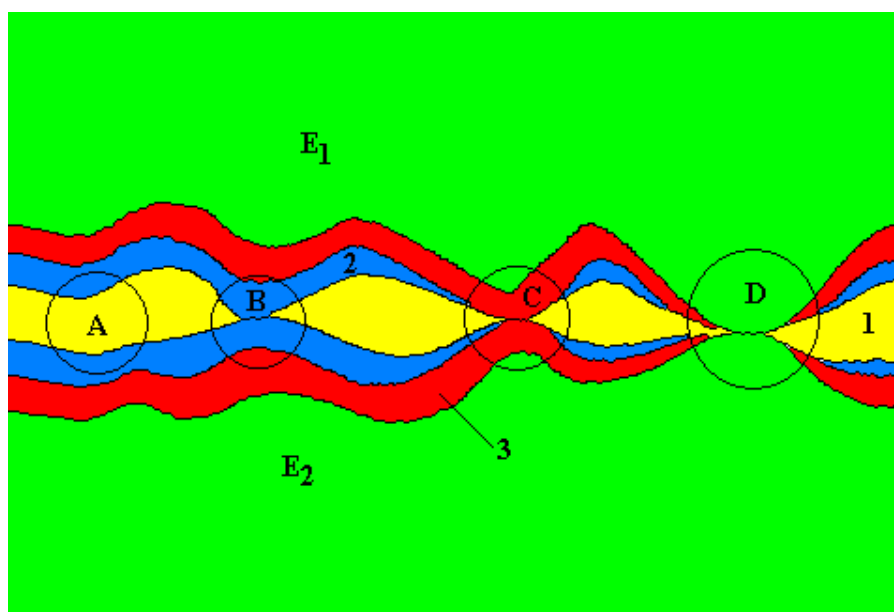
- fosforestrowa,
- karboksylowa,
- karboksylowa – bezwodnikowa albo nitylowa,

posiadają właściwości dyspergujące i lepkościowe. Dodatki lepkościowe mogą również obniżyć temperaturę krzepnięcia metalu [Lawrowski 2002; Lawrowski 2009; Krawiec 2011; Laber 2001; Laber 2003].

## 2.4. Preparaty eksploatacyjne

W eksploatacji maszyn i urządzeń dąży się do tego, aby węzły tarcia pracowały w warunkach tarcia płynnego lub co najmniej tarcia granicznego.

Środki smarowe – oleje handlowe, pomimo swych licznych zalet, do których należy zaliczyć między innymi zdolność odprowadzenia ciepła i produktów zużycia ze strefy tarcia, tłumienia drgań, ochronę przed korozją i inne, nie rozwiązują problemów smarowania w warunkach ekstremalnych obciążeń lub temperatur, nie likwidują tzw. zimnego startu (zimnego rozruchu silnika, przekładni, węzła tarcia). Powstała więc idea wprowadzenia do danego węzła tarcia wraz z olejem preparatu eksploatacyjnego (PE), mogącego łagodzić tego rodzaju warunki poprzez poprawę jakości warstwy granicznej zdolnej do przenoszenia zarówno większych obciążeń jak również odpornej na przerywanie. PE jest to substancja złożona w swej budowie. Zawiera zazwyczaj bazę olejową z kompleksem różnorodnych dodatków, m. in. smarnościowych, przeciwstarzeniowych i innych [Kołodźski 1995; Kołodźski i inni 2008; Kośla i inni 2012; Ozimina 2000; Ozimina 2013; Burakowski 2013; Płaza i inni 2005]. Mechanizm działania PE najogólniej można przedstawić następująco. Cząsteczki PE transportowane są przez ciecz smarującą do węzłów tarcia, gdzie w wyniku procesu adsorpcji – fizycznej lub chemicznej, w sposób trwały wiążą się z powierzchniami metalicznymi ze sobą współpracującymi. Na powierzchniach węzła tarcia powstaje w ten sposób nowy film smarujący lub zastępcza warstwa graniczna. W przypadku niedosmarowania w miejscach lokalnych styków powierzchni metalicznych cząsteczki PE przejmują rolę filmu smarnego. W tym momencie współczynnik tarcia ulega gwałtownemu zmniejszeniu do wartości charakterystycznych dla tarcia płynnego. Efektywność oddziaływania zastępczej warstwy granicznej w mikroobszarach styku współpracujących ze sobą powierzchni zależna jest od intensywności procesów adsorpcji w mikroobszarach styku. Model węzła tarcia z zastosowaniem PE przedstawiono na rys. 2.11.



Rys. 2.11. Model węzła tarcia z zastosowaniem preparatów eksploatacyjnych:

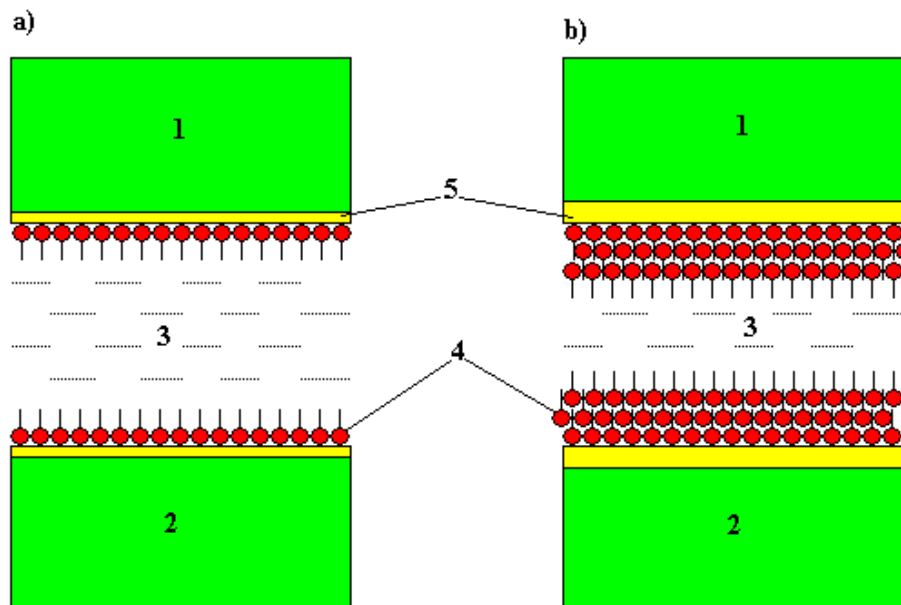
E1, E2 – elementy pary trącej; 1 – środek smarowy wzbogacony preparatem eksploatacyjnym, 2 – właściwa warstwa graniczna (utworzona w wyniku stosowania środka smarnego), 3 – zastępcza warstwa graniczna; A - faza tarcia płynnego, B - faza tarcia granicznego, C - faza tarcia granicznego z udziałem zastępczej warstwy granicznej, D – faza tarcia suchego [Laber 2001; Laber 2003]

Z uwagi na to, że PE mają różne mechanizmy działania, można klasyfikować je wg tego mechanizmu. W pracy [Laber 2003] autor dzieli je na trzy zasadnicze grupy:

- o działaniu chemicznym,
- zawierające w swym składzie określone cząsteczki środków smarnych stałych takich jak np. teflon, metale miękkie, grafit i inne,
- umożliwiające powstanie w węźle tarcia smarowania na zasadzie tzw. przenoszenia selektywnego (PS).

#### 2.4.1. Preparaty o działaniu chemicznym

Do preparatów tych zaliczamy związki zawierające m.in. siarkę, chlor, wzbogacone dodatkowo tlenem, cynkiem, borem, selenem. Wchodzą one w reakcję z podłożem metalicznym. Dzięki dyfuzji składników tych dodatków do warstwy wierzchniej, na powierzchni metalu tworzą się ochronne warstewki fosforanów, siarczków itp. W ten sposób uzyskuje się równocześnie „mocną” warstwę graniczną oleju dzięki chemisorpcji oraz dodatkowe zabezpieczenie w postaci warstewki dyfuzyjnej. Tak utworzona warstewka przypowierzchniowa, regenerująca się w czasie pracy węzła tarcia, charakteryzuje się dużą odpornością na przenoszenie obciążeń mechanicznych, zmniejszonym współczynnikiem tarcia oraz zwiększoną odpornością na zużywanie (zatarcie). Model węzła tarcia smarowanego olejem z dodatkiem PE o działaniu chemicznym przedstawiono na rys. 2.12.



Rys. 2.12. Model węzła tarcia smarowanego: a) olejem bazowym, b) olejem wzbogaconym preparatem eksploatacyjnym o działaniu chemicznym; 1, 2 – elementy trące, 3 – środek smarowy, 4 – warstwa graniczna utworzona w wyniku sorpcji fizycznej, 5 – warstwa graniczna utworzona w wyniku chemisorpcji [Laber 2003]

**Tabela 2.1. Wartość współczynnika tarcia przykładowych substancji smarnych dla smarowania granicznego [Janecki, Gołąbek 1971]**

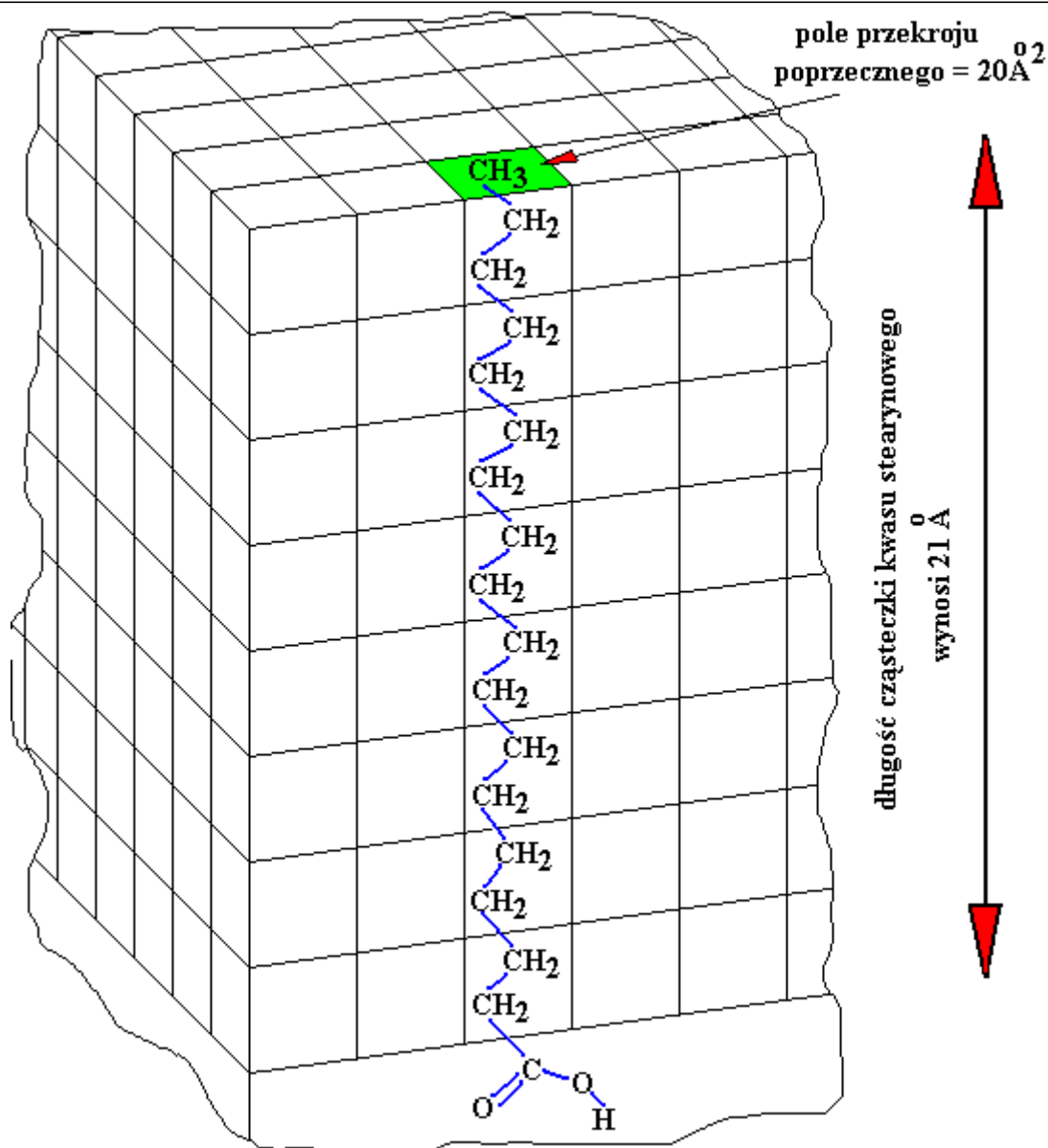
Środek smarny	Współczynnik tarcia $\mu$
Kwas stearynowy	0,022
Dwusiarczek molibdenu	0,030
Dwusiarczek wolframu	0,032
Grafit	0,036
Siarczyk srebra	0,055
Olej turbinowy + 1% MoS <sub>2</sub>	0,060
Olej rycynowy	0,064
Olej ołowiany	0,066
Smar na podstawie tlenku cynku	0,071
Smar wapniowy	0,073
Olej turbinowy	0,088
Kwas oleinowy	0,093
Olej maszynowy	0,099

W pracy [Janecki, Gołąbek 1971] przedstawiono wartości współczynnika tarcia przykładowych substancji smarnych dla smarowania granicznego. Najmniejszą wartość współczynnika tarcia granicznego w tym zestawieniu zajmuje kwas stearynowy, którego wymiary jednocząsteczkowej warstwy powierzchniowej przedstawiono na rys. 2.13. Jest to długołańcuchowy kwas organiczny stanowiący substancję powierzchniowo czynną tworzącą cienką błonę. Błona ta w pewnych warunkach może stanowić warstwę jednocząsteczkową. Powstała błona ma grubość równą długości cząsteczki kwasu stearynowego, czyli 21 Å. Prawdopodobnie to grupa kwasowa kwasu stearynowego jest przyciągana do powierzchni współpracujących elementów, tworząc niejako zakotwiczenie dla długiego łańcucha węglowodorowego. Typ struktury takiej błony określane jest czasem mianem „sandwicz”. Przy dużych obciążeniach ta cienka warstwa nie zabezpiecza jednak współpracujących elementów przed zużyciem/zniszczeniem.

Współpracujące pary cierne są wykonywane z różnych materiałów. Jak wobec tak dużej gamy obecnie produkowanych tworzyw konstrukcyjnych zachowuje się kwas stearynowy - trudno określić. Zastrzeżenie co do słuszności stosowania tej substancji jako środka smarnego budzi m. in. bezpieczeństwo dotyczące obsługi przez personel techniczny takich węzłów tarcia.

W pracy [Barrow G. 1971] stwierdzono, że kwas stearynowy posiada właściwość zagęszczania swoich cząsteczek m. in. na granicy faz olej-woda lub na powierzchni wody. Tego typu układy cienkich warstw powierzchniowych odgrywają istotną rolę szczególnie w procesach smarowania i zwilżania przez wodę zawierającą detergenty i mydła. W w/w pracy nie określono jednak o ile wzrasta to zagęszczenie cząsteczek kwasu stearynowego i od czego ono zależy?





Rys. 2.13. Wymiary jednocząsteczkowej warstwy powierzchniowej kwasu stearynowego  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$  (opracowano na podstawie Barrow G. 1971).

#### 2.4.2. Preparaty z cząsteczkami środków smarowych stałych

Do środków smarowych stałych zaliczyć można m.in. grafit, dwusiarczek molibdenu lub dwusiarczek wolframu, których budowa i działanie zostało omówione poniżej. Ze względu na trudności ich efektywnej aplikacji substancje te są najczęściej stosowane w preparatach jako dodatki smarowe.

Grafit jest przykładem struktury, w której występują wiązania różnego typu. Istnienie silnych wiązań kowalencyjnych między atomami węgla w warstwach oraz słabych – metalicznych między warstwami, ułatwia poślizg w płaszczyznach spójności grafitu – rys. 2.14. Grafit jest koloru czarnego, czarnoszarego, o słabym połysku metalicznym, tłustawym w dotyku, bardzo miękkim, dobrze przewodzącym elektryczność i ciepło. Przy czym należy tu pamiętać, że grafit przewodzi prąd elektryczny dobrze, chociaż znacznie słabiej niż metale. Poza tym przewodnictwo elektryczne grafitu mierzone w kierunku równoległym do płaszczyzn sieciowych jest około dwa razy większe niż mierzone kierunku prostopadłym. Wyjaśnienie tego faktu znajduje się m.in.

w pracy [Bielański A. 1973]. Ciekawym wnioskiem płynącym z tego faktu jest to, że płaszczyna łatwych poślizgów (bardzo ważna z punktu tribologii) pokrywa się z płaszczyną większego przewodnictwa elektrycznego grafitu. Grafit ma masę cząsteczkową 12,01; jego temperatura wrzenia wynosi 4200°C. Gęstość grafitu (oznaczenie  $d_4^{20}$ ) w temperaturze 20°C względem wody o temperaturze 4°C wynosi 2,25 [kg/dcm<sup>3</sup>]. Jego struktura budowy ma układ heksagonalny. Grafit nie jest rozpuszczalny w zimnej wodzie, nie jest rozpuszczalny w gorącej wodzie, nie jest rozpuszczalny w kwasach. [Poradnik fizyko-chemiczny WNT, W-wa 1974]. Grafit wykazuje niższy ciężar gatunkowy, a tym samym jego struktura sieci przestrzennej jest luźniejsza, niż diament. Dlatego też przemiana grafitu w diament wymaga zastosowania dużych ciśnień (w zależności od technologii: od 60 tys. bar ÷ 200 tys. bar) oraz dużych temperatur (w zależności od technologii: od 1200°C ÷ 4000°C). Natomiast diament ulega przemianie w grafit w temperaturze ok. 1500°C. Twardość grafitu wg skali Mohsa wynosi 0,5 ÷ 1,5. Jego współczynnik tarcia wynosi 0,1 (grafit po grafitowej powierzchni) [Magiera, Olszewski, Ozimina 1981]. Odporność termiczna grafitu wynosi:

- 500°C w powietrzu;
- 3500°C w próżni.

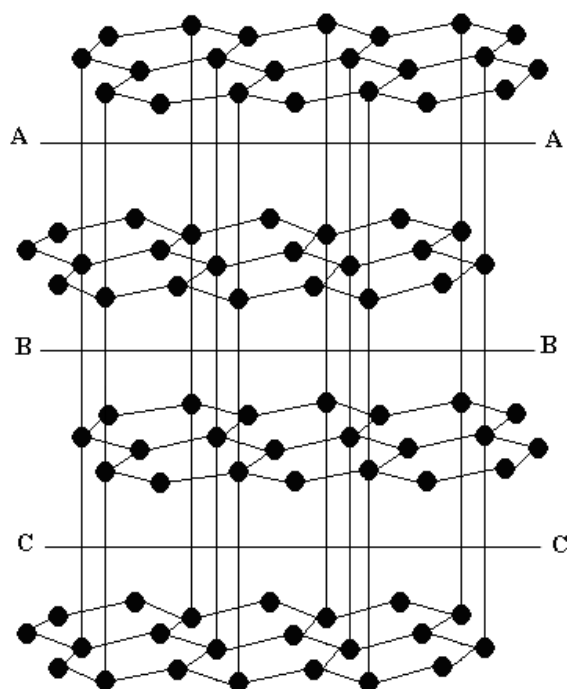
Istotę smarowania grafitem wyjaśniają dwie teorie: strukturalna i adsorpcyjna. Teoria strukturalna przypisuje właściwości smarne warstwowej budowie siatki krystalicznej, natomiast teoria adsorpcyjna – adhezji smaru do powierzchni metalu. Występowanie dużych odległości między warstwami węgla jest przyczyną słabego oddziaływania międzyatomowego (małe siły van der Waalsa). Wskutek tego ułatwione jest wzajemne przemieszczanie się tych warstewek w kryształach po płaszczynach poślizgu (teoria strukturalna). Równocześnie grafit wykazuje dobre właściwości smarne dzięki adsorpcji wody. Zaadsorbowane cząsteczki wody na głównych płaszczynach poślizgu zmniejszają adhezję między nimi i tym samym zmniejszają współczynnik tarcia podczas ich przesuwania (teoria adsorpcyjna). Należy jednak przypuszczać, że dobre cechy smarne uzyskuje się wówczas, gdy spełnione są obydwa warunki, tzn. środek smarny wykazuje budowę warstwową, a ponadto posiada dobre właściwości adhezyjne. Grafit może być otrzymywany na drodze syntetycznej lub ze źródeł naturalnych. Grafit syntetyczny otrzymuje się w procesie uwęglania i grafityzacji w wysokich temperaturach substancji, które są bogate w pierwiastek węgiel C. Przykładem takich substancji mogą być np. węglowodory. Istnieje jednak poważny problem nanoszenia tego rodzaju środka smarnego jakim jest grafit, na współpracujące powierzchnie. Stosuje się wówczas grafit w postaci zwartej, np. szczotki smarujące, ołówki, brykiety lub w postaci rozdrobnionej, czyli sproszkowanej. Proszki te są wcierane w powierzchnie tarcia lub nanoszone w postaci aerosoli, zawiesin w niepalnych rozpuszczalnikach, a nawet w wodzie – w zależności od warunków pracy danego węzła tarcia. Innym rozwiązaniem dotyczącym nanoszenia grafitu na powierzchnie smarowane jest sporządzanie past grafitowych na bazie smarów plastycznych. Czasami, jako materiał wiążący dla grafitu stosuje się lakiery, szkło wodne (roztwór krzemianu sodu) lub żywice syntetyczne, którymi pokrywa się współpracujące powierzchnie tarcia. Zdarza się, np. w węzłach tarcia dla przemysłu szklarskiego, że grafit podlega wyselekcjonowaniu w celu otrzymania niskotarciowej suchej powłoki, z domieszką odpowiednich żywic, odpornej na wysokie temperatury.

Dwusiarczek molibdenu również posiada strukturę warstwową. Występują w niej trójwarstwowe pakiety - warstwy atomów molibdenu i dwie warstwy siarki. Istnienie silnych wiązań kowalencyjnych między atomami Mo-S oraz słabych (van der Waalsa) między atomami siarki S-S, umożliwia łatwy poślizg warstw siarka-siarka. Mechanizm działania smarnego dwusiarczku molibdenu jest podobny do mechanizmu smarowania grafitem. Różnica polega na tym, że tworzenie cienkiej warstewki, przylegającej bezpośrednio do powierzchni metalu, zachodzi nie tylko w wyniku adsorpcji fizycznej lecz także chemisorpcji wywołanej reakcją chemiczną jonów siarki z atomami metalu. Po wytworzeniu tej warstewki w dalszej kolejności następuje wypełnianie wgłębień nierówności cząsteczkami dwusiarczku molibdenu dotąd, aż poślizg zacznie zachodzić między warstewkami MoS<sub>2</sub>. Gęstość dwusiarczku molibdenu wynosi

$4,8 \div 5,0$  [ $\text{kg}/\text{dcm}^3$ ], czyli ponad dwukrotnie więcej niż grafitu. Twardość wg skali Mohsa wynosi dla  $\text{MoS}_2$  od 1 do 2. Współczynnik tarcia natomiast wynosi  $0,05 \div 0,1$  (w zależności od jakości powierzchni). Dwusiarczek molibdenu praktycznie nie przewodzi energii elektrycznej. Jego odporność termiczna wynosi:

- $450^\circ\text{C}$  w powietrzu;
- $1200^\circ\text{C}$  w próżni;
- $1340^\circ\text{C}$  w argonie.

Dwusiarczek molibdenu jest ciałem krystalicznym o budowie warstwowej, heksagonalnej w kolorze czarno-szarym o połysku metalicznym [Magiera, Olszewski, Ozimina 1981].



Rys. 2.14. Struktura grafitu, A-A, B-B, C-C – ślady płaszczyzn poślizgu [Krawiec 2011]

Dwusiarczek wolframu także posiada strukturę warstwową, w której między atomami siarki S-S występuje warstwa łatwego poślizgu. Mechanizm działania smarnego dwusiarczku wolframu jest podobny do mechanizmu smarowania dwusiarczkiem molibdenu. Tutaj również występuje reakcja chemiczna jonów siarki z atomami metalu podłoża. Po wytworzeniu tej warstewki następuje wypełnienie wgłębień nierówności cząsteczkami dwusiarczku wolframu tak długo, aż poślizg zacznie zachodzić między warstewkami dwusiarczku wolframu. Ten środek smarny stosowany jest głównie w węzłach tarcia pracujących w wysokich temperaturach. Dwusiarczek wolframu otrzymywany jest wyłącznie na drodze syntetycznej.  $\text{WS}_2$  ma współczynnik tarcia wynoszący:

- 0,17 w powietrzu;
- 0,13 w próżni.

Do w/w substancji o budowie warstwowej, czyli wykazującej anizotropię spójności, mającej zastosowanie jako środki smarowe należy zaliczyć również m. in.:

- dwusiarczek ołowiu  $\text{PbS}_2$ ;
- siarczek kadmu  $\text{CdS}$ ;
- selenki metali przejściowych ( $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ );
- trójtlenek antymonu  $\text{SbO}_3$ ;
- wodorotlenek kadmu  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ;
- wodorotlenek molibdenu  $\text{Mo}(\text{OH})_2$ ;

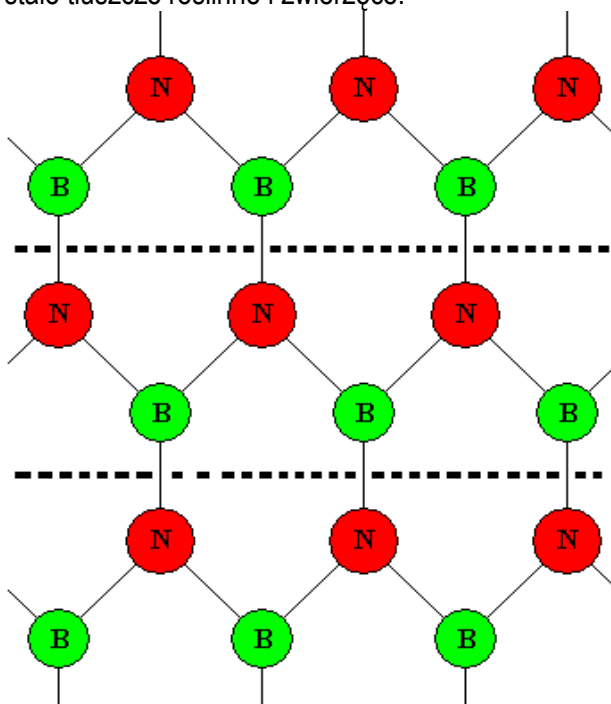
- halogenki ( $\text{AgJ}$ ,  $\text{CdCl}_2$ );
- azotek boru BN;
- siarczan srebra  $\text{AgSO}_4$ .

Azotek boru BN (rys. X) ma barwę białą, budowę w układzie heksagonalnym. Jego gęstość ( $d_4^{20}$ ) w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  względem wody o temperaturze  $4^\circ\text{C}$  wynosi 2,2 (2,34)  $[\text{g}/\text{dm}^3]$ . Jest to związek nieorganiczny, nie rozpuszczalny w zimnej wodzie, trudno rozpuszczalny w gorącej wodzie, trudno rozpuszczalny w gorącym kwasie. BN ma masę cząsteczkową wynoszącą 24,82. Sublimuje w temperaturze ok.  $3000^\circ\text{C}$ . [Poradnik fizyko-chemiczny, Wyd. drugie, WNT, Warszawa 1974]. Azotek boru jest trudno topliwy, izoelektronowy z węglem, wykazuje podobnie jak grafit warstwową strukturę sieci przestrzennej. Azotek boru powstaje podczas silnego ogrzewania borazolu lub podczas ogrzewania elementarnego boru w atmosferze azotu.

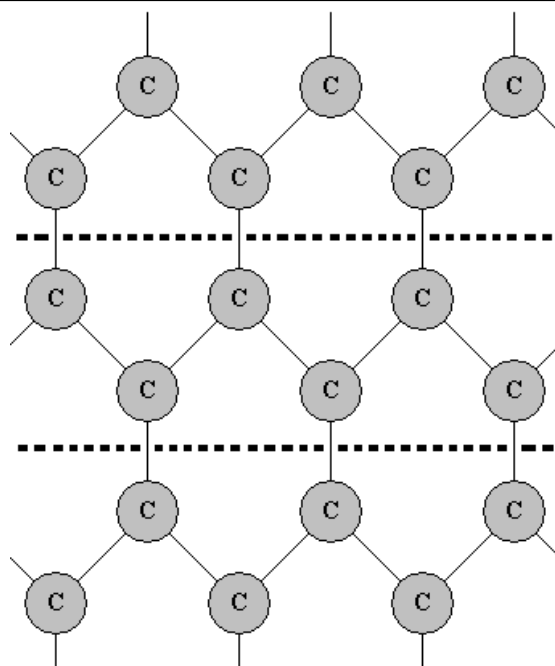
Jodek srebrowy  $\text{AgJ}$  należy do halogenków. Występuje w dwóch odmianach:  $\alpha$  oraz  $\beta$ . Odmiana  $\alpha$  ma kolor żółty, strukturę budowy w układzie heksagonalnym, rozpuszcza się zarówno w zimnej jak i gorącej wodzie, ma masę cząsteczkową równą 234,77. Jego gęstość ( $d_4^{30}$ ) w temperaturze  $30^\circ\text{C}$  względem wody o temperaturze  $4^\circ\text{C}$  wynosi 5,683  $[\text{g}/\text{dm}^3]$ . Natomiast odmiana  $\beta$  powstaje z odmiany  $\alpha$ . Jej struktura ma układ regularny. Barwę posiada pomarańczową. Masa cząsteczkowa tej odmiany jest ta sama, jednak jej gęstość ( $d_4^{14,6}$ ) w temperaturze  $14,6^\circ\text{C}$  względem wody o temperaturze  $4^\circ\text{C}$  wynosi 6,010  $[\text{g}/\text{dm}^3]$ . Temperatura topnienia odmiany  $\beta$  wynosi  $558^\circ\text{C}$ , natomiast temperatura wrzenia  $1506^\circ\text{C}$ . Tylko odmiana  $\alpha$  ma zastosowanie jako środek smarowy. [Poradnik fizyko-chemiczny, Wyd. drugie, WNT, Warszawa 1974].

Drugą grupą substancji stałych charakteryzującymi się małymi oporami tarcia wewnętrznego, czyli mającymi zastosowanie jako środki smarowe, są substancje o małej wewnętrznej spójności, do których należy zaliczyć m. in.:

- miękkie metale (ind, miedź, ołów, cyna, cynk, srebro), stosowane zazwyczaj w postaci sproszkowanej;
- miękkie polimery;
- mydła, woski, stałe tłuszcze roślinne i zwierzęce.



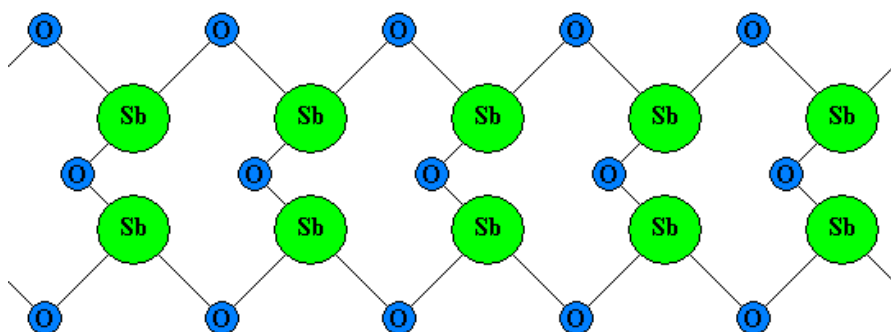
Rys. 2.15. Struktura azotku boru BN z zaznaczeniem linią przerywaną płaszczyzn poślizgu. (na podstawie Bielański A. 1973). B – bor; ciężar atomowy wynosi 10,811; liczba atomowa wynosi 5; N – azot, ciężar atomowy wynosi 14,0067; liczba atomowa wynosi 7.



Rys. 2.16. Struktura grafitu z zaznaczeniem linią przerywaną płaszczyzn poślizgu. ( na podstawie Bielański A. 1973).  
C – węgiel; ciężar atomowy wynosi 12,01115; liczba atomowa wynosi 6.

Ind (symbol chemiczny In) występuje w skorupie ziemskiej w bardzo małych ilościach, ok.  $10^{-50}/_0$  i dużym rozproszeniu. Nie tworzy żadnych minerałów. Otrzymuje się go zwykle przy okazji przeróbki blendy cynkowej. Sieć przestrzenna indu jest siecią tetragonalną płasko scentrowaną, rzadko spotykaną u metali. Ind, który należy do najmiększych pierwiastków, daje się z łatwością krajać nożem. W atmosferze powietrza w temperaturze pokojowej nie ulega utlenieniu. Łatwo rozpuszcza się w kwasach mineralnych. Nie rozpuszcza się w alkaliach. Zastosowanie indu jest znacznie ograniczone. Wprowadzany bywa do niektórych specjalnych stopów np. dentystycznych. Ind ma m.in. następujące fizyczne właściwości [Bielański A. 1973]:

- konfiguracja elektronowa  $5s^2p^1$ ;
- masa atomowa: 114,82;
- gęstość:  $7,31 \text{ g/cm}^3$ ;
- temperatura topnienia:  $156,17^\circ\text{C}$ ;
- temperatura wrzenia: ok.  $2047^\circ\text{C}$ ;
- elektroujemność: 1,7;
- promień atomowy: 1,50 Å.



Rys. 2.17. Struktura trójtlenku antymonu  $\text{SbO}_3$  (opracowano na podstawie Bielański A. 1973)

antymon Sb, liczba atomowa 51; ciężar atomowy: 121,75

tlen O, liczba atomowa 8; ciężar atomowy: 15,9994

Miedź (symbol chemiczny Cu) występuje w skorupie ziemskiej pod względem rozpowszechnienia na 26 miejscu wśród innych pierwiastków (0,007% skorupy ziemskiej). Miedź tworzy liczne minerały m.in.:

- krzemianowe;
- węglanowe (malachit  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ , azuryt  $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ );
- tlenkowe (kupryt  $\text{Cu}_2\text{O}$ );
- siarczkowe (chalkozyn  $\text{Cu}_2\text{S}$ , chalkopiryty  $\text{CuFeS}_2$ ).

Miedź ma barwę różową, jest dobrym przewodnikiem ciepła i elektryczności. W atmosferze powietrza powierzchnia miedzi pokrywa się cienką warstwą  $\text{Cu}_2\text{O}$ , która nadaje jej charakterystyczną barwę czerwoną. W trakcie ogrzewania  $\text{Cu}_2\text{O}$  utlenia się do czarnego  $\text{CuO}$ . W obecności wilgoci oraz  $\text{CO}_2$  tworzy się na powierzchni miedzi zielona powłoka zasadowych węglanów, tzw. patyna, dobrze chroniąca jej powierzchnie przed dalszym działaniem czynników atmosferycznych. Skutki tego zjawiska są dobrze widoczne np. na dachach starych kościołów pokrytych blachami miedzianymi. Na miedź nie działają kwasy nieutleniające. Kwas azotowy łatwo rozpuszcza miedź. Miedź ma m.in. następujące właściwości fizyczne [Bielański A. 1973]:

- konfiguracja elektronowa:  $3d^{10}4s^1$ ;
- masa atomowa: 63,54;
- temperatura topnienia:  $1083^\circ\text{C}$ ;
- gęstość:  $8,96 \text{ g/cm}^3$ ;
- elektroujemność: 1,9;
- promień atomowy: 1,28 Å.

Srebro (symbol chemiczny Ag) występuje w skorupie ziemskiej w małych ilościach ( $1 \cdot 10^{-5}$  skorupy ziemskiej). Do najważniejszych minerałów srebra należą m. in.:

- argentyt  $\text{Ag}_2\text{S}$ ;
- pirargiryt  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ ;
- chlorargiryt  $\text{AgCl}$ .

Srebro stanowi również zanieczyszczenie innych rud, np. rud ołowiu lub miedzi. Srebro jest bardzo dobrym przewodnikiem ciepła i elektryczności. Nie ulega działaniu tlenu atmosferycznemu. Utlenia je natomiast ozon. Srebro reaguje z siarkowodorem tworząc ciemny nalot. Srebro w stanie czystym jest bardzo miękkie. Srebro ma m.in. następujące właściwości fizyczne [Bielański A. 1973]:

- konfiguracja elektronowa:  $4d^{10}5s^1$ ;
- masa atomowa: 107,870;
- temperatura topnienia:  $960,8^\circ\text{C}$ ;
- gęstość:  $10,5 \text{ g/cm}^3$ ;
- elektroujemność: 1,9;
- promień atomowy: 1,44 Å.

Cynk (symbol chemiczny Zn) jest dość znacznie rozpowszechnionym pierwiastkiem w skorupie ziemskiej i zajmuje pod tym względem 25 miejsce (0,008% skorupy ziemskiej). Do najważniejszych minerałów cynku zalicza się m. in. {Bielański A. 1973}:

- blendę cynkową (sfaleryt);
- wurcyt;
- smitsonit  $\text{ZnCO}_3$ .

Cynk rozpuszcza się dobrze w kwasach mineralnych. W atmosferze powietrza pokrywa się cienką warstwą tlenku, co powoduje, że jego powierzchnia traci połysk. Pali się płomieniem niebieskozielonym tworząc  $\text{ZnO}$ . Cynk ma następujące właściwości fizyczne:

- konfiguracja elektronowa:  $3d^{10}4s^2$ ;
- masa atomowa: 65,37;
- temperatura topnienia:  $419,5^\circ\text{C}$ ;

- temperatura wrzenia: 907°C;
- gęstość: 7,14 g/cm<sup>3</sup>;
- elektroujemność: 1,6.

Zmniejszenie tarcia i zużycia powierzchni współpracujących można uzyskać również przez wprowadzenie do węzła tarcia kulistych cząstek teflonu (PTFE) – stałego środka smarnego o małej wewnętrznej spójności. PTFE może być trwale naładowany elektrycznie dodatnio lub może być elektrycznie obojętny. W pierwszym przypadku w wyniku oddziaływania elektrostatycznego preparaty PTFE przyciągane są do powierzchni metalowej i następuje fizykochemiczne wiązanie PTFE-metal. Cząsteczki PTFE, zaadsorbowane w postaci warstewek na powierzchni metali, posiadają z reguły większe rozmiary niż mikronierówności tych powierzchni elementów. W sytuacji zmniejszenia odległości między powierzchniami współpracujących elementów, cząsteczki PTFE ulegają rozwalcowywaniu. Następuje tzw. „szpachlowanie” powierzchni. Powstałe warstewki mają bardzo dużą przyczepność do współpracujących powierzchni.

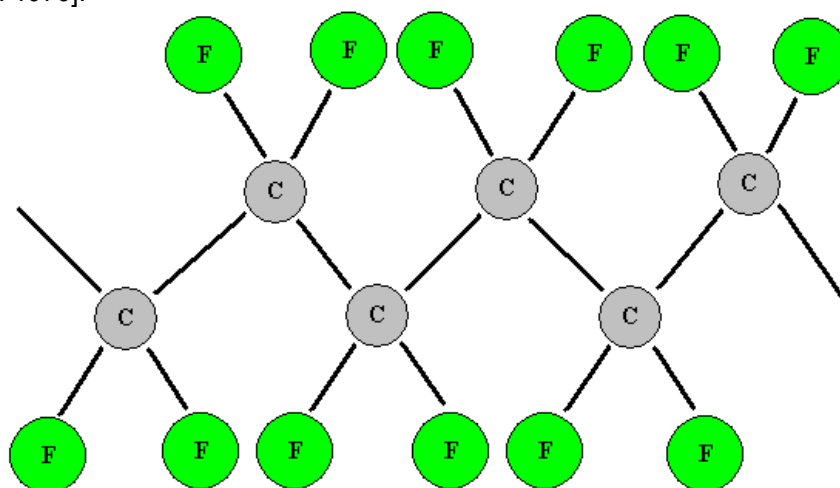
W drugim przypadku – gdy cząsteczki PTFE są elektrycznie obojętne – obserwuje się brak zdolności tworzenia na współpracujących powierzchniach metalowych warstewek o opisanej wcześniej trwałości.

Teflon należy do polimerów niskotarciowych, ale posiada pewne wady, do których należy m.in. zaliczyć:

- małą odporność na zużycie,
- dużą rozszerzalność cieplną,
- małą przewodność cieplną,
- „płynięcie na zimno” pod wpływem obciążeń ściskających.

W celu wyeliminowania w/w wad stosuje się teflon np. wzmocniony włóknem szklanym, ewentualnie wypełniony sproszkowanym grafitem lub dwusiarczkiem molibdenu. Często też stosowany bywa jako środek smarowy sproszkowany teflon w postaci zawiesiny [Magiera, Olszewski, Ozimina 1981].

Teflon należy do związków węgla z fluorowcami i zaliczany jest do grupy fluoroków łańcuchowych zawierających wiązania podwójne. Czterofluoroetylen C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> pod zwiększonym ciśnieniem ulega polimeryzacji z utworzeniem bezbarwnej stałej masy zawierającej długie łańcuchy (rys. 2.18). Teflon jest nazwą handlową tak otrzymanej substancji. Charakteryzuje się on wysoką odpornością na działanie czynników chemicznych, m. in. F<sub>2</sub>, HCl, wrzący HNO<sub>3</sub> [Bieleński A. 1973].



Rys. 2.18. Struktura budowy czterofluoroetyleny (teflonu) C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> (opracowano na podstawie Bieleński A. 1973)

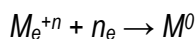
F – atomy fluoru o liczbie atomowej 9 oraz ciężarze atomowym 18,9984, C- atomy węgla o liczbie atomowej 6 oraz ciężarze atomowym 12,01115 (na podstawie Bieleński A. 2007)

### 2.4.3. Preparaty umożliwiające smarowanie na zasadzie tzw. przenoszenia selektywnego (PS)

Efekt przenoszenia selektywnego oparty jest na zjawisku tribologicznym, w wyniku którego na powierzchniach trących tworzy się plastyczna, cienka, nie utleniająca się warstewka o specyficznej strukturze. Powstaje ona wtedy, gdy w parze trącej w danych warunkach nie występuje tarcie płynne, a mimo to wartość współczynnika tarcia i równocześnie intensywność zużycia zmniejsza się o 2÷3 rzędy.

Istotę działania mechanizmu przenoszenia selektywnego wyjaśniają dwie hipotezy:

- mechanizm oparty na mikroadhezyjnym szepianiu cząstek metalu miękkiego z powierzchnią tarcia metalu twardego. W stadium początkowym tworząca się warstewka ochronna ma skład metalu miękkiego. W przypadku stworzenia warunków sprzyjających procesowi przenoszenia selektywnego skład ten może ulegać zmianie. Warstewka może wzbogacać się o składniki katodowe w wyniku selektywnego rozpuszczania, np. miedzi, gdy metalem miękkim są jej stopy [Krawiec 2011; Garkunow 1987];
- mechanizm, wg którego tworzenie metalicznej warstewki ochronnej jest wynikiem procesu elektrochemicznego typu:



Tworząca się warstewka zawiera tylko jeden metal wprowadzony w formie dodatku metalizującego do środka smarnego lub nanoszonego na powierzchnię tarcia w wyniku reakcji składników substancji smarowej z powierzchnią zawierającą ten metal – w postaci składników stopowych, pokrycia lub warstewek. W przypadku stopów miedzi – przenoszeniu ulega miedź [Marczak 1993; Marczak 1955; Krawiec 2011; Garkunow 1987].

Jako metale miękkie stosowane w tribotechnice znalazły zastosowanie proszki miedzi, glinu, cyny, ołowiu, srebra. Zdarza się, że zamiast proszków metali miękkich stosowane są cienkie powłoki metali miękkich takich jak ind, gal, kadm oraz ołów zabezpieczające przed zatarciem współpracujące powierzchnie tarciove w przypadku przerwania filmu olejowego. [Magiera, Olszewski, Ozimina 1981]

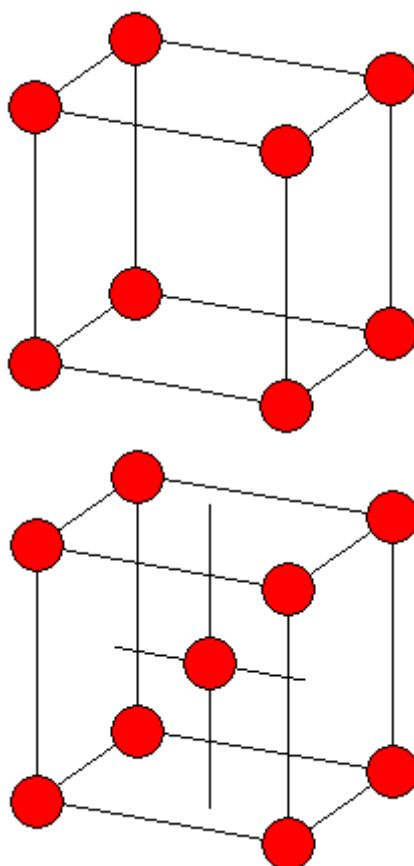


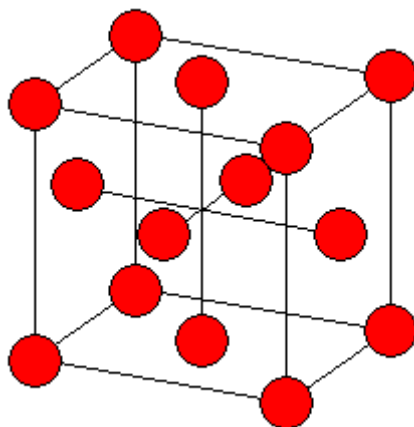
### 3. SIECI I KOMÓRKI ELEMENTARNE

W 1848 roku A. Bravais wykazał istnienie tylko 14 możliwych typów sieci trójwymiarowej. Jednostki tych sieci powtarzając się w trzech wymiarach tworzą sieć. Każdy więc kryształ rzeczywisty musi mieć strukturę wewnętrzną odpowiadającą jednej z tych 14 sieci Bravais'ego, których przykładowe struktury przedstawiono na rysunkach 3.1, 3.2, 3.3 oraz 3.4. Każdy kryształ, ze względu na swoją symetrię, zaliczyć można do jednego z sześciu układów krystalograficznych. W/w układy wg [A. Bielański 2007] to:

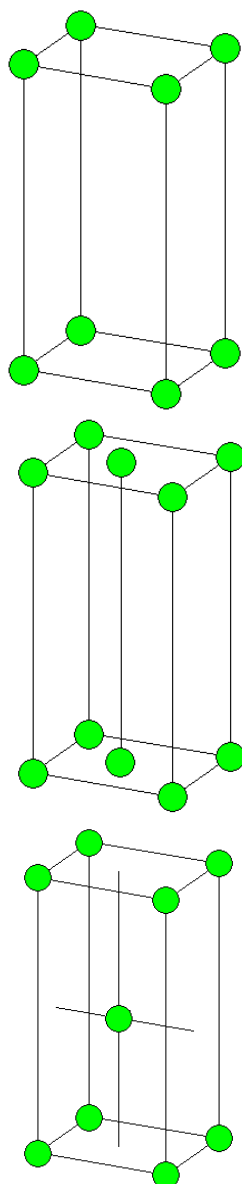
- układ regularny (odznacza się obecnością 4 osi trójrotnych);
- układ tetragonalny (zawiera zawsze jedną lecz tylko jedną czterokrotną oś symetrii);
- układ rombowy (nie ma osi trój-, cztero- i sześciokrotnych, można go rozpoznać po obecności 3 osi dwukrotnych wzajemnie do siebie prostopadłych);
- układ heksagonalny (ma zawsze jedną oś sześciokrotną lub jedną oś trójrotną, wówczas mamy układ trygonalny);
- układ jednoskośny (ma jedną oś dwukrotną lub jedną płaszczyznę symetrii lub obydwie te elementy równocześnie);
- układ trójskośny (nie zawiera żadnych elementów symetrii lub tylko środek symetrii)

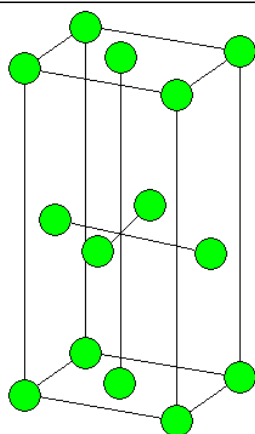
W tabeli 3.1 przedstawiono rodzaje komórek elementarnych sieci przestrzennych odpowiadających odpowiednim układom krystalograficznym.



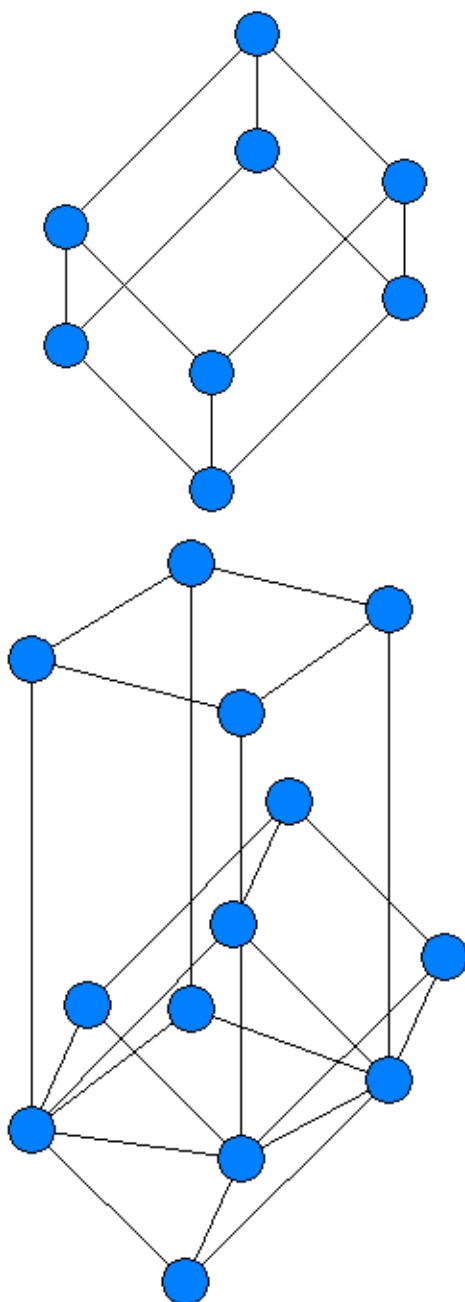


Rys. 3.1. Sieć regularna Bravais'ego (na podstawie Barrow G. 1971)

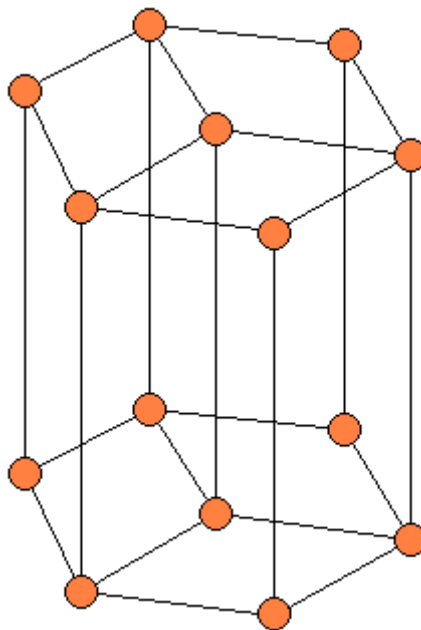




Rys. 3.2. Sieć rombowa Bravais'ego [na podstawie Barrow G. 1971]



3.3. Sieć romboedryczna Bravais'ego [na podstawie Barrow G. 1971]



3.4. Sieć heksagonalna Bravais'ego [na podstawie Barrow G. 1971]

**Tabela 3.1. Komórki elementarne sieci przestrzennych odpowiadających danym układom krystalograficznym [Bielński A. 2007]**

Układ	Kształt komórki elementarnej	Parametry komórki elementarnej	
Regularny	Sześcian	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
Tetragonalny	Prostopadłościan o podstawie kwadratu	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
Heksagonalny	Prostopadłościan o podstawie rombu	$a=b$	$\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$
Rombowy	Prostopadłościan o podstawie prostokątnej	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
Jednoskośny	Równoległościan	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\beta=90^\circ \neq \gamma$
Trójskośny	Równoległościan	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

Kąt  $\alpha$  zawarty jest między krawędziami  $b$  oraz  $c$ ; kąt  $\beta$  warty jest między krawędziami  $a$  oraz  $c$ ; natomiast kąt  $\gamma$  znajduje się pomiędzy krawędziami  $a$  i  $b$ .

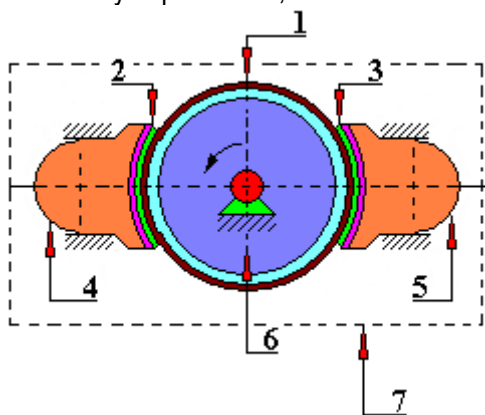
## 4. MASZYNY TARCIOWE

Poniżej przedstawiono budowę, funkcjonowanie i przeznaczenie tribotesterów głównie niekomercyjnych. Tribotestery te można spotkać w wielu ośrodkach badawczych państw powstałych z rozpadu Związku Radzieckiego, Austrii, Polski, głównie uniwersyteckich i politechnicznych.

### 4.1. Automatyczny zespół przeznaczony do badania węzła tarcia wg patentu RU 2165 077

Automatyczny zespół do badań węzła tarcia umożliwia przeprowadzanie badań zarówno w warunkach statycznych jak i dynamicznych. Autorami niniejszej konstrukcji są Buchanczenko S.J., Łarnonow S.A., Puszkarienko A.B. (Tomski Uniwersytet Politechniczny, Tomsk, Rosja). Urządzenie to jest przedstawione w bazie patentowej Federacji Rosyjskiej (Ruspatentu) o numerze: RU 2165 077 C2.

Automatyczny zespół badawczy, przedstawiony na rysunkach 4.1.1÷4.1.5, przeznaczony jest do badania tarcia i zużycia w warunkach zarówno statycznych jak i dynamicznych węzła tarcia typu wałek-kłosek. Umożliwia on badanie zarówno środków smarowych jak również materiałów konstrukcyjnych przeznaczonych do budowy węzłów tarcia. Zawiera on urządzenie do badania próbek (maszynę tarcia) 1, wypełnione badanym środkiem smarowym i wyposażone w mechanizmy do mocowania badanych próbek 10, 11.



Rys. 4.1.1. Komora prób, część mechaniczna, automatycznego zespołu badawczego.

1 – przeciwna próbka, 2 – badana próbka, 3 – badana próbka, 4 – przegubowa podpora, 5 – przegubowa podpora, 6 – wałek, 7 – komora prób [opracowano na podstawie opisu patentowego]

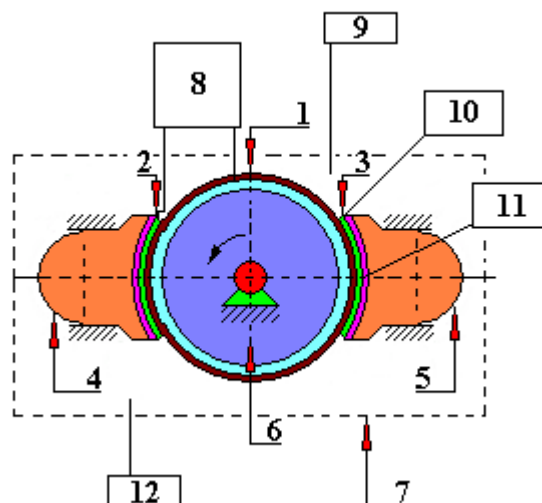
Urządzenie niniejsze jest bardzo zaawansowane technicznie. Posiada m.in. programowalne sterowniki, urządzenia hydrauliczne, kontrolne itp. Głównym celem tak dużego stopnia zaawansowania technicznego tego urządzenia jest podniesienie efektywności i wiarygodności otrzymywanych wyników badań oraz maksymalne zbliżenie warunków testów do warunków rzeczywistych istniejących w eksploatowanych węzłach tarcia maszyn i mechanizmów.

Maszyna tarcia posiada komorę badawczą związaną z systemem cyrkulacji, filtracji i termoregulacji badanego środka smarnego, pozwalająca osiągnąć zadane m.in. następujące parametry:

- ciśnienie w komorze prób,
- stopień oczyszczenia badanego środka smarnego,
- termoregulację parametrów pracy badanego węzła tarcia wg różnych warunków badań.

Urządzenie to dzięki systemowi sterowania i monitorowania zadanych warunków tarcia pozwala zadawać i monitorować siły obciążenia testowanego węzła tarcia.

Napęd ruchu głównego przeciwpróbki przenoszony jest za pomocą programowalnego silnika elektrycznego prądu stałego umożliwiającego przeprowadzanie zmian prędkości z jednoczesną rejestracją momentu tarcia występującego między badanymi parami tarciovymi.



Rys. 4.1.2. Opomiarowanie komory prób automatycznego zespołu badawczego.

1 – przeciwbóbka, 2 – badana próbka, 3 – badana próbka, 4 – przegubowa podpora, 5 – przegubowa podpora, 6 – wałek, 7 – komora prób, 8 – czujnik elektrooporowy, 9 – termopara, 10 – termopara, 11 – termopara, 12 – termopara [opracowano na podstawie opisu patentowego]

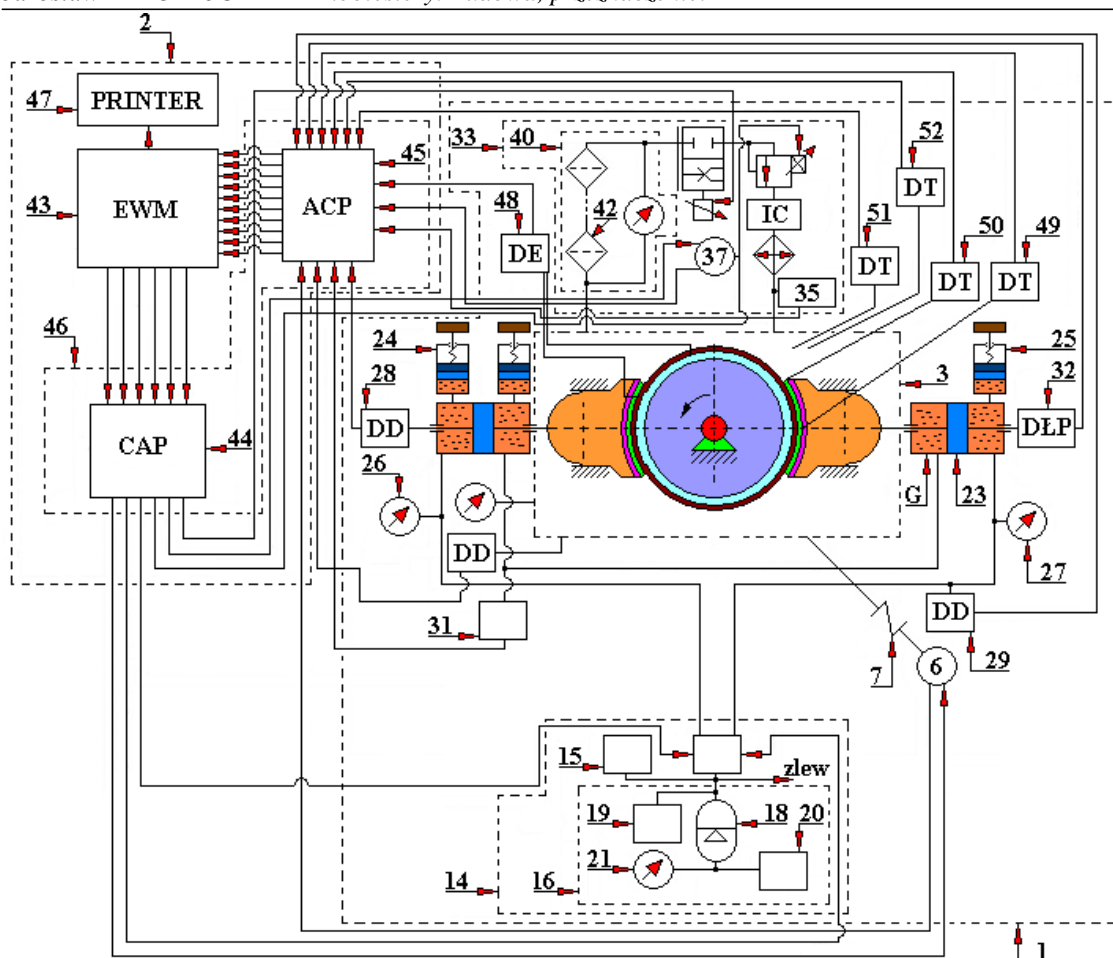
Oprócz komory prób wypełnionej badanym środkiem smarnym oraz badanymi próbkami, ten automatyczny unit badawczy zawiera mechanizmy do mocowania badanych próbek, silnik elektryczny napędu ruchu roboczego, serwohydrauliczne systemy obciążania badanych próbek, które zawierają źródło energii hydraulicznej, elementy sterujące, mechanizmy wykonawcze, czujniki ciśnienia, czujnik sumarycznego liniowego zużycia badanego układu tribologicznego, zespół pomiarowo-sterujący z komputerem jako jednostka centralną.

Komora badawcza zawiera manometr, czujnik ciśnienia dynamicznego, połączony z przekaźnikiem analogowo-cyfrowym mikrokontrolera systemu sterowania, przeciwbóbkę umocowaną na rolce do której są dociśnięte badane próbki – klocki. Klocki te ustawione są przeciwsośnie w sferycznych uchwytach mogących się swobodnie obracać.

W obwodzie sterowania ruchu głównego zamontowano urządzenie rejestrujące moment tarcia występujący w badanym węzle tarcia. Źródłem napędu roboczego jest silnik elektryczny połączony z przekształtnikiem analogowo-cyfrowym mikrokontrolera systemu sterowania.

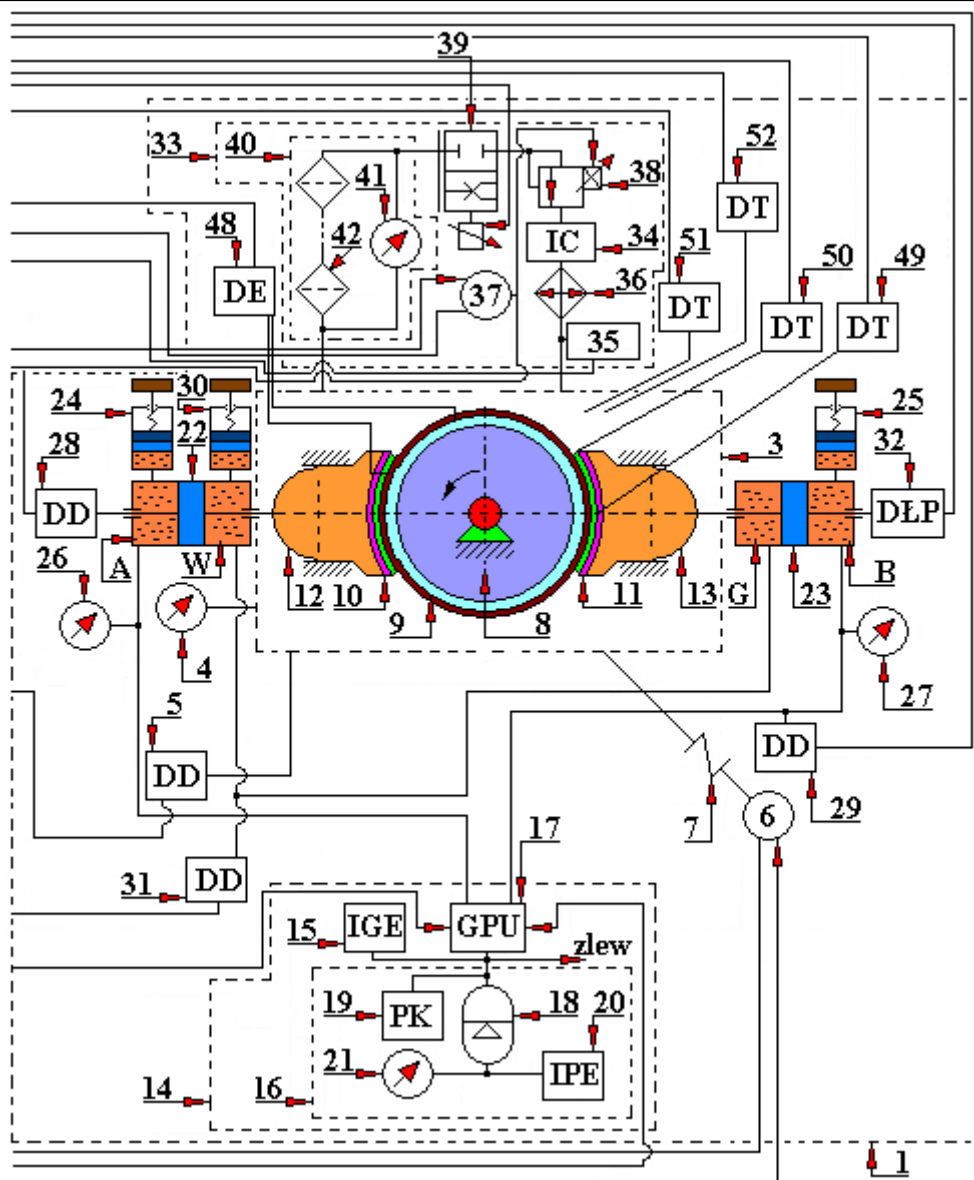
Serwohydrauliczny system sterowania badanych próbek jest dodatkowo wyposażony w blok stabilizacji wielkości źródła ciśnienia. Blok stabilizacji zbudowany jest z pneumohydraulicznego akumulatora połączonego z magistralą ciśnieniową całego unitu badawczego. Zawiera ono manometr oraz urządzenie rejestrujące wartość podawanego ciśnienia.

W obwodzie sterującym systemem obciążania zastosowano programująco-sterującą aparaturę z proporcjonalnym sterowaniem zbudowaną z trzech autonomicznych urządzeń zamontowanych na wspólnym panelu sterującym z możliwością oddzielnego przyłączenia każdego z nich w zależności od warunków obciążania badanych próbek (klocków). Przy włączeniu pierwszego niezależnego urządzenia, przedstawionego za pomocą programowalno-sterującego dławiącego hydraulicznego rozdzielacza ze sterowaniem proporcjonalnym możliwe są dwa warianty jego podłączenia do pracy:



Rys. 4.1.3. Automacyjny zespół przeznaczony do badania węzła tarcia dla warunków statycznych i dynamicznych.

1 – maszyna tarcia, 2 – system sterowania, 3 – komora prób, 4 – manometr, 5 – czujnik ciśnienia dynamicznego (DD), 6 – programowalny silnik napędu, 7 – sprzęgło, 8 – wałek, 9 – przeciwpróbka, 10, 11 – badane próbki (klocki), 12, 13 – przegubowe podpory, 14 – system obciążenia, 15 – źródło energii hydraulicznej (IGE), 16 – blok stabilizujący poziom obciążenia, 17 – programator (GPU), 18 – akumulator pneumatyczny, 19 – hydrauliczny zawór przelewowy, 20 – źródło energii hydraulicznej (IPE), 21 – manometr, 22, 23 – para nurków, 24, 25 – obciążniki ręczne, 26, 27 – manometry, 28, 29 – czujniki dynamicznego obciążenia (DD), 30 – obciążenie ręczne, 31 – czujnik dynamicznego obciążenia (DD), 32 – fotoelektryczny czujnik liniowego przemieszczenia (DŁP), 33 – system cyrkulacji, filtracji i termoregulacji środka smarnego, 34 – środek smarny, a w nim umieszczony czujnik cyrkulacji (IC), 35 – przyrząd kontroli czystości cieczy (PKCzRz), 36 – chłodnica, 37 – programowalny silnik prądu stałego, 38 – programator sterujący, 39 – zawór sterujący wraz ze sterującą grzałką ciepła, 40 – blok filtrów, 41 – manometr różnicowy, 42 – filtry magistrali, 43 – komputer (EWM), 44 – przetwornik cyfrowo-analogowy (CAP), 45 – przetwornik analogowo-cyfrowy (ACP), 46 – mikrokontroler, 47 – drukarka, 48 – czujnik elektrooporu (DE), 49, 50, 51, 52 – czujniki temperatury (DT) [opracowano na podstawie opisu patentowego]



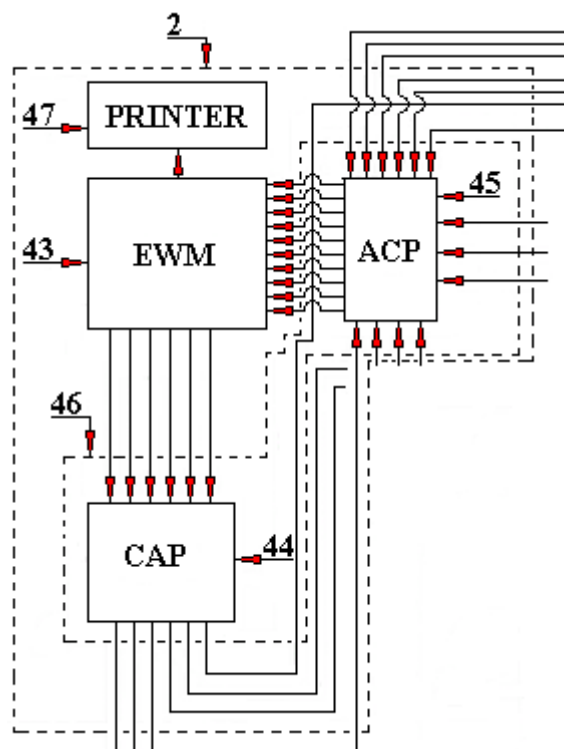
Rys. 4.1.4. Automatyczny zespół badawczy, maszyna tarciowa (część zasadnicza).

1 – maszyna tarciowa, 3 – komora prób, 4 – manometr, 5 – czujnik ciśnienia dynamicznego (DD), 6 – programowalny silnik napędu, 7 – sprzęgło, 8 – wałek, 9 – przeciwpróbka, 10, 11 – badane próbki (klocki), 12, 13 – przegubowe podpory, 14 – system obciążenia, 15 – źródło energii hydraulicznej (IGE), 16 – blok stabilizujący poziom obciążenia, 17 – programator (GPU), 18 – akumulator pneumatyczny, 19 – hydrauliczny zawór przelewowy, 20 – źródło energii hydraulicznej (IPE), 21 – manometr, 22, 23 – para numików, 24, 25 – obciążniki ręczne, 26, 27 – manometry, 28, 29 – czujniki dynamicznego obciążenia (DD), 30 – obciążenie ręczne, 31 – czujnik dynamicznego obciążenia (DD), 32 – fotoelektryczny czujnik liniowego przemieszczenia (DŁP), 33 – system cyrkulacji, filtracji i termoregulacji środka smarnego, 34 – środek smarny, a w nim umieszczony czujnik cyrkulacji (IC), 35 – przyrząd kontroli czystości cieczy (PKCzRz), 36 – chłodnica, 37 – programowalny silnik prądu stałego, 38 – programator sterujący, 39 – zawór sterujący wraz ze sterującą grzałką ciepła, 40 – blok filtrów, 41 – manometr różnicowy, 42 – filtry magistrali, 48 – czujnik elektrooporu (DE), 49, 50, 51, 52 – czujniki temperatury (DT) [opracowano na podstawie opisu patentowego]

a) pierwszy wariant – jeden z jego sterujących kanałów został połączony z dwoma kanałami ciśnieniowymi obciążenia nurnikowych par dwustronnego działania, natomiast drugi jego kanał sterujący połączono ze spustem.

b) drugi wariant – jego sterujące kanały zostały połączone z odpowiednimi kanałami ciśnieniowymi każdej z nurnikowych par dwustronnego działania.





Rys. 4.1.5. Układ systemu sterowania i jego porty wejścia/wyjścia automatycznego zespołu badawczego węzła tarcia.

2 – system sterowania, 43 – komputer (EWM) 44 – przetwornik cyfrowo-analogowy (CAP), 45 – przetwornik analogowo-cyfrowy (ACP), 46 – mikrokontroler, 47 – drukarka [opracowano na podstawie opisu patentowego]

Przy włączeniu drugiego niezależnego urządzenia, zbudowanego z dwóch programowalno-sterujących hydraulicznych zaworów bezpieczeństwa ze sterowaniem proporcjonalnym, kanał sterujący każdego z zaworów połączono z odpowiednim kanałem ciśnieniowym tylko jednej z nurnikowych par dwustronnego działania.

Przy włączeniu trzeciego niezależnego urządzenia, zbudowanego z dwóch programowalno-sterujących przepustnic, kanał sterujący każdej z przepustnic połączono z odpowiednimi kanałami ciśnieniowymi jednej z nurnikowych par dwustronnego działania.

Programowalno-sterująca aparatura hydrauliczna połączona jest ze źródłem energii hydraulicznej, blokiem jej stabilizacji oraz z przekształtnikiem cyfrowo-analogowym mikrokontrolera systemu sterowania. Aparatura ta umożliwia zadawanie równocześnie identycznych lub różnych obciążeń badanych próbek/klocków.

Mechanizmami wykonawczymi są dwie przeciwsobnie zamontowane pary nurnikowe dwustronnego działania. Zadawane do nich ciśnienie może być ustalane za pomocą programu lub ręcznie za pomocą dwóch regulatorów ręcznych. Nurniki te posiadają dwa manometry, dwa czujniki ciśnienia dynamicznego połączone z portami analogowo-cyfrowego przetwornika mikrokontrolera systemu sterowania.

Na powierzchni czołowej jednej z nurnikowych par zamontowano końcówkę fotoelektrycznego czujnika liniowego przemieszczenia połączonego z portami analogowo-cyfrowego mikrokontrolera systemu sterowania.

Generalnie można powiedzieć, że automatyczny zespół do badań tribologicznych jest zbudowany z dwóch podstawowych układów: maszyny tarciowej 1 oraz systemu sterowania 2 (rys. 4.1.3). Maszyna tarciowa 1 zawiera w sobie ślizgową komorę badawczą 3, zamontowaną na łożyskowanym zespole (nie pokazanym na rysunkach), w której zamontowano manometr 4 z czujnikiem dynamicznego ciśnienia (DD) 5. Do zespołu komory badawczej 3 należy

programowalno-sterujący silnik elektryczny prądu stałego 6 sterujący ruchem głównym (częstotliwość jego obrotów zawiera się w przedziale od 0 do 6000 obr/min przy wartości momentu obrotowego od 0,5 Nm do 2 Nm). Na końcu wału silnika 6 zamontowano za pomocą sztywnej mufy 7 na napinających stożkowych pierścieniach (nie pokazanych na rysunku) wałek 8 i przeciwpróbkę 9. Przeciwpróbka 9 współpracuje z badanymi próbkami/klockami 10 i 11, umocowanymi przeciwsobnie w samonastawnych kulowych podporach 12 i 13.

System obciążenia 14 (rys. 4.1.3) węzła tribologicznego zbudowany jest ze źródła hydraulicznej energii (IGE) 15, ciśnieniowej magistrali, którą połączono z blokiem stabilizacji 16 poziomu zasilania (wlewu zasilającego) ciśnienia oraz z programowalno-sterującą aparaturą hydrauliczną ze sterowaniem proporcjonalnym (GPU) 17. Programująco-sterująca aparatura ze sterowaniem proporcjonalnym 17 zbudowana jest z trzech niezależnych urządzeń:

- z programowo-sterującej przepustnicy hydraulicznego rozdzielacza z proporcjonalnym sterowaniem 17 (rys. 4.1.6 i rys. 4.1.7);
- dwóch programowo-sterujących hydraulicznych zaworów bezpieczeństwa 17 (rys. 4.1.8);
- oraz dwóch programowo-sterujących hydraulicznych przepustnic ze sterowaniem proporcjonalnym 17 (rys. 4.1.9), zamontowanych na jednym panelu (nie pokazanym na rysunku).

Zastosowanie tych wysokojakościowych niezależnych urządzeń rozszerza wachlarz możliwości wariantów zadawanego programowo obciążenia badanych próbek/klocków 10 i 11. Blok stabilizacji 16 poziomu źródła ciśnienia posiada pneumohydroakumulator 18 (rys. 4.1.3), hydrauliczna wnęka którego połączona jest z ciśnieniową magistralą źródła hydraulicznej energii 15 i z hydraulicznym zaworem przelewowym (PK) 19. Natomiast jego pneumatyczną wnękę połączono z ciśnieniową magistralą źródła hydraulicznej energii (IPE) 20 oraz z manometrem 21.

Wnęki ciśnieniowe A i B nurnikowych par 22 i 23 przeznaczone są do doprowadzenia ciśnienia obciążenia i połączone z ręcznymi obciążeniami 24 i 25, manometrami 26, 27 i czujnikami dynamicznego ciśnienia (DD) 28 i 29. Natomiast we wnękach W i G zamontowano pomiarowe powierzchnie sumowego liniowego zużycia badanego węzła tarcia. Powierzchnie (wnęki) W i G nurnikowych par 22 i 23 połączono ze sobą i wypełniono płynem roboczym (środkiem smarowym) z wcześniej określonymi jego parametrami fizyko-chemicznymi. Od jakości badanego środka smarowego zależy w pewnym stopniu czułość urządzenia pomiarowego do pomiaru sumowego liniowego zużycia badanych próbek. Wnęki W i G są połączone z ręcznym obciążeniem 30 oraz z czujnikiem dynamicznego ciśnienia (DD) 31.

Na powierzchni czołowej pary nurnikowej 23 końcówką pomiarową opiera się fotoelektryczny czujnik liniowego przemieszczenia (DŁP) 32. Sterujące kanały programowo-sterującej hydroaparatury z proporcjonalnym sterowaniem 17 połączono z wnękami obciążenia A i B nurnikowych par 22 i 23 dwustronnego działania.

System cyrkulacji, filtracji i termoregulacji środka smarnego 33 zawiera źródło cyrkulacji (IC) badanego środka smarnego 34, w części ssącej magistrali której zamontowano przyrząd kontroli czystości cieczy (PKCZŻ) 35 i radiator 36, chłodzący przy pomocy programowalno-sterującego silnika elektrycznego prądu stałego 37 (prędkość obrotowa od 0 do 1000 obr/min i momencie obrotowym od 0 do 2 Nm), umocowany na wymaganej (żądaney) odległości od niego, w zależności od zadanej programowo temperatury badanego środka smarnego i połączony ze spustem komory badawczej 3.

Część tłoczną magistrali źródła cyrkulacji badanego środka smarnego 34 połączono z hydraulicznym sterującym zaworem bezpieczeństwa 38, na wyjściu którego zamontowano hydrauliczną przepustnicę grzania badanego środka smarnego 39 oraz blok filtracji 40.

Blok filtracji 40 zawiera różnicowy manometr 41, którego jedna końcówka pomiarowa podłączona jest do linii (magistrali) hydraulicznej na jej wejściu do bloku filtracji (na tłoczeniu) 40, natomiast druga – na wyjściu z tego bloku filtracji oraz szeregowo zamontowane magistralne filtry 42. Filtry te mają różną granulację, czyli charakteryzują się różnym stopniem oczyszczania

badanej cieczy smarowej. Ich ilość może być dobrana w zależności od ich charakterystyk oraz żądanego stopnia oczyszczenia i ciśnienia badanego środka smarnego podawanego źródłem cyrkulacji 34.

System sterowania 2 zawiera komputer (EWM) 43, połączony swoimi portami wejścia/wyjścia z cyfrowo-analogowym przekształtnikiem (CAP) 44 oraz z analogowo-cyfrowym przekształtnikiem (ACP) 45, które wchodzi w zestaw mikrokontrolera 46. Porty wejścia/wyjścia komputera 43 połączono także z drukarką 47.

Wyjścia cyfrowo-analogowego przekształtnika 44 połączono z :

- wejściami programowalno-sterującego silnika elektrycznego prądu stałego 6 napędu ruchu głównego;
- wejściami programowalno-sterującej hydroaparatury ze sterowaniem proporcjonalnym 17;
- wejściem programowalno-sterującego silnika elektrycznego prądu stałego 37;
- wejściem programowalno-sterującego hydraulicznego zaworu bezpieczeństwa ze sterowaniem proporcjonalnym 38;
- wejściem programowalno-sterującej hydraulicznej przepustnicy ze sterowaniem proporcjonalnym 39.

Natomiast wejścia analogowo-cyfrowego przekształtnika 45 połączono z:

- wyjściami czujników ciśnienia dynamicznego (DD) 5, 28, 29 oraz 31;
- wyjściem programowalno-sterującego silnika prądu stałego 6;
- wyjściem czujnika liniowego przemieszczenia (DŁP) 32;
- wyjściem programowalno-sterującego silnika prądu stałego 37;
- wyjściem przyrządu kontroli czystości cieczy (PKCzŻ) 35;
- wyjściem czujnika oporu elektrycznego (rezystora o zmiennej rezystancji) (DE) 48;
- wyjściami czujników temperatury (DT) 49, 50, 51 oraz 52.

Czujnik oporu elektrycznego (DE) 48 jest zamontowany w ten sposób, że jedna z jego końcówek pomiarowych połączona jest z badaną próbką (klockiem) 10, natomiast druga jego końcówka pomiarowa połączona jest z powierzchnią przeciwpróbki 9.

Pomiarową końcówkę czujnika temperatury (DT) 49 umiejscowiono w centrum (środku) badanej próbki (klocka) 11.

Pomiarową końcówkę czujnika temperatury (DT) 50 przymocowano do przeciwpróbki 9 bezpośrednio na wyjściu ze strefy tarcia.

Czujniki temperatury 51 oraz 52 umiejscowiono w żądanej odległości od strefy tarcia naprzeciwko siebie.

Ponad to urządzenie to może być wyposażone opcjonalnie w czujniki hydraulicznej energii (IGE) 15, czujniki cyrkulacji badanego środka smarnego (IC) 34, pompy lub centrale pomp, czujniki pneumatycznej energii (IPE) 20, pompy pneumatyczne (sprężarki) lub centrale tych pomp, filtry magistralne 42 dowolnej konstrukcji (siatkowe, magnetyczne, szelitowi, zalewowe i inne).

Automatyczny unit (zespół) do badań tribologicznych pracuje w następujący sposób:

1. Przed rozpoczęciem badania na wychodzącej końcówce wału napędowego nasadzamy rolkę (tarczę) 8, na której zamocowano przeciwpróbkę 9, natomiast badane próbki/klocki 10 i 11 zamocowane są w samonastawnych uchwytach kulowych 12 i 13.
2. Po zamontowaniu przeciwpróbki 9 oraz próbek 10 i 11 przeprowadza się hermetyzację komory badawczej 3 (jej uszczelnianie). Proces hermetyzacji podlega walidacji (generowany jest raport z jego przeprowadzania). Jeżeli raport będzie miał wynik negatywny, komputer nie pozwoli na dalsze kroki.
3. Następnie w systemie sterowania 2 za pośrednictwem komputera (EWM) 43 formułuje się (określa się) warunki początkowe i graniczne przeprowadzania badania wg m. in.

- stopnia filtracji badanego środka smarnego, ciśnienia w węzłach systemu obciążenia, charakteru badań (statyczne/dynamiczne warunki testu), wartości temperatur badanego środka smarnego, prędkości obrotowej przeciwpróbki itp.
4. Przed rozruchem urządzenia następuje kontrola wszystkich urządzeń – komputer „odpytuje” wszystkie podległe mu urządzenia. W przypadku negatywnego wyniku testu rozruch urządzenia nie nastąpi. Nad procesem kontroli sprawności wszystkich urządzeń czuwa generalnie system sterowania 2 za pośrednictwem komputera (EWM) 43, który z kolei za pośrednictwem cyfrowo-analogowego przekształtnika 44 podaje napięcie zasilania do wszystkich kontrolnych przyrządów. Sygnały zwrotne z tych przyrządów są przekształcane, wzmacniane i kierowane do komputera (EWM) 43 za pośrednictwem analogowo-cyfrowego przekształtnika 45. Wszystkie informacje o przebiegu eksperymentu odwzorowane są w postaci tablic i wykresów graficznych zarówno na pulpicie monitora komputera (EWM) 43 jak również na wydruku przedstawionego za pomocą drukarki 47.
  5. Po określeniu warunków pracy następuje rozruch urządzenia. Jako pierwszy zostaje włączony system cyrkulacji, filtracji i termoregulacji 33 badanego środka smarnego, w rezultacie czego środek smarny źródłem cyrkulacji (IC) 34 podawany jest pod stałym ciśnieniem do programowalno-sterującego hydraulicznego zaworu bezpieczeństwa 38, który zmienia jego ciśnienie wg zadanego programu i podaje środek smarowy do hydraulicznej przepustnicy 39. Z przepustnicy dalej środek smarowy jest podawany do bloku filtracji 40, w którym ulega on oczyszczaniu do żądanego stopnia czystości w magistralnych filtrach 42, zanieczyszczenie których określamy na podstawie wskazań manometru różnicowego 41. W ten sposób do komory badawczej 3 podawany jest podgrzany i oczyszczony badany środek smarny, który wychodząc z niej kierowany jest do chłodnicy 36 schładzanej programowalno-sterującym silnikiem elektrycznym prądu stałego 37 do zadanej temperatury. Wielkość ciśnienia w komorze badawczej 3 dla statycznych warunków badań określa manometr 4. Natomiast wartość ciśnienia w komorze badawczej 3 dla zmiennych/programowalnych warunków badań określa czujnik dynamicznego ciśnienia (DD) 5. Stopień i intensywność zużycia badanych części/próbek określa przyrząd kontroli czystości cieczy (PKCzŻ) 35.
  6. Gdy temperatura środka smarnego osiągnie zadaną programowo wartość, następuje uruchomienie programowalno-sterującego silnika elektrycznego prądu stałego 6 napędu ruchu głównego (roboczego), który przekazuje ruch obrotowy przeciwpróbce poprzez sztywną mufę 7 i system obciążenia 14 na bieżący jałowy.
  7. Gdy wszystkie wcześniejsze kroki niniejszego algorytmu przebiegły poprawnie wówczas następuje rozpoczęcie eksperymentu.

Obciążenie badanego węzła tarcia przebiegać może w dwóch odmianach: statycznie lub dynamicznie.

Statyczne obciążenie badanych próbek/klocków 10 i 11 osiąga się łącząc jednakowe lub różne ciśnienia do wnek powierzchni obciążających A i B za pomocą manualnie ustawianych regulatorów obciążenia 24 lub 25. O wielkości ustawionych wartości regulatorów obciążenia dowiadujemy się na podstawie wartości wskazań manometrów 26 i 27.

Dynamiczne warunki obciążenia osiąga się za pomocą systemu obciążenia 14, który pracuje w następujący sposób. Źródło hydraulicznej energii (IGE) 15 wytwarza ciśnienie cieczy roboczej, które jest stabilizowane za pomocą bloku stabilizacji 16 poziomu zasilającego ciśnienia i przekazywane do programowalno-sterującej aparatury hydraulicznej ze sterowaniem proporcjonalnym 17, osiągającego programowo sformułowane warunki obciążenia badanego węzła tarcia we wnekach obciążenia A i B nurnikowych par 22 i 23.

W skład aparatury hydraulicznej wchodzi m.in. trzy niezależne urządzenia:

- programowo-sterująca przepustnica hydraulicznego rozdzielacza ze sterowaniem proporcjonalnym;
- dwa programowalno-sterujące hydrauliczne zawory bezpieczeństwa ze sterowaniem proporcjonalnym;
- dwie programowalno-sterujące przepustnice ze sterowaniem proporcjonalnym.

Uruchomienie każdego z tych urządzeń lub ich kombinacji umożliwi otrzymanie innego charakteru pracy węzła tarcia, a tym samym inny przebieg eksperymentu.

Przy włączeniu do pracy pierwszego niezależnego urządzenia, a mianowicie programowalno-sterującej przepustnicy hydraulicznego rozdzielacza z proporcjonalnym sterowaniem, gdy jeden z jego sterujących kanałów połączono równocześnie z dwoma wnękami obciążenia A i B nurnikowych par dwustronnego działania 22 i 23, natomiast drugi sterujący kanał połączono ze spustem (zlewem) (rys. 4.1.6), otrzymujemy wówczas naprzemienne obciążenie badanych próbek/klocków 10 i 11 zarówno dla jednakowych jak i dla różnych warunków obciążenia. Natomiast gdy każdy z jego sterujących kanałów połączymy z odpowiednimi wnękami obciążenia A i B jednego z nurnikowych par dwustronnego działania 22 i 23 (rys. 4.1.7), otrzymujemy wówczas równoczesne obciążenie badanych próbek/klocków 10 i 11 dla jednakowych warunków obciążenia.

Przy włączeniu drugiego niezależnego urządzenia, a mianowicie dwóch programowalno-sterujących hydraulicznych zaworów bezpieczeństwa ze sterowaniem proporcjonalnym, gdy sterujący kanał każdego z zaworów połączymy z odpowiednią wnęką A lub B jednego z nurnikowych par dwustronnego działania 22 i 23 (rys. 4.1.8), wówczas otrzymujemy równoczesne obciążenie badanych próbek/klocków 10 i 11 zarówno dla jednakowych jak i dla różnych warunków obciążenia.

Przy włączeniu trzeciego niezależnego urządzenia, a mianowicie dwóch programowalno-sterujących przepustnic z proporcjonalnym sterowaniem, gdy sterujący kanał każdej z przepustnic połączymy z odpowiednią wnęką A lub B jednej z nurnikowych par dwustronnego działania 22 i 23 (rys. 4.1.9), osiąga się równoczesne obciążenie badanych próbek/klocków 10 i 11 zarówno dla jednakowych jak i różnych warunków zadanego obciążenia.

Blok stabilizacji 16 wyrównuje poziom ciśnienia zasilającego programowalno-sterującą hydroaparaturę ze sterowaniem proporcjonalnym 17 przy pomocy pneumohydraulicznego akumulatora 18 podłączonego do pneumatycznej wnęki, której ciśnienie podawane jest za pomocą źródła pneumatycznej energii (IPE) 20 i rejestrowanego za pomocą manometru 21.

W celu pomiaru sumowego liniowego zużycia badanego węzła tarcia wykorzystuje się wnęki (powierzchnie) W i G nurnikowych par 22 i 23, uprzednio wypełnione środkiem roboczym pod początkowym ciśnieniem, zależnym od wielkości przewidywanego sumowego liniowego zużycia węzła tarcia i ustawionym manualnie obciążeniem na regulatorze ręcznym 30, które jest rejestrowane przy pomocy czujnika dynamicznego ciśnienia 31. Natomiast bezpośrednio do pomiaru sumowego liniowego zużycia przeciwpróbki 9 i badanej próbki/klocka 11 używa się czujnika liniowego przemieszczenia (DŁP) 32.

W czasie przebiegu eksperymentu na automatycznym zespole przeznaczonym do badania węzła tarcia nieprzerwanie rejestrowana jest temperatura:

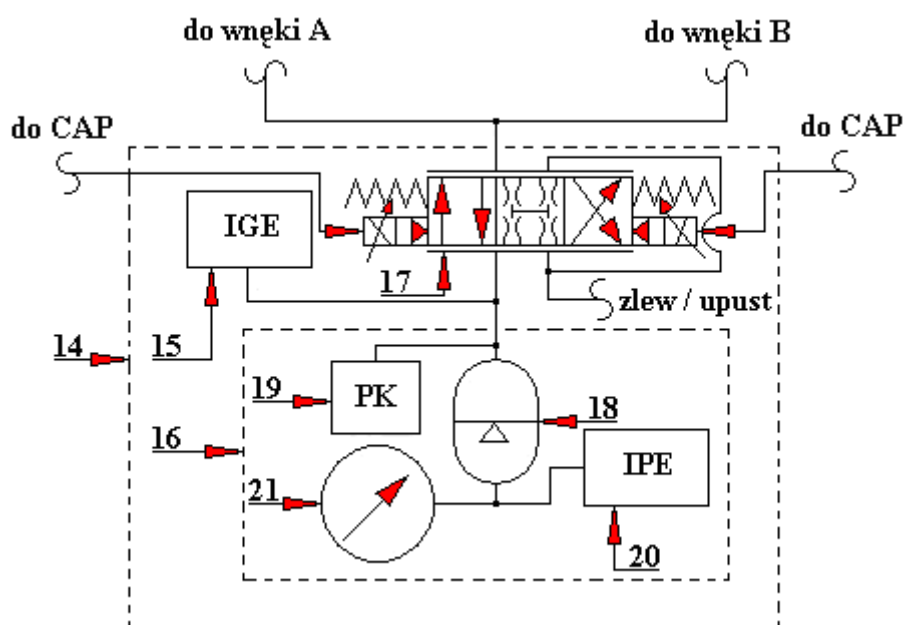
- w strefie tarcia – czujnikiem temperatury (DT) 49;
- bezpośrednio na wyjściu ze strefy tarcia – czujnikiem temperatury 50

na podstawie różnicy których możemy określić wielkość i prędkość zmian temperatury w strefie tarcia. Oprócz tego rejestrowane jest pole temperaturowe wokół strefy tarcia czujnikami temperatury 51 i 52. Wg wartości temperatury czujnika 52 system sterowania 2 włącza/wyłącza chłodzenie lub nagrzewanie badanego środka smarnego podając odpowiedni sygnał albo do hydraulicznej przepustnicy ze sterowaniem proporcjonalnym 39, albo do silnika elektrycznego prądu stałego 37.

Opór elektryczny w strefie tarcia pomiędzy przeciwpróbką 9, a badaną próbką/klockiem 10 rejestrowany jest za pomocą czujnika oporu elektrycznego (DE) 48.

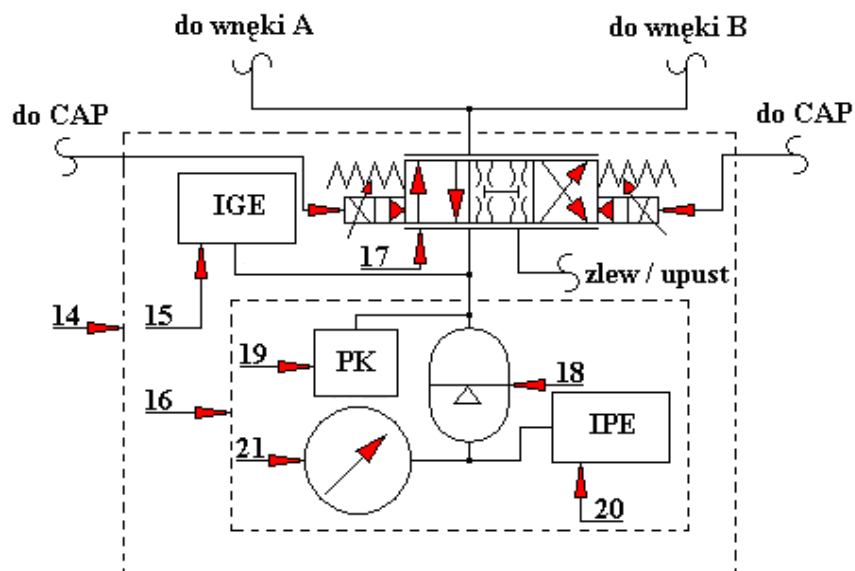
Po zakończeniu badania system sterowania 2 przekazuje sygnał sterujący na odłączenie wszystkich sterowników i źródeł prądu przyrządów kontrolnych, po którym to sygnale następuje faza mycia i zmiana rodzaju badanego środka smarnego, a także badanej przeciwpróbki 9 i próbek/klocków 10 i 11, formułowanie nowych początkowych i granicznych warunków badania i proces się powtarza.

Zastosowanie w niniejszym rozwiązaniu konstrukcyjnym automatycznego zespołu tribologicznego programowalno-sterującego silnika elektrycznego prądu stałego 6 napędu ruchu głównego, aparatury hydraulicznej ze sterowaniem proporcjonalnym 17, silnika elektrycznego prądu stałego 37, hydraulicznego zaworu bezpieczeństwa ze sterowaniem proporcjonalnym 38, hydraulicznej przepustnicy również ze sterowaniem proporcjonalnym 39, bloku filtracji 40 badanego środka smarnego pozwala maksymalnie przybliżyć warunki badań do rzeczywistych warunków panujących w węzłach tarcia maszyn i mechanizmów z możliwością maksymalnego skrócenia czasu przeprowadzania badań i zmniejszenia ich pracochłonności do minimum.



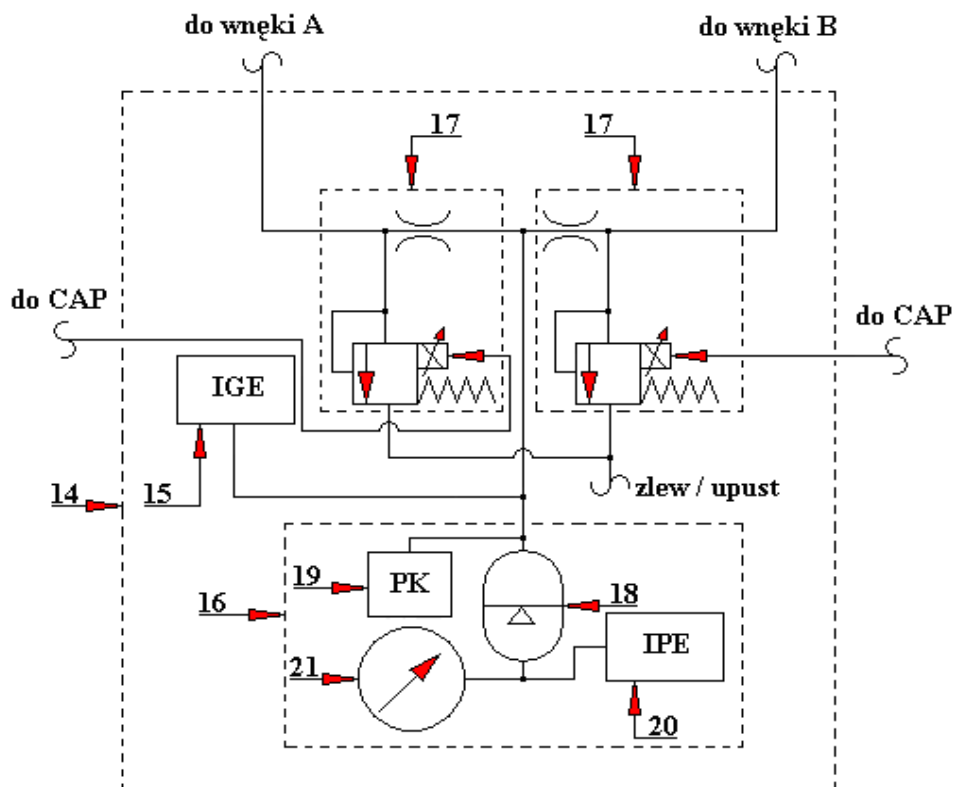
Rys. 4.1.6. Układ programowo-sterującej przepustnicy hydraulicznego rozdzielacza ze sterowaniem proporcjonalnym (pierwsze niezależne urządzenie aparatury hydraulicznej). Połączenia zarówno dla jednakowych jak i dla różnych warunków obciążenia.

14 – system obciążenia, 15 – źródło energii hydraulicznej (IGE), 16 – blok stabilizacji poziomu obciążenia, 17 – programator (GPU), 18 – akumulator pneumatyczny, 19 – hydrauliczny zawór przelewowy (PK), 20 – źródło energii hydraulicznej, 21 – manometr, CAP (44) – przetwornik cyfrowo-analogowy [opracowano na podstawie opisu patentowego]



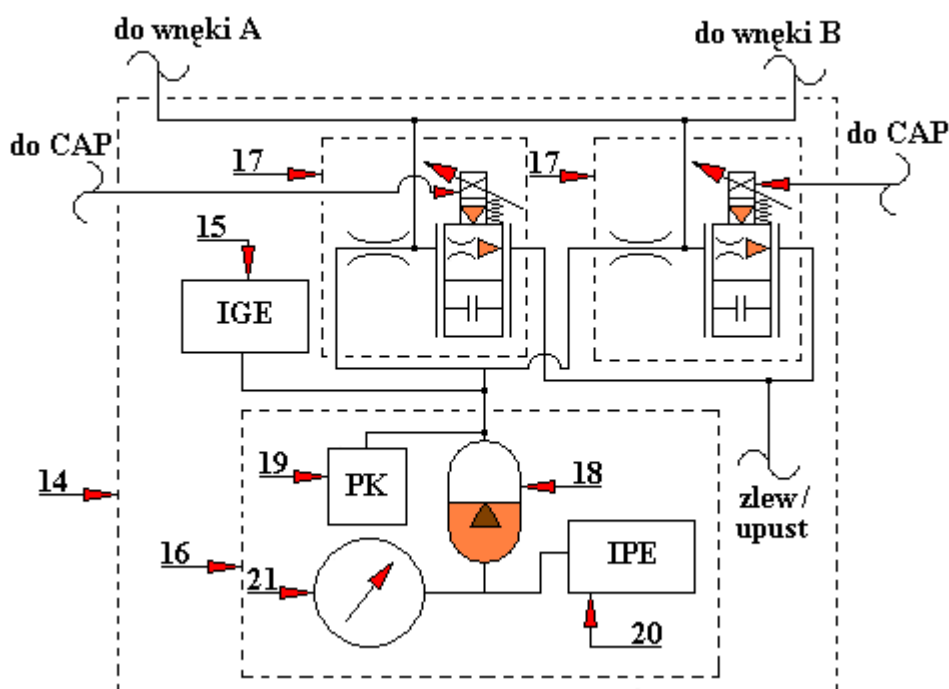
Rys. 4.1.7. Układ programowo-sterującej przepustnicy hydraulicznego rozdzielacza ze sterowaniem proporcjonalnym (pierwsze niezależne urządzenie aparatury hydraulicznej). Połączenie dla jednakowych warunków obciążenia.

14 – system obciążenia, 15 – źródło energii hydraulicznej (IGE), 16 – blok stabilizacji poziomu obciążenia, 17 – programator (GPU), 18 – akumulator pneumatyczny, 19 – hydrauliczny zawór przelewowy (PK), 20 – źródło energii hydraulicznej, 21 – manometr, CAP (44) – przetwornik cyfrowo-analogowy [opracowano na podstawie opisu patentowego]



Rys. 4.1.8. Układ dwóch programowalno-sterujących hydraulicznych zaworów bezpieczeństwa ze sterowaniem proporcjonalnym (drugie niezależne urządzenie aparatury hydraulicznej)

14 – system obciążenia, 15 – źródło energii hydraulicznej (IGE), 16 – blok stabilizacji poziomu obciążenia, 17 – programator (GPU), 18 – akumulator pneumatyczny, 19 – hydrauliczny zawór przelewowy (PK), 20 – źródło energii hydraulicznej, 21 – manometr, CAP (44) – przetwornik cyfrowo-analogowy [opracowano na podstawie opisu patentowego]



Rys. 4.1.9. Układ dwóch programowalno-sterujących przepustnic ze sterowaniem proporcjonalnym (trzecie niezależne urządzenie aparatury hydraulicznej)

14 – system obciążenia, 15 – źródło energii hydraulicznej (IGE), 16 – blok stabilizacji poziomu obciążenia, 17 – programator (GPU), 18 – akumulator pneumatyczny, 19 – hydrauliczny zawór przelewowy (PK), 20 – źródło energii hydraulicznej, 21 – manometr, CAP (44) – przetwornik cyfrowo-analogowy [opracowano na podstawie opisu patentowego]

## 4.2. Komora badawcza maszyny tarciowej z węzłem tarcia typu pierścień-kłócek wg patentu RU 2163 013 C2

Komora badawcza przedstawionej poniżej na rys. 4.2.1 oraz 4.2.2. maszyny tarciowej przeznaczona jest do badania płynnych środków smarowych oraz do kontroli i rejestracji sumowego/całkowitego liniowego zużycia badanego skojarzenia tarciowego bez jego demontażu. Autorami niniejszej konstrukcji są Buchanczenko S.J., Łarnonow S.A., Puszkarienko A.B. (Tomski Uniwersytet Politechniczny, Tomsk, Rosja). Urządzenie to jest przedstawione w bazie patentowej Federacji Rosyjskiej (Ruspatentu) o numerze: RU 2163 013 C2.

Komora badawcza maszyny tarciowej posiada pionową budowę i umocowana jest na łożyskowanym węźle 1, na którym ustawiony jest jej korpus 2, zawierający w sobie blok obciążenia 3. Zewnętrzna powierzchnia łożyskowanego węzła 1 została zrealizowana za pomocą stożkowo-gwintowanej powierzchni, która współpracuje z wewnętrzną stożkowo-gwintowaną powierzchnią łącznika. W uchwytach (nie pokazanych na rysunkach) łożyskowanego węzła 1 umieszczono wał napędowy 4, którego wejściowy koniec połączono z silnikiem elektrycznym 5 napędu ruchu głównego za pomocą sztywnej mufy 6 na napinających stożkowych pierścieniach (nie pokazanych na rysunkach). Natomiast na drugim końcu tego wału napędowego 4, jego wyjściowym końcu osadzony jest stożkowo wałek 7. Do wałka 7 zamocowano za pomocą nakrętki 8 i podkładki sprężystej 9 przeciwpróbkę 10.

Łożyskowany węzeł 1, korpus 2 i silnik elektryczny 5 zamocowano sztywno na ramie 11 maszyny tarciowej. W bloku obciążenia 3 zamocowano dwa duże nurniki 12 i 13 oraz dwa małe nurniki 14 i 15, każdy dwustronnego działania i sztywno skręcono nakrętkami 16 i 17. Duże nurniki 12 i 13 opierają się na małych nurnikach 14 i 15, na których końcach zamocowane są samonastawne kulowe uchwyty 18 i 19 (rys. 4.2.2) umożliwiające swobodne obracanie się



w przyrządach 20 i 21 badanych próbek/klocków 24 i 25. Badane próbki/klocki 24 i 25 zamocowane są w samonastawnych kulowych uchwytach 18 i 19 za pomocą walcowych kołków 22 i 23.

W nakrętce 16 ustawiono oporowy króciec 26, natomiast w nakrętce 17 – czujnik ciśnienia 27. Czołowe powierzchnie A i B połączono między sobą za pomocą sztywnego przewodu rurowego 28 oraz z manualnymi regulatorami obciążenia 29 i 30.

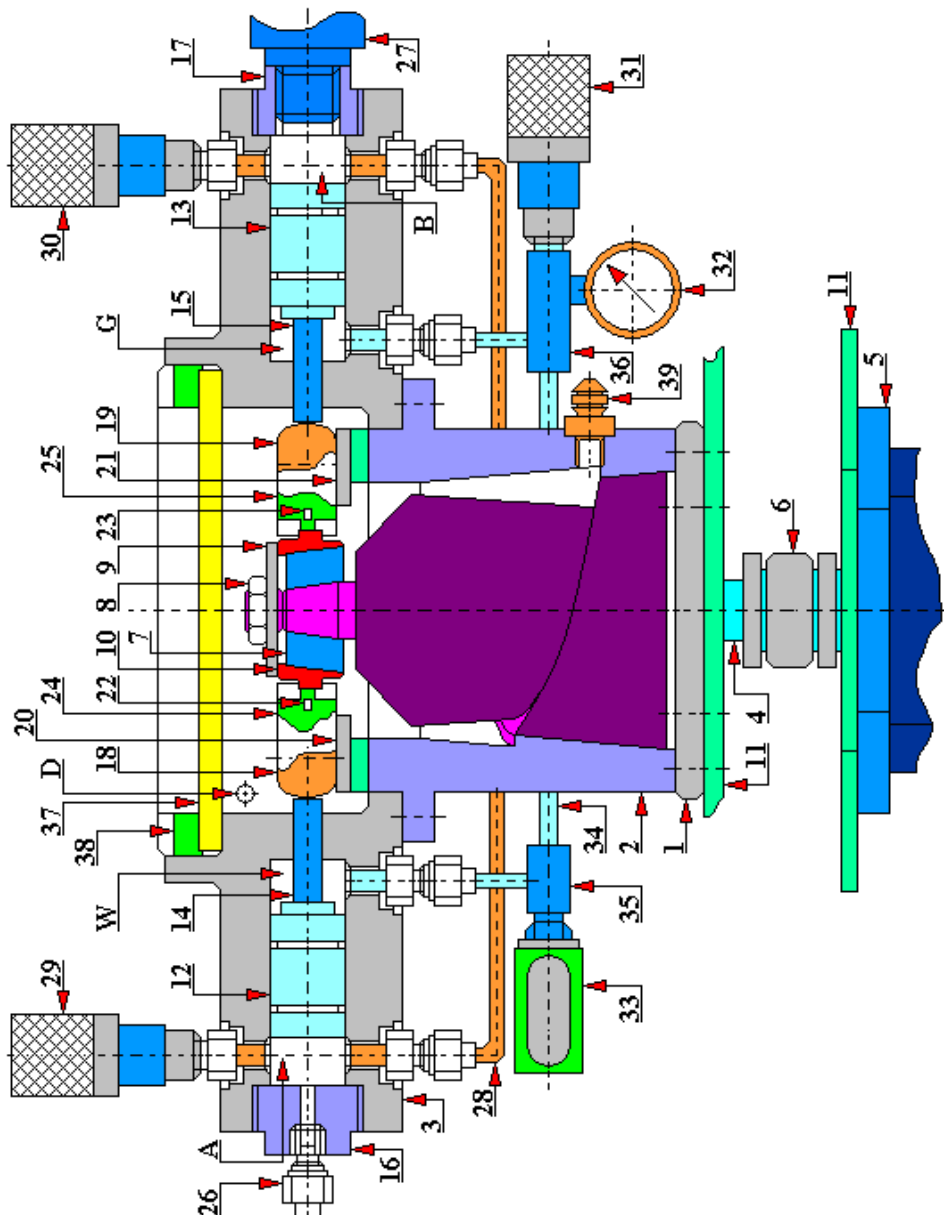
W bloku obciążenia zamontowano system rejestracji sumowego (całkowitego) liniowego zużycia badanego skojarzenia ciernego. W jego skład wchodzi m.in. międzynurnikowe powierzchnie W i G (wchodzące do bloku obciążenia 3 zbudowanego z odpowiedniego połączenia dużych i małych nurników: 12 z 14 i 13 z 15 oraz połączonymi z manualnym regulatorem wyjściowego nadmiarowego ciśnienia 31, manometrem 32 i czujnikiem dynamicznego ciśnienia 33 przy pomocy sztywnego rurowego elementu 34 oraz króćców przyłączeniowych 35 i 36).

W zewnętrznej części bloku obciążenia 3 zamontowano przezroczystą pokrywę 37 za pomocą nakrętki 38.

W celu podawania badanego środka smarnego do komory badawczej maszyny tarciovej wykonano otwór D, natomiast w celu usuwania środka smarnego z komory – króciec spustu/zlewu 39.

Komora badawcza maszyny tarciovej wg niniejszego rozwiązania konstrukcyjnego pracuje w następujący sposób:

Na wyjściowym końcu wału napędowego 4 umocowany jest wałek/rolka 7 wykonany z materiału, który jest dielektrykiem charakteryzujący się zarówno małym współczynnikiem przewodności cieplnej jak również małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Na wałku tym nałożona jest przeciwpółka 10 i zabezpieczona przed przemieszczeniem za pomocą nakrętki 8 i podkładki sprężystej 9.



Rys. 4.2.1. Konstrukcja komory badawczej maszyny tarciowej z węzłem tarcia typu pierścień-klocki wg patentu RU 2163 013 C2.

1 – węzeł łożyskowy, 2 – korpus, 3 – blok obciążenia, 4 – wał napędowy, 5 – silnik elektryczny, 6 – sprzęgło sztywne, 7 – wałek, 8 – nakrętka, 9 – podkładka sprężysta, 10 – przeciwpróbka, 11 – rama maszyny tarciowej, 12 – duży nurnik dwustronnego działania, 13 – duży nurnik dwustronnego działania, 14 – mały nurnik dwustronnego działania, 15 – mały nurnik dwustronnego działania, 16 – nakrętka, 17 – nakrętka, 18 – samonastawna przegubowa podpora kulowa (rys. 4.2.2.), 19 – samonastawna przegubowa podpora kulowa (rys. 4.2.2.), 20 – prowadnica, 21 – prowadnica, 22 – kołek walcowy, 23 – kołek walcowy, 24 – próbka/klocek, 25 – próbka/klocek, 26 – króciec ciśnieniowy, 27 – czujnik ciśnienia, 28 – rurociąg sztywny, 29 – ręczny (manualny) regulator obciążenia, 30 – ręczny (manualny) regulator obciążenia, 31 – ręczny (manualny) regulator wyjściowego nadmiarowego ciśnienia, 32 – manometr, 33 – czujnik ciśnienia dynamicznego, 34 – rurociąg sztywny, 35 – króciec połączeniowy, 36 – króciec połączeniowy, 37 – przezroczysta pokrywa, 38 – nakrętka, 39 – króciec spustu/zlewu, A- powierzchnia czołowa, B – powierzchnia czołowa, D – otwór, W – powierzchnia międzynurkowa, G – powierzchnia międzynurkowa [opracowano na podstawie opisu patentowego]

Badane próbki/klocki 24 i 25 umieszczone są w samonastawnych kulowych uchwytach 18 i 19, które to mogą się swobodnie obracać i przemieszczać w przyrządnych prowadnicach 20 i 21. Próbki 24 i 25 są przymocowane do samonastawnych kulowych uchwytów 18 i 19 za pomocą walczkowych kołków 22 i 23.

Po umieszczeniu badanych próbek w uchwytach kulowych zamyka się przezroczysta pokrywę 37 za pomocą nakrętki 38 oraz przeprowadza się hermetyzację komory. Otwór D podający środek smarny oraz króciec spustowy 33 łączy się ze źródłem cyrkulacji badanego środka smarnego i utrzymuje jego natężenie przepływu w komorze badawczej pod niezbędnym koniecznym ciśnieniem.

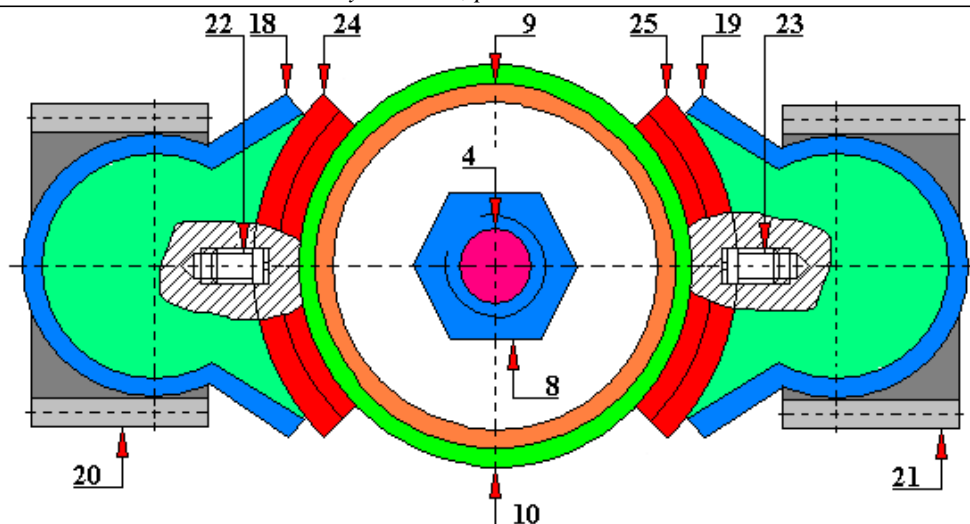
Następnie załącza się silnik elektryczny 5 napędu ruchu głównego wprawiający w obrót za pomocą sztywniej mufy 6 przeciwpróbkę 10.

Jeśli obciążenie badanych próbek/klocków 24 i 25 będzie osiągnięte za pomocą manualnego regulatora, to wówczas na ciśnieniowym króćcu 26 mocuje się zaślepkę (korek) i obciążenie węzła tarcia uzyskuje się za pomocą manualnych regulatorów obciążenia 29 i 30, tworząc w ten sposób nadmiarowe ciśnienie obciążenia na pierścieniowych powierzchniach A i B dużych nurników 12 i 13. Ciśnienie to podawane jest na samonastawne kulowe uchwyty 18 i 19 za pomocą małych nurników 14 i 15. Wielkość ciśnienia obciążenia w czasie przeprowadzania badania rejestrowana jest przy pomocy czujnika ciśnienia 27.

Przy dynamicznym zadawaniu obciążenia na badane próbki/klocki króciec ciśnieniowy 26 łączy się z ciśnieniową powierzchnią programowo-sterującego serwoelementu (nie pokazanego na rysunkach).

Podczas docierania badanego skojarzenia ciernego system rejestracji sumowego (całkowitego) liniowego zużycia wypełnia się badanym płynem roboczym. Istnieje zależność pomiędzy ściśliwością badanego środka smarnego a ilością/wielkością ubytku współpracującej pary cieńej. Zależność tę wykorzystuje właśnie system rejestracji liniowego zużycia. Dzięki temu możliwe jest określenie z pewną dokładnością wielkości ubytku pary tarciowej bez jej demontażu. Przy badaniach w warunkach statycznych rejestrację sumowego liniowego zużycia badanego skojarzenia ciernego przeprowadza się wg wskazań manometru 32. Natomiast przy badaniach dynamicznych zapis sumowego liniowego zużycia przeprowadza się wg wskazań dynamicznego czujnika ciśnienia 33. Osiągnięte w ten sposób, zarówno dla badań dynamicznych jak i statycznych, wyjściowe nadmiarowe ciśnienie wypływu środka smarnego z komory badawczej na początku badania objawiać się będzie zerem absolutnym, tzn. oznaczającym początek procesu zużycia przeciwpróbkę 10 i badanych próbek/klocków 24 i 25. Wg miary tego, jak będzie przebiegał proces zużycia badanego skojarzenia tarciowego, będzie odbywało się zmniejszenie objętości międzynurnikowych powierzchni W i G. Intensywność tego procesu zużycia można określić równoległe za pomocą pomiaru średnic powierzchni W i G oraz ściśliwości badanego płynu roboczego. Większa intensywność procesu zużycia powoduje większe obniżenie ciśnienia rejestrowanego manometrem 32 lub czujnikiem ciśnienia 33.

Istnieją takie kompozycje środków smarowych dla których w czasie trwania procesu zużywania nie następuje obniżanie ciśnienia czy to na manometrze 32 czy też na czujniku 33. Wręcz przeciwnie – następuje niewielki wzrost tego ciśnienia. Takich środków smarowych nie ma jednak dużo. Wówczas jednak przy tym rozwiązaniu konstrukcyjnym maszyny tarciowej konieczne jest w takich przypadkach albo zwiększenie średnic dużych nurników 12 i 13 albo zmniejszenie średnic małych nurników 14 i 15. Istnieje również trzecia możliwość – zmienić badany środek smarowy, tak aby charakteryzował się mniejszą ściśliwością (prężnością).



Rys. 4.2.2. Konstrukcja samonastawnej przegubowej podpory kulowej maszyny tarciowej z węzłem tarcia typu pierścień-kłosek wg patentu RU 2163 013 C2.

4 – wał napędowy, 8 – nakrętka, 9 – podkładka sprężysta, 10 – przeciwróbka, 18 – samonastawna przegubowa podpora kulowa, 19 – samonastawna przegubowa podpora kulowa, 20 – prowadnica, 21 – prowadnica, 22 – kołek walcowy, 23 – kołek walcowy, 24 – próbka/kłosek, 25 – próbka/kłosek [opracowano na podstawie opisu patentowego]

Zastosowanie sztywnej mufy 6 na stożkowych napinających pierścieniach i zastosowanie mocowania przeciwróbki 10 na stożkowych powierzchniach zapewnia przenoszenie obrotowego ruchu przeciwróbki 10 przy najmniejszym promieniowym biciu w badanym skojarzeniu tarciowym. Pionowe ustawienie komory badawczej pozwala przeprowadzić obserwację wzrokową badanego procesu tarcia lub jego monitorowanie (filmowanie) poprzez przezroczystą pokrywę 37.

Ponieważ badany środek smarowy dostaje się do komory badawczej stycznie (tangencjalnie) do wewnętrznej cylindrycznej powierzchni bloku obciążenia 3, to następuje powstawanie wirowego strumienia, który porzywa ze sobą powstałe w procesie tarcia cząstki ściernie i usuwa je razem z badanym środkiem smarowym z komory badawczej za pomocą stożkowo-gwintowanego króćca. Stożkowatość gwintowanego króćca zapewnia niemożliwość akumulowania się powstałych cząstek ściernych w jednym czy też kilku miejscach oraz utrzymanie ich w stanie zawieszenia we wnętrzu badanego środka smarnego. Kształt tego króćca również zapewnia brak przylegania tych cząstek ściernych do ścianki korpusu 2, mimo, że cząstki te są do niej dociśnięte za pomocą siły odśrodkowej.

Dzięki wyżej opisanemu efektowi cząstki ściernie powstałe w procesie zużycia cały czas znajdują się w zawieszaniu badanego środka smarnego i nieprzerwanie wydostają się z wewnętrznej powierzchni komory badawczej.

Zastosowanie nurnikowych par 12 i 14 oraz 13 i 15 jako elementów wykonawczych bloku obciążenia pozwala nie tylko osiągnąć wymagane natężenie i przesył hydraulicznego sygnału obciążenia badanego skojarzenia ciernego, ale także osiągnąć minimalne zużycie współpracujących elementów spowodowane tarciami w samych nurnikowych parach, co jest bardzo ważne stworzenia rzeczywistych warunków obciążenia węzła tarcia maszyn i mechanizmów. W niniejszym rozwiązaniu konstrukcyjnym nurnikowe pary 12 i 14 oraz 13 i 15 wykonano jako dyferencjalne (różnicowe) hydrauliczne cylindry, pozwalające równolegle z procesem obciążenia przeprowadzać ciągłą rejestrację sumowego (całkowitego) liniowego zużycia badanego skojarzenia ciernego.

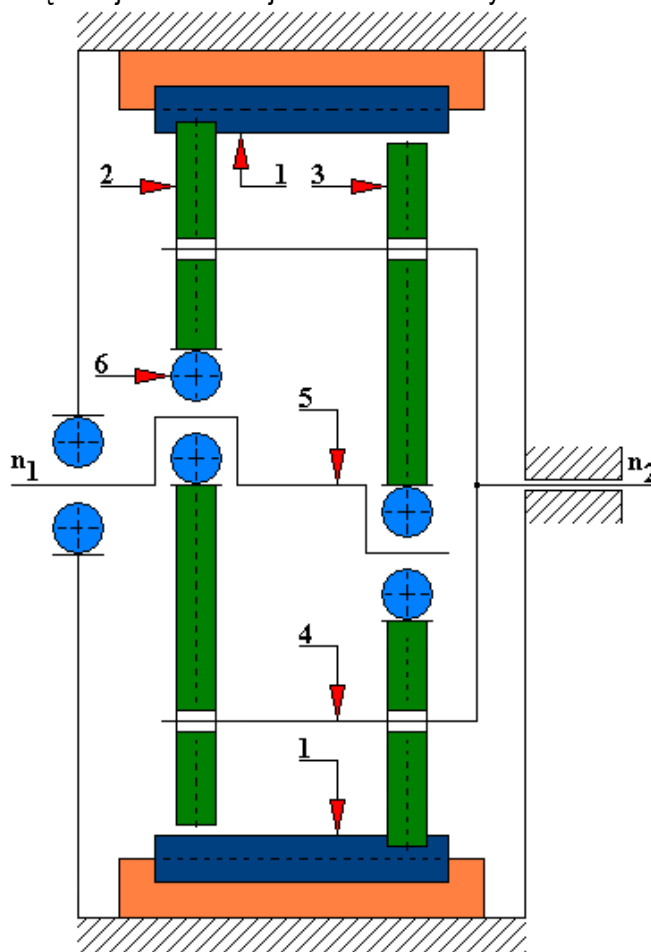
Zastosowanie samonastawczych kulowych uchwytów 18 i 19 z kołkowymi mocowaniami badanymi próbkami/kłosekami 24 i 25 pozwala zapewnić maksymalną możliwą szczelność ich przylegania do powierzchni przeciwróbki 10, uniknąć ich zukosowania (skrzywienia) podczas

zadawania obciążenia oraz ograniczenia koniecznego maksymalnego momentu tarcia dla badanego skojarzenia tarcowego.

W celu zwiększenia dokładności i wiarygodności rejestracji sumowego liniowego zużycia badanego węzła tarcia wykorzystano zmianę ciśnienia badanego środka smarnego.

### 4.3. Stanowisko do badania trwałości zazębienia obiegowej przekładni cykloidalnej

Przekładnie typu K-H-V (przekładnie CYCLO) są odmianą przekładni specjalnych umożliwiające uzyskanie dużego przełożenia na jednym stopniu. W sensie konstrukcyjnym są toczne przekładnie, w których wszystkie elementy o połączeniu kształtowym poruszają się ruchem tocznym. Dzięki temu możliwe jest maksymalne zmniejszenie strat spowodowanych tarciem, co również związane jest ze zmniejszeniem strat mocy.



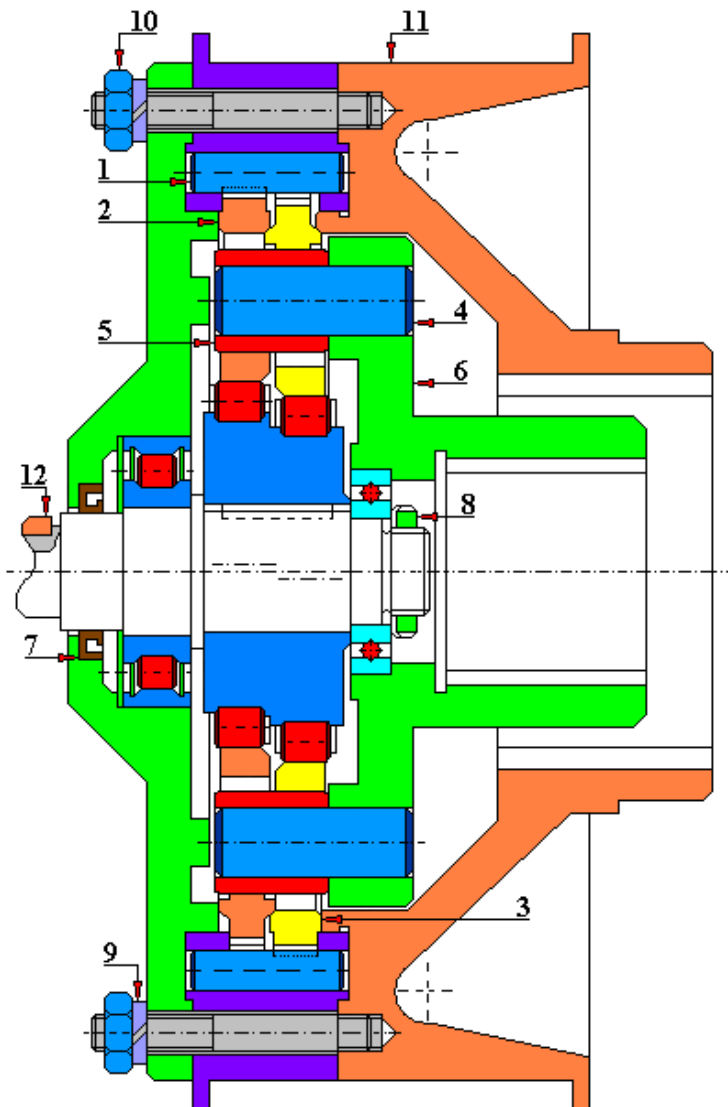
Rys. 4.3.1. Schemat kinematyczny przekładni typu K-H-V

1 – rolki stanowiące zęby ( $z_2$ ) nieruchomego koła o uzębieniu wewnętrznym, 2 – tarcza krzywkowa pierwsza osadzona na wale napędzającym, 3 – druga tarcza krzywkowa osadzona na wale napędzającym, 4 – mechanizm równowodowy, 5 – wał napędzający, 6 – łożysko (opracowano na podstawie Rutkowski A. 1986)

Zasadę działania tego typu przekładni przedstawiono na rysunku 4.3.1 oraz na rys. 4.3.4. Na wale napędzającym 5 są osadzone dwie tarcze krzywkowe 2 i 3, które są przestawione mimośrodowo o pół obrotu. Tarcze te współpracują z rolkami 1 stanowiącymi zęby ( $z_2$ ) nieruchomego koła o uzębieniu wewnętrznym. Liczba krzywizn na tarczach krzywkowych jest odpowiednikiem liczby zębów ( $z_1$ ) na kole napędzającym. Przekładnia tego typu posiada kołki oraz rolki (tulejki) – nie przedstawione na rysunku – które są osadzone z odpowiednim luzem (zazwyczaj kilku milimetrów) w otworach obu tarcz krzywkowych 2 i 3 stanowiących zarazem

część mechanizmu równowodowego 4. Mechanizm równowodowy służy do przekazywania ruchu obrotowego na wał napędzany.

Na rysunku 4.3.2 przedstawiono przekładnię typu CYCLO, w której tarcze krzywkowe posiadają 45 zębów (krzywizn) i zazębiają się z kołem nieruchomym o 46 zębach (rolkach). Przełożenie w tej przekładni wynosi więc  $i = 45$ . W przypadku gdy unieruchomimy wał z tarczami krzywkowymi, a napęd przekładni będzie przenoszony przez obudowę wraz z kołem o uzębieniu wewnętrznym, wówczas przełożenie  $i = z_1/z_2 = 46/45 = 1,0222$ .



Rys. 4.3.2. Przekładnia CYCLO

1 – rolki, 2 – pierwsza tarcza krzywkowa, 3 – druga tarcza krzywkowa, 4 – kołki, 5 – rolki (tulejki), 6 – mechanizm równowodowy, 7 – uszczelnienie wargowe wału napędowego, 8 – nakrętka zabezpieczająca łożysko, 9 – podkładka sprężysta, 10 – nakrętka sześciokątna, 11 – korpus przekładni, 12 – wpust (opracowano na podstawie Müller L. 1983)

Istnieją również inne rozwiązania konstrukcyjne przykładni typu CYCLO, w których zarówno tarcze jak i koło nieruchome są uzębione, a ich zęby mają zarys albo ewolwentowy albo cykloidalny odpowiednio skorygowany w celu umożliwienia pracy przy różnej liczbie zębów w obu współpracujących kołach.

Przekładnie CYCLO charakteryzują się pracą bez wstrząsów, bez drgań w obu kierunkach obrotów, są budowane do minimalnych przełożeń  $i = 9$  oraz maksymalnych przełożeń  $i = 85$  (87)

(różni autorzy podają różne wartości). Sprawność tych przekładni jest bardzo duża i może wynosić do 0,98. Wartość przenoszonych momentów obrotowych zawiera się w przedziale od 15 [Nm] do 70 [Nm] przy zakresie mocy od 0,12 [kW] do 110 [kW]. Jeżeli zależy nam na większych przełożeniach, wówczas należy zastosować przekładnię CYCLO dwustopniową. Tego typu przekładnie stosowane są m. in. do napędu obrabiarek, przenośników łańcuchowych, maszyn budowlanych itp.

Stanowisko do badania trwałości zazębienia obiegowej przekładni cykloidalnej zostało przedstawione w pracy Bogdana Warty w dwumiesięczniku Tribologia 6/2006. Obciążenie badanej przekładni typu CYCLO (rys. 4.3.3) zadawane jest za pomocą mechanicznego sprzężenia dwóch silników indukcyjnych klatkowych trójfazowych: hamującego 6 oraz napędowego 1. Poza tym w układzie badawczym została zastosowana dwustopniowa przekładnia pasowa (pozycje od 7 do 16), której zadaniem jest zwiększenie prędkości obrotowej otrzymywanej na wale wyjściowym badanej przekładni do wartości większej niż prędkość synchroniczna silnika hamującego, co powoduje generowanie momentu skręcającego obciążającego badaną przekładnię. Niniejsze stanowisko badawcze wyposażone jest w system archiwizacji i wizualizacji danych w tym temperatury badanej przekładni, liczby cykli obciążenia, wartości momentu obrotowego, przetwornika drgań przeznaczonego do detekcji pojawienia się zmęczeniowego uszkodzenia współpracujących powierzchni. Jako elementy wykonawcze zastosowano:

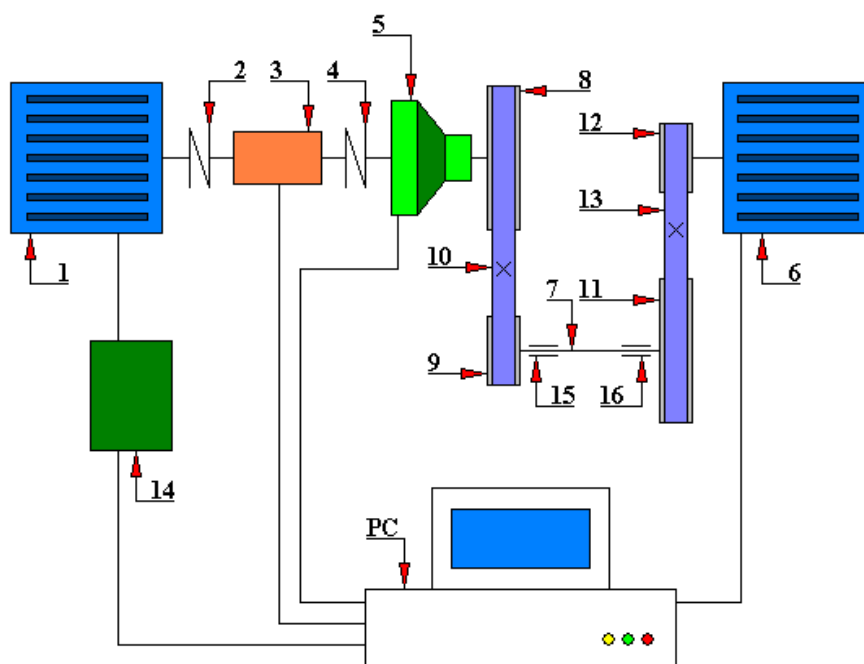
- silnik hamujący 6 typu Sg 160L-8, 7,5 [kW],  $n = 705$  [obr/min];
- silnik napędowy 1 typu Sg 160M-6, 7,5 [kW],  $n = 960$  [obr/min];
- przemiennik częstotliwości 14 typ SV 075 iG5A-4 o mocy 7,5 [kW], napięciu zasilającym  $u = 400$  [V] produkcji LS Industrial System;
- momentomierz 3 (typ Mi10) działający na zasadzie wałka skrętnego;
- badaną obiegową przekładnię cykloidalną 5;
- dwustopniową przekładnię pasową z pasami zębatymi produkcji firmy OPTIBELT (pozycje od 7 do 16);
- sprzęgła podatne palcowe 2 i 4 (łącznie dwie sztuki).

Natomiast na rysunku 4.3.4 przedstawiono ogólną zasadę działania obiegowej przekładni cykloidalnej. W celu umożliwienia doświadczalnej weryfikacji modelu prognozowania trwałości zmęczeniowej zazębienia cykloidalnego Autor niniejszego stanowiska zaprojektował koła obiegowe o zmniejszonej szerokości wieńca z 14,5 [mm] do 6 [mm]. Wówczas przewidywana trwałość zazębienia takiego koła jest porównywalna z trwałością łożyska centralnego (rysunki 4.3.5 oraz 4.3.6). Koła obiegowe, a także rolki koła współpracującego wykonano ze stali łożyskowej ŁH15SG ulepszonej do twardości 63 HRC. Regulację prędkości obrotowej silnika napędowego zapewnia przemiennik częstotliwości. Zastosowanie silnika hamującego pozwala zmniejszyć przełożenie przekładni multiplikującej prędkość obrotową oraz zmniejszyć jej wymiary zewnętrzne. Konstrukcja tego stanowiska jednak uniemożliwia odwrócenie kierunku zadawania obciążenia.

W niniejszym rozwiązaniu konstrukcyjnym momentomierz Mi10 współpracuje ze wskaźnikiem momentu WT-1, który posiada miernik analogowy przeznaczony do odczytu wskazań. Momentomierz umożliwia pomiar wolnozmiennych lub statycznych momentów obrotowych w zakresie  $0 \div 100$  [Nm].

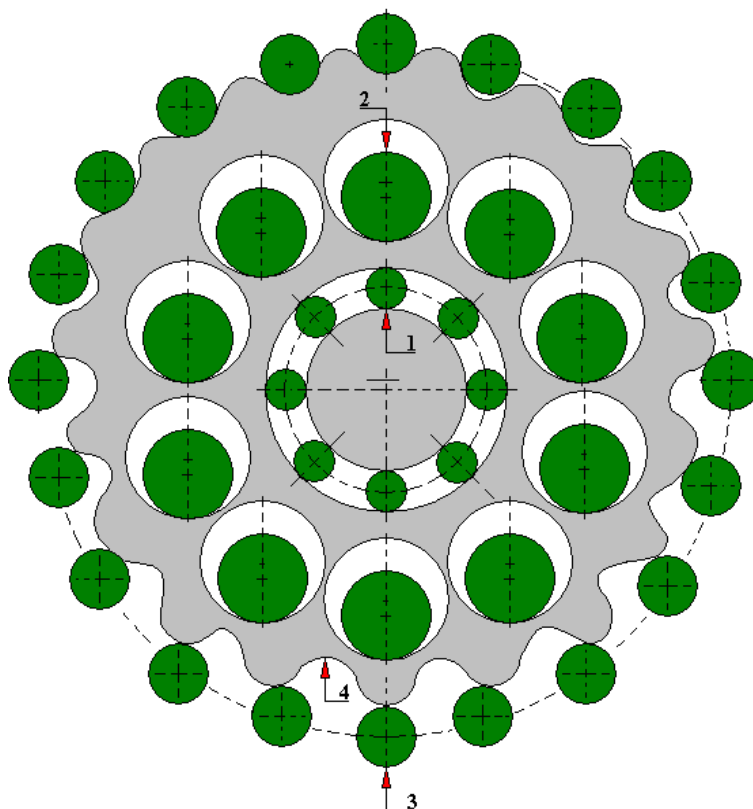
Przedstawione stanowisko badawcze umożliwia skrócenie czasu eksperymentu dla badań zmęczeniowych dedykowanych przekładniom cykloidalnym.

Proszę zwrócić uwagę, że w przypadku gdy na schemacie pokazanym na rysunku 4.3.3. zamienimy przekładnię cykloidalną na dowolną inną to wówczas otrzymamy uniwersalne stanowisko badawcze praktycznie dla każdego rodzaju przekładni, jeżeli tylko warunki techniczne na to pozwolą (rys. 4.3.7).



Rys. 4.3.3. Schemat ogólny stanowiska do badań trwałości węzłów tocnych przekładni cykloidalnej

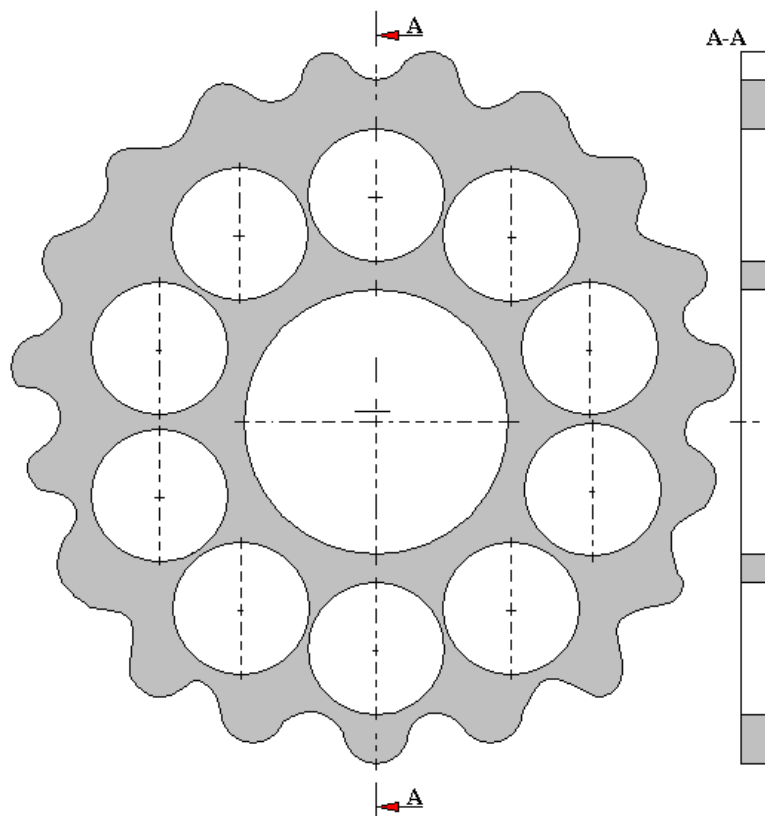
1 – silnik napędowy, 2 – sprzęgło, 3 – momentomierz, 4 – sprzęgło, 5 – przekładnia cykloidalna, 6 – silnik hamujący, 7 – wał przekładni pasowej, 8 – koło zębate  $z_1$ , 9 – koło zębate  $z_2$ , 10 – pas zębaty, 11 – koło zębate  $z_3$ , 12 – koło zębate  $z_4$ , 13 – pas zębaty, 14 – przemiennik częstotliwości, 15 – łożysko podpory, 16 – łożysko podpory, PC – komputer



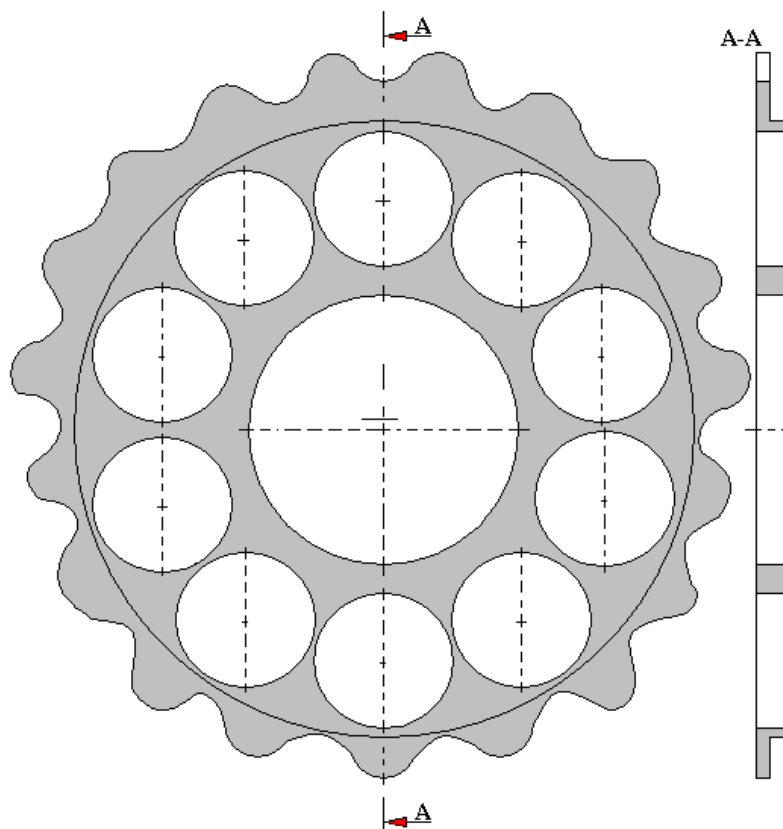
Rys. 4.3.4. Ogólna zasada działania obiegowej przekładni cykloidalnej

1 – walcowe łożysko centralne, 2 – zestaw tocnych sworzni w mechanizmie równowodowym, 3 – specjalne zazębienie cykloidalne, 4 – koło obiegowe przekładni cykloidalnej (pierwsza tarcza krzywkowa przestawiona mimośrodowo o pół obrotu); na rysunku nie przedstawiono drugiej tarczy krzywkowej

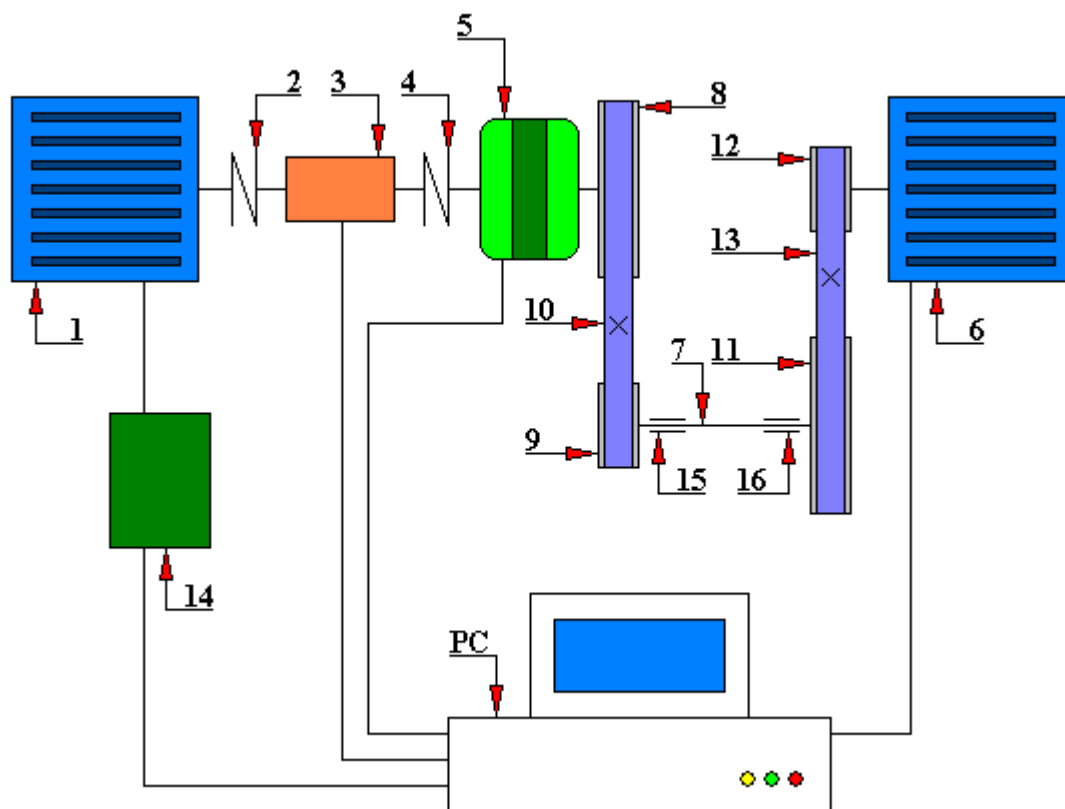




Rys. 4.3.5. Konstrukcja standardowego koła obiegowego przekładni cykloidalnej



Rys. 4.3.6. Konstrukcja koła obiegowego przekładni cykloidalnej przeznaczone do badań trwałości zazębienia

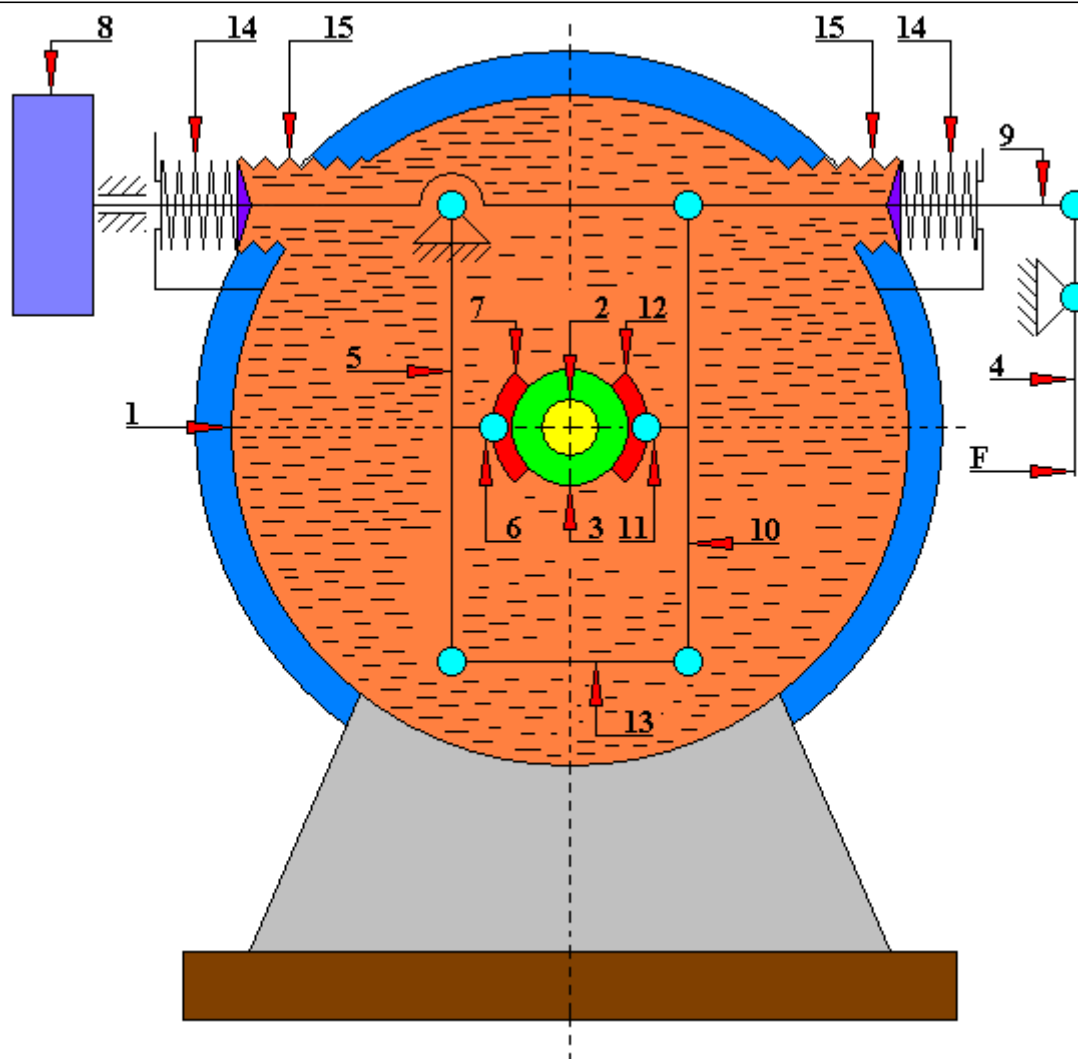


Rys. 4.3.7. Schemat ogólny uniwersalnego stanowiska do badań trwałości przekładni

1 – silnik napędowy, 2 – sprzęgło, 3 – momentomierz, 4 – sprzęgło, 5 – dowolna przekładnia, 6 – silnik hamujący, 7 – wał przekładni pasowej, 8 – koło zębate  $z_1$ , 9 – koło zębate  $z_2$ , 10 – pas zębaty, 11 – koło zębate  $z_3$ , 12 – koło zębate  $z_4$ , 13 – pas zębaty, 14 – przemiennik częstotliwości, 15 – łożysko podpory, 16 – łożysko podpory, PC – komputer

#### 4.4. Urządzenie do badań tribologicznych materiałów wg patentu SU1219962A

Jest to urządzenie przeznaczone zarówno do badań tribologicznych materiałów konstrukcyjnych jak również do badań tribologicznych środków smarowych (rys. 4.4.1). Urządzenie to zostało zarejestrowane w Urzędzie Patentowym Związku Radzieckiego pod numerem SU 1219962 A. Jego twórcami jest zespół badawczy w składzie: Prokopienko A. K., Garkunow D. N., Żigajło B. G., Bystrow W. N., Francjew W. N., Znajew W. A., Poljanin B. A. oraz Panfilow E. A.



Rys. 4.4.1. Schemat urządzenia do tribologicznych badań materiałów wg patentu SU 1219962 A

1 – komora robocza, 2 – wał napędowy przeznaczony m. in. do mocowania próbki, 3 – próbka, 4 – węzeł obciążenia, 5 – pierwsza dźwignia, 6 – uchwyt przeciwpróbki, 7 – pierwsza przeciwpróbka, 8 – blok rejestracji zużycia, 9 – trzon, drążek, 10 – druga dźwignia, 11 – uchwyt przeciwpróbki, 12 – druga przeciwpróbka, 13 – łącznik, 14 – sprężyna, 15 – sylfon (mieszek sprężysty) (opracowano na podstawie opisu patentowego).

Urządzenie do tribologicznych badań materiałów konstrukcyjnych i środków smarowych zawiera komorę roboczą 1, w której znajduje się wał obrotowy 2 przeznaczony do mocowania próbki 3. Dodatkowo urządzenie to zawiera węzeł obciążenia 4 związany z pierwszą dźwignią 5, która jest przegubowo zamocowana w komorze badawczej 1 i wyposażona w uchwyt 6 przeznaczony do mocowania pierwszej przeciwpróbki 7. Natomiast druga dźwignia 10 wraz z uchwytem 11 przeznaczona jest do mocowania drugiej przeciwpróbki 12. Węzeł obciążenia 4 za pośrednictwem drążka 9 związany jest z blokiem rejestracji zużycia 8. Łącznik 9 tak jak to zostało przedstawione na rysunku 4.4.1 jest przegubowo związany z drugą dźwignią 10, a następnie za pomocą łącznika 13 powiązany z pierwszą dźwignią 5.

W celu podwyższenia inercji (bezwładności) łącznika 9 i zwiększenia jego odporności na drgania w konstrukcji urządzenia zastosowano sprężyny 14, które połączono z komorą roboczą 1 i łącznikiem 9 oraz umieszczono na zewnątrz urządzenia w celu ułatwienia regulacji ich napięcia.

Komora badawcza 1 posiada sylfony (mieszki sprężyste) 15 przeznaczone do jej hermetyzacji oraz do tłumienia drgań wibracyjnych.

Urządzenie pracuje w następujący sposób:

Na wałę napędowym 2 mocuje się badaną próbkę 3, natomiast w chwytach 6 i 11 mocowane są przeciwpróbki 7 i 12. Następnie napełnia się komorę badawczą 1 badanym środkiem smarowym lub badaną kompozycją smarową i hermetyzuje się ją. Za pomocą węzła obciążenia 4, poprzez drążek 9 kinematycznie związany z pierwszą 5 oraz drugą 10 dźwignią, wyposażonymi w uchwyty 6 i 11 mocujące przeciwpróbki 7 i 12 zadawane jest określone i kontrolowane obciążenie badanego węzła tarcia. W opisie patentowym nie przedstawiono sposobu zadawania obciążenia. W jaki sposób to zostało zrealizowane, czy to za pomocą układu hydraulicznego czy też za pomocą przesuwnej śruby/nakrętki tego nie wiemy. Kolejnym krokiem jest włączenie napędu wału 2, któremu bezstopniową regulację prędkości zapewnia silnik elektryczny (nie pokazany na rysunku). W czasie trwania przebiegu procesu badawczego zapisywane jest w sposób ciągły sumowe liniowe zużycie współpracujących elementów za pomocą bloku rejestracji zużycia 8. Blok rejestracji zużycia 8 może zawierać czujnik rezystancji oporu elektrycznego występującego między próbką 3 i przeciwpróbkami 7 oraz 12. Stosuje się go dla materiałów głównie metalicznych z uwagi na konieczność przewodzenia prądu elektrycznego.

Autorzy tego rozwiązania konstrukcyjnego zapewniają, że promieniowe bicie wału 2 nie wpływa na wyniki otrzymanych pomiarów z bloku rejestracji zużycia 8.

#### **4.5. Urządzenie do badań tribologicznych materiałów w szczególności środków smarowych wg patentu SU 1670520 A1**

Jest to urządzenie przeznaczone głównie do badań tribologicznych środków smarowych (rys. 4.5.1). Urządzenie to zostało zarejestrowane w Urzędzie Patentowym Związku Radzieckiego pod numerem SU 1670520 A1. Jego twórcami jest zespół badawczy w składzie: Kowalskij B.I., Tichonow W.I. oraz Dieriewiagina Ł.N. (Państwowy Projektowo-Naukowo-Badawczo-Konstrukcyjny Instytut „Krasnojarskij Promstroj NII Projekt”).

Niniejsze urządzenie pracuje w następujący sposób. Przed rozpoczęciem badania koniecznie należy uzupełnić wannę zbiornika środka smarnego 20 badanym środkiem smarnym 21. Następnie należy zadać wartość temperatury badanego środka smarnego oraz czas trwania badania za pomocą nastawników 7 oraz 11. Po wykonaniu tych wstępnych czynności urządzenie jest gotowe do pracy.

Na początku pracy system kontroli podgrzewa badany środek smarny do wartości zadanej temperatury. W tym celu zostaje włączony blok zasilania 1, z którego podawane jest napięcie do bloku sterowania 2 oraz do regulatora temperatury 3. Regulator temperatury 3 załącza/wyłącza element grzejny 4. Następuje wówczas nagrzewanie badanego środka smarnego 21 do zadanej wartości temperatury ustawionej za pomocą nastawnika temperatury 7.

Temperatura badanej kompozycji smarowej 21 mierzona jest za pomocą czujnika temperatury 6 umieszczonego w środku smarowym 21, a jej wielkość jest porównywana z wartością zadaną w bloku porównawczym 5.

Przy temperaturze środka smarnego 21 poniżej wartości zadanej zapala się kontrolka wskaźnika temperatury 8. Wówczas rozruch urządzenia jest zablokowany. Po osiągnięciu zadanej wartości temperatury badanej kompozycji smarowej 21 kontrolka wskaźnika temperatury 8 gaśnie. Następuje wysłanie z bloku porównawczego 5 sygnału sterującego do przerzutnika bistabilnego 9, który za pomocą swoich sygnałów wyjściowych steruje generatorem impulsów licznika czasu trwania badania 10 poprzez blok sterowania 2.

Blok sterowania 2 podaje również napięcie na czujniki 14, 15, 16 pomiaru momentu siły tarcia, zużycia i współczynnika przewodzenia kontaktu ciernego.

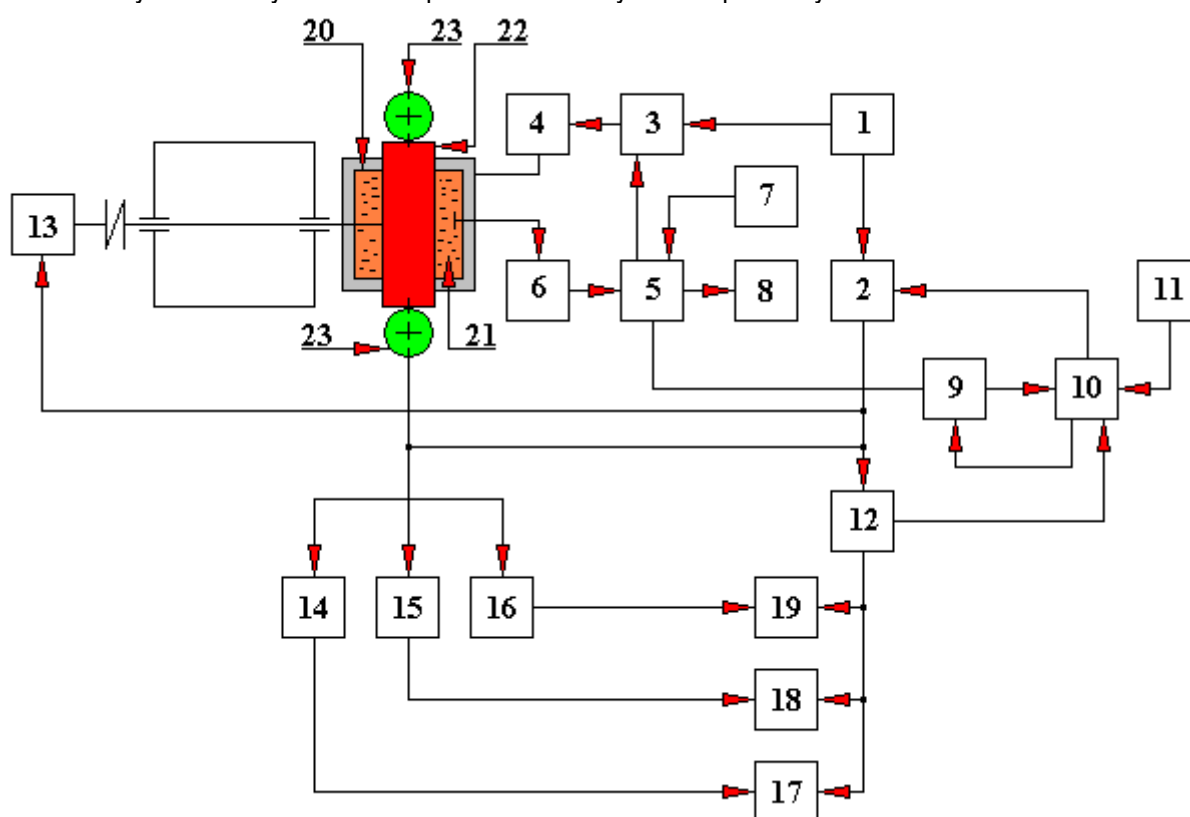
Z chwilą rozpoczęcia ruchu obrotowego uchwyt 22 przeciwpróbki pracuje bez przyłożenia do niego obciążenia tak długo, jak długo temperatura środka smarnego 21 nie osiągnie zadanej wartości temperatury. Podczas tej fazy cyklu pracy ogrzewany środek smarny 21 oddaje część swojego ciepła również do uchwytu 22 przeciwpróbki. Tym samym nagrzewając ją. Kontrolka wskaźnika 8 zapala się, a z chwili osiągnięcia zadanej wartości temperatury – gaśnie. Po tej

fazie cyklu pracy następuje przyłożenie obciążenia do uchwytów 22 i 23 przeciwpółki i próbek. W tym momencie następuje rejestracja wszystkich tribotechnicznych parametrów procesu tarcia i zużycia badanej pary tarcia. Przy tym blok ryglowania/blokowania 12 podaje napięcie do urządzeń rejestrujących 17, 18, 19 oraz sygnał na licznik czasu trwania badania 10.

Sygnały otrzymywane z czujników momentu siły tarcia 14, zużycia 15 oraz współczynnika przewodzenia kontaktu ciernego 16 mogą być podawane albo na urządzenia rejestrujące wartości z tych czujników, tzn. na urządzenia 17, 18, 19 albo też podawane przez sterownik/mikroprocesor (nie pokazany na rysunku) do komputera i tam za pomocą specjalnego programu obrabiane.

Po upływie zadanego czasu trwania badania, który został ustalony za pomocą nastawnika czasu 11, licznik czasu trwania badania 10 wysyła odpowiedni sygnał do bloku sterowania 2, na podstawie którego blok ten wyłącza napęd obrotowy 13, zabezpieczenia prądowe czujników 14, 15, 16, urządzeń rejestrujących 17, 18, 19 i następuje powrót przelutnika bistabilnego 9 w położenie neutralne. Operator manualnie wyłącza blok zasilania 1.

Po wymianie środka smarnego 21 w zbiorniku 20 oraz badanych próbek i przeciwpółki umieszczonych w uchwytach 22 i 23 proces badawczy można powtórzyć.

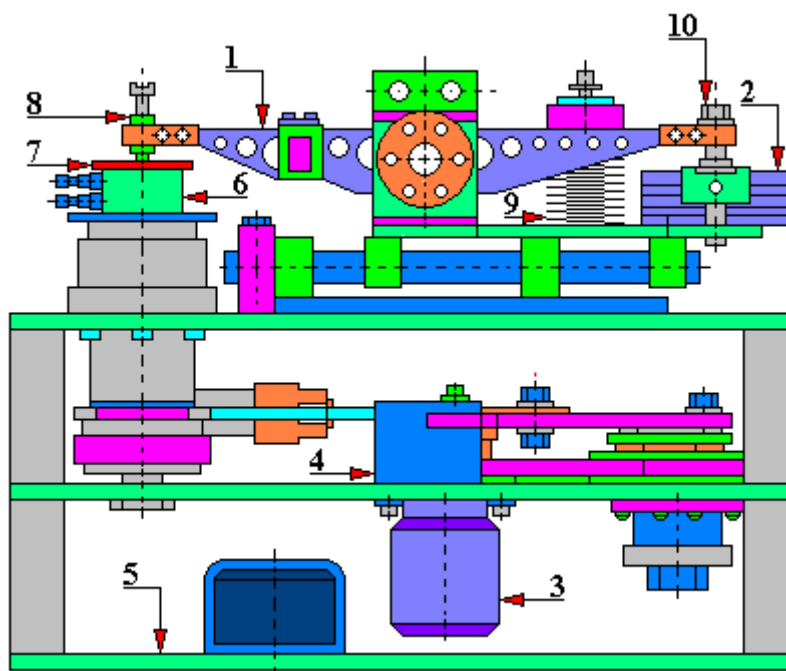


Rys. 4.5.1. Schemat blokowy urządzenia do tribologicznych badań materiałów w szczególności środków smarowych wg patentu SU 1670520 A1

1 – blok zasilania, 2 – blok sterowania, 3 – regulator temperatury, 4 – element grzewczy, 5 – blok porównawczy, 6 – czujnik temperatury, 7 – nastawnik temperatury, 8 – wskaźnik, 9 – przelutnik bistabilny, 10 – licznik czasu badania, 11 – nastawnik czasu trwania badania, 12 – blok ryglowania, 13 – napęd obrotowy, 14 – czujnik momentu siły tarcia, 15 – czujnik zużycia, 16 – czujnik współczynnika przewodzenia kontaktu ciernego, 17 – urządzenie rejestrujące moment siły tarcia, 18 – urządzenie rejestrujące wielkość zużycia, 19 – urządzenie rejestrujące wielkość współczynnika przewodzenia ciernego, 20 – zbiornik środka smarnego, 21 – badany środek smarny, 22 – uchwyt przeciwpółki, 23 – uchwyt próbki (opracowano na podstawie opisu patentowego).

#### 4.6. Tribometr do badań frettingu typu trzpień-tarcza wg zgłoszenia patentowego 396512

W bazie Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej znajduje się opis konstrukcji tribometru o numerze zgłoszenia 396512, któremu nie przyznano prawa wyłączności. Pomimo tego, urządzenie to jest ciekawym rozwiązaniem technicznym przeznaczonym do badań frettingu, które to badania są trudnymi technicznie badaniami. Twórcami niniejszej konstrukcji są: Dudarew A., Dąbrowski J. R., Kulesza E., Sidun J. W urządzeniu tym (rys. 4.6.1) zastosowano mechaniczny układ wymuszający ruch oscylacyjny pomiędzy ruchomą próbką (tarcza) 7, a próbką nieruchomą (trzpień) 8. W niniejszej parze kinematycznej zastosowano styk konforemny. Urządzenie wyposażone jest w komutatorowy silnik elektryczny 3 z przekładnią walcową 4, który napędza układ realizujący zmienne obciążenie próbki oraz układ wymuszenia ruchu. Obciążenie w tym układzie wywołane jest przez membranowy siłownik dwustronnego działania 2 współpracujący ze sprężyną 9. Zadawane obciążenie może być zarówno stałe jak i zmienne. Obciążenie przenoszone jest w miejsce styku za pomocą dźwigni 1 i zamocowanej w niej próbce 8. Zmiana amplitudy ruchu oscylacyjnego dokonywana jest poprzez zmianę położenia przegubu na dźwigni łukowej 1 i waha się w zakresie od  $\pm 0,01$  [rad] do  $\pm 0,06$  [rad]. Dopuszczalna zmiana promienia tarcia (odległość trzpienia od środka stolika) wynosi od 0÷30 [mm].

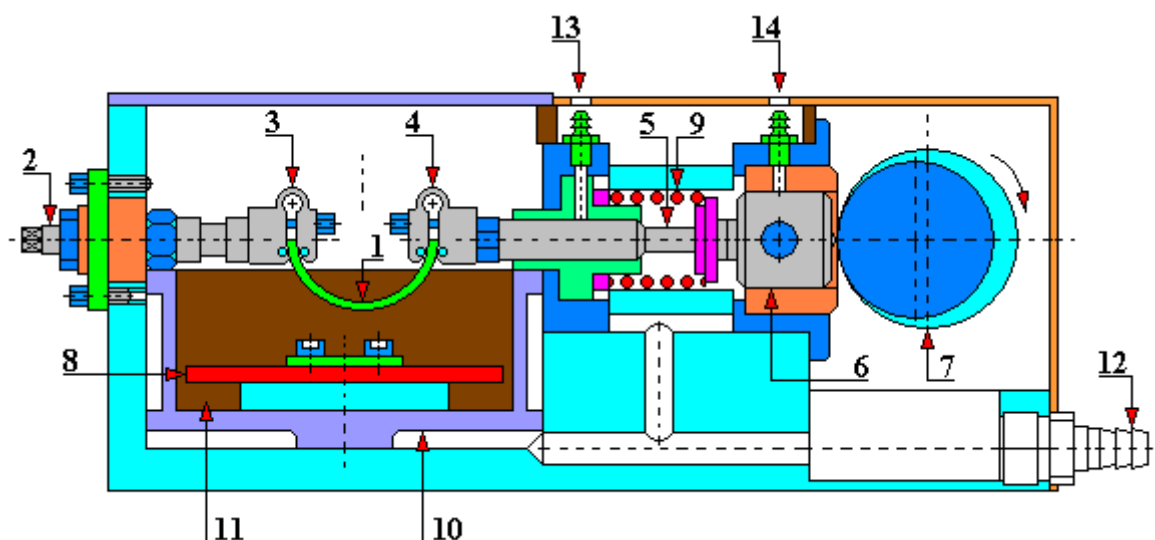


Rys. 4.6.1. Schemat ogólny budowy tribometru do badań frettingu typu trzpień-tarcza wg zgłoszenia patentowego nr 396512

1 – dźwignia, 2 – membranowy siłownik dwustronnego działania, 3 – silnik elektryczny, 4 – przekładnia, 5 – rama stanowiska badawczego, 6 – wymienny obrotowy stolik, 7 – próbka ruchoma (tarcza), 8 – próbka nieruchoma (trzpień), 9 – sprężyna, 10 – śruba mocująca membranowy siłownik 2 do dźwigni 1

#### 4.7. Tester zmęczeniowy SKMR-2

Tester zmęczeniowy SKMR-2 jest oryginalnym niekomercyjnym stanowiskiem badawczym zbudowanym przez Laboratorium Katedry Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Gdańskiej (rys. 4.7.1). Przeznaczony jest m. in. do badania wpływu asymetrii cyklu obciążenia na wytrzymałość zmęczeniową warstwy/warstw ślizgowych panwi łożyskowych w różnych środowiskach olejów smarowych lub w powietrzu.



Rys. 4.7.1. Schemat ogólny budowy testera SKMR-2

1 – badana próbka, 2 – śruba regulacyjna, 3 – uchwyt nieruchomy próbki, 4 – ruchomy uchwyt próbki, 5 – popychacz, 6 – rolka z prowadnicą, 7 – mimośród, 8 – grzałka, 9 – sprężyna, 10 – komora badawcza, 11 – badany środek smarny, 12 – króciec przyłączeniowy, 13 – zasilanie smarowania popychacza, 14 – zasilanie smarowania rolki z prowadnicą [opracowano na podstawie Sikora J. Wpływ asymetrii cyklu obciążenia i rodzaju oleju na wytrzymałość zmęczeniową stopu żelazowego. Tribologia 1/2007]

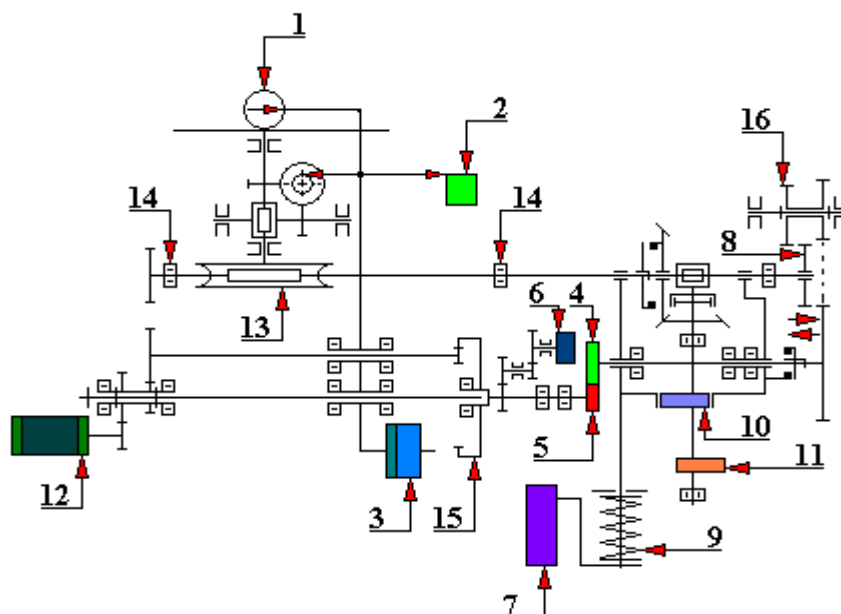
Urządzenie to posiada komorę badawczą z kontrolowaną temperaturą środka smarnego, dzięki czemu możliwe jest np. przeprowadzanie badań zgodnie ze standardem ISO 7905-4. Badaną próbkę 1 (zazwyczaj cienkościenną panwię) umieszczamy w powietrzu lub w środku smarówym 11 komory badawczej 10. Napęd urządzenia stanowi silnik elektryczny, który za pomocą mimośrodu 7 i popychacza 5 wywołuje cyklicznie zmienne naprężenia gnące o regulowanej wartości składowej amplitudowej i średniej w badanych warstwach próbki 1. Mimośród tarczy 7 ma regulowany w pewnym zakresie promień, dzięki czemu możliwe jest nastawienie wielkości wymuszeń o charakterze kinematycznym. Nastawy wymuszeń dokonuje się przed badaniem zasadniczym – na etapie montażu próbki 1. Również uchwyt 3, spełniający równocześnie rolę dynamometru, posiada możliwość regulowanego położenia. Tester ten posiada wbudowany układ hydrauliczny z ultratermostatem umożliwiającym automatyczną regulację temperatury środka smarnego lub innej cieczy, z dokładnością do 1°C.

Standardowa wartość cykli obciążenia realizowanego na tym testerze wynosi  $3,6 \times 10^6$ . Za pomocą przemiennika częstotliwości możliwa jest regulacja prędkości obrotowej wału z tarczą mimośrodową. Wartość wymuszeń ustawia się w warunkach montażowych (w temperaturze ok. 25°C). Następnie na podstawie charakterystyki wzorcowania układu pomiarowego testera wyniki testów przelicza się na wartość naprężeń odpowiadającym wymuszeniom o podanych wartościach w temperaturze przeprowadzonych pomiarów.

#### 4.8. Zmodernizowany węzeł tarcziowy maszyny Amslera

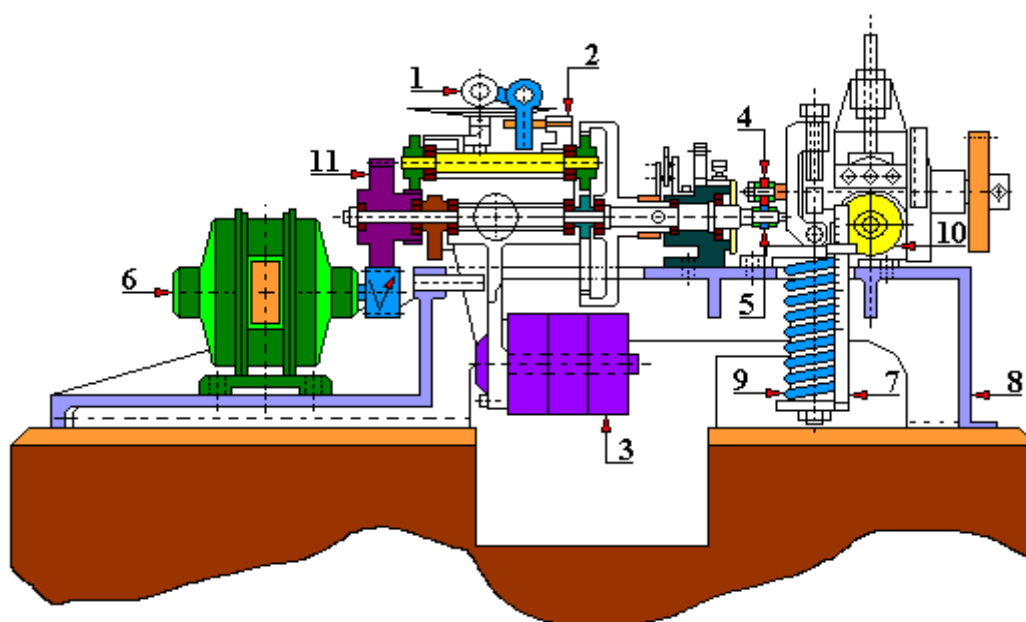
Maszyna tarcziowa typu Amsler (rysunki 4.8.1, 4.8.2 oraz 4.8.3) przeznaczona jest do badania tarcia i zużycia. Moment tarcia próbki (4) o przeciwpróbkę (5) jest równoważony momentem napędowym silnika elektrycznego (12), zwiększonym przez przekładnię obiegową (planetarną) (15) z którą jest związana wahadłowa dźwignia (3). Na dźwignię nakłada się przeciwwagi, których ciężar jest zależny od mierzonej wartości momentu tarcia. Z wychylająca się dźwignią jest połączona dźwigienka integratora powodująca przesuwanie się kółeczka licznika integratora (1) na odpowiednią średnicę tarczy, odpowiadającą danej wartości momentu tarcia.

Prędkość obrotowa tarczy jest zsynchronizowana z prędkością obrotową przeciwróbki (5) za pomocą przekładni ślimakowych. Na dźwignie jest umieszczony pisak, który kreśli przebieg wartości momentu tarcia. Natomiast integrator całkuje pracę tarcia. Wskazania licznika integratora są podstawą do obliczenia współczynnika tarcia. Wykresy momentów tarcia służą do sprawdzenia wyników obliczeń współczynników tarcia.



Rys. 4.8.1. Schemat kinematyczny maszyny Amslera przeznaczonej do badania tarcia i zużycia.

1 – rejestrator pracy tarcia, 2 – rejestrator momentu tarcia, 3 – obciążenie dynamometru wahadłowego, 4 – próbka, 5 – przeciwróbka, 6 – licznik sumujący, 7- skala obciążenia, 8 – nawrotnica obrotów, 9 – sprężyna obciążająca przeciwróbkę, 10 – mimośród ruchu poziomego, 11 – mimośród ruchu pionowego, 12 – silnik napędowy, 13 – przekładnia ślimakowa, 14 – łożysko, 15 – przekładnia obiegowa (planetarna), 16 – „dwójka” nieprzesuwna (na podstawie: M. Hebda, A. Wachal 1980)



Rys. 4.8.2. Przekrój wzdłużny maszyny Amslera przeznaczonej do badania tarcia i zużycia.

1 – rejestrator pracy tarcia, 2 – rejestrator momentu tarcia, 3 – obciążenie dynamometru wahadłowego, 4 – próbka, 5 – przeciwróbka, 6 – silnik napędowy, 7- skala obciążenia, 8 – korpus obudowy, 9 – sprężyna obciążająca przeciwróbkę, 10 – mimośród ruchu poziomego, 11 – „dwójka” nieprzesuwna (opracowano na podstawie: M. Hebda, A. Wachal 1980)



Maszyna typu Amsler charakteryzuje się następującymi parametrami:

- pomiar temperatury – termoparą,
- szerokość próbki: 10 [mm],
- szerokość przeciwpróbki: 10 [mm],
- średnica zewnętrzna próbki od  $\varnothing$  30 [mm] do  $\varnothing$  50 [mm],
- średnica zewnętrzna przeciwpróbki od  $\varnothing$  30 [mm] do  $\varnothing$  50 [mm],
- prędkość obrotowa próbki: 200 [obr.min] lub 400 [obr/min],
- układ obciążający – sprężyna o sile nacisku  $0 \div 250$  [N],
- regulacja obciążenia – ciągła,
- charakterystyka obciążenia – statyczna,
- układ pomiarowy momentu tarcia – dynamometr wahadłowy,
- prędkość obrotowa przeciwpróbki:  $60 \div 120$  [obr/min].

Próbie odporności na zatarcie na maszynie Amslera przeprowadza się wg normy **PN-88/H-04337**.



Maszyna Amslera  
Typ: A 135  
Prod.: Wolpert  
Werkstoffprüfmaschinen  
G.m.b.H

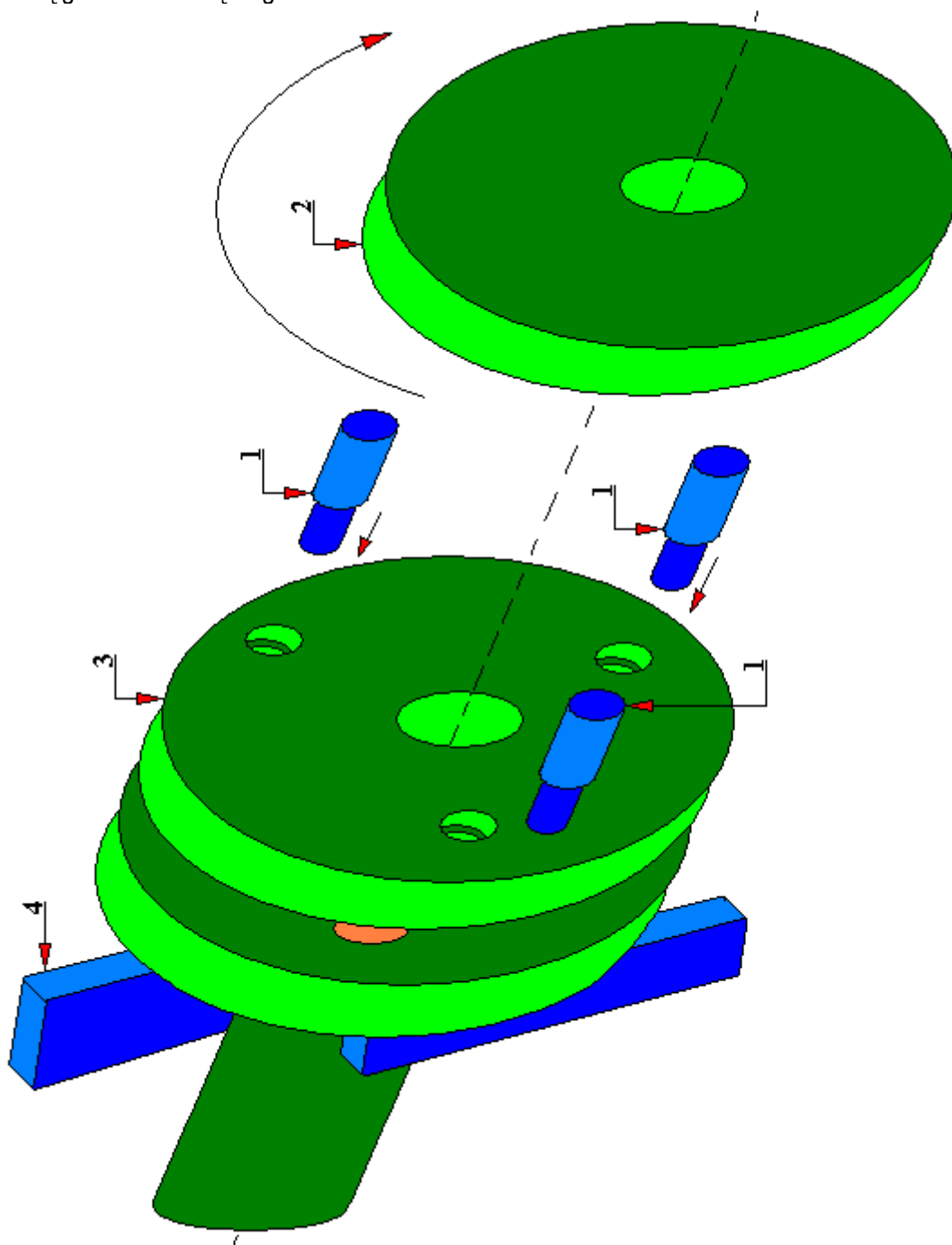
Rys. 4.8.3. Widok ogólny maszyny Amslera. Uniwersytet Zielonogórski. (fot. J. Mikołajczyk)

Modernizacja węzła tarcowego maszyny Amslera (rys. 4.8.4) polega na zmianie skojarzenia trącego tarcza-tarcza na skojarzenie typu trzpień-tarcza w układzie trzech próbek (trzpieni) i przeciwpróbki (tarczy). Przyczyną tej modernizacji była konieczność dostosowania istniejącego zaplecza technicznego do potrzeb badawczych. Autorami tej konstrukcji są Klaudiusz Lenik, Krzysztof Dziedzic, Mariusz Barszcz oraz Mykhailo Pashechko. Zmodernizowana głowica badawcza (rys. 4.8.4) zbudowana jest z następujących elementów:

- tarczy głowicy,
- ramienia głowicy (pełni on rolę elementu oporowego uniemożliwiającego obrót głowicy wokół własnej osi; równocześnie wraz z umieszczonym na nim mostkiem tensometrycznym tworzy czujnik mierzący siłę tarcia),
- uchwytu głowicy służącego do mocowania głowicy w korpusie tribotestera, jednocześnie przenosząc obciążenie z układu dźwigni do węzła tarcia przeciwpróbka-próbka.

Dzięki zastosowaniu specjalnego kosza możliwe jest przeprowadzanie badań badanego węzła tarcia w warunkach tarcia suchego lub przy zastosowaniu płynnych środków smarnych oraz przy stosowaniu ścierniwa.

W zmodernizowanym węźle tarciovym maszyny Amslera badane próbki mają kształt walca lub prostopadłościanu, natomiast przeciwpróbka ma kształt tarczy. Elementem ruchomy w tym skojarzeniu tarciovym jest przeciwpróbka. Natomiast próbki (od 3 do 6 sztuk) pozostają w spoczynku i współpracują ślizgowo z tarczą przeciwpróbki. Próbki mocowane są w uchwycie za pomocą gwintu lewoskrętnego.

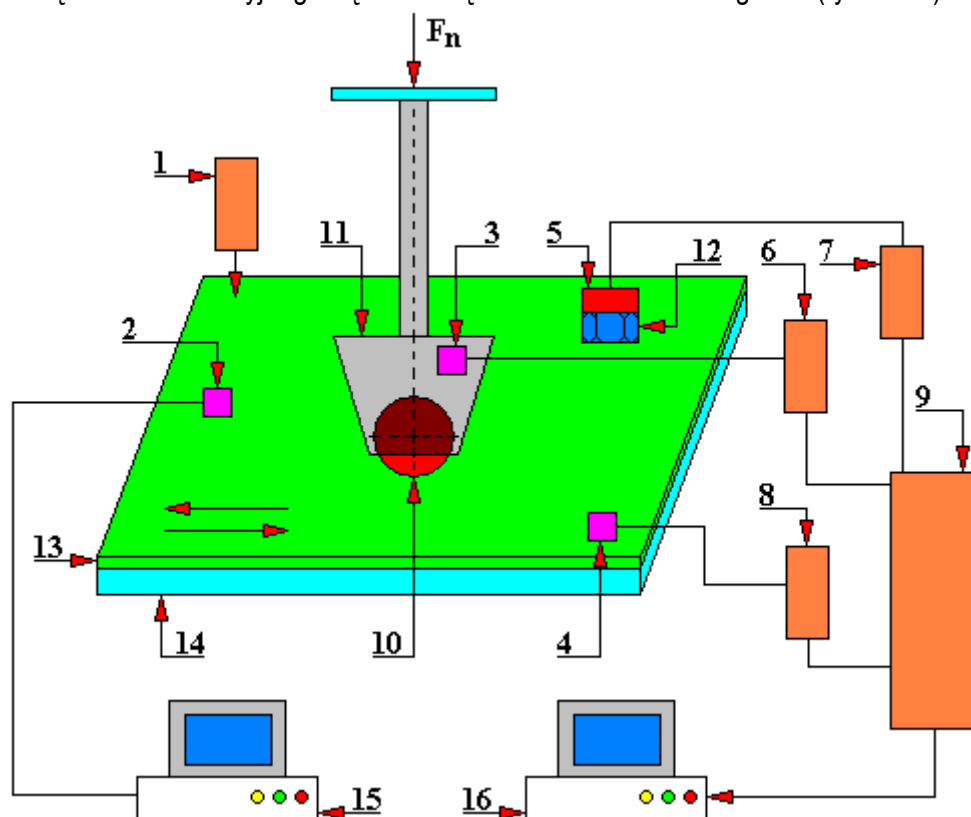


Rys. 4.8.4. Model zmodernizowanej głowicy badawczej maszyny Amslera

1 – próbka (trzcina), 2 – ruchoma przeciwpróbka (tarcza), 3 – uchwyt próbek, 4 – ramię głowicy (opracowano na podstawie: K. Lenik, K. Dzedzic, M. Barszcz, M. Pashechko „Modernizacja węzła tarciovym maszyny Amslera z przystosowaniem do badań powłok z materiałów eutektycznych w układzie trzcina –tarcza” Tribologia 3/2008)

#### 4.9. Stanowisko do badań tribologicznych z rejestracją sygnałów emisji akustycznej

Tribologiczne stanowisko badawcze z rejestracją sygnałów emisji akustycznej składa się z węzła tarcia typu „kula-powierzchnia płaska” oraz układu pomiaru emisji akustycznej. Autorami tego rozwiązania konstrukcyjnego są Anna Piątkowska oraz Jacek Jagielski (rys. 4.9.1).



Rys. 4.9.1. Schemat stanowiska badawczego z rejestracją sygnałów emisji akustycznej

1 – układ sterujący przesuwem obiektów trących, 2 – czujnik piezoelektryczny pomiaru siły tarcia, 3 – wysokoczęstotliwościowy czujnik emisji akustycznej, 4 – wysokoczęstotliwościowy czujnik emisji akustycznej, 5 – akcelerometr, 6 – kondycjoner, 7 – wzmacniacz sygnałów emisji akustycznej, 8 – wzmacniacz sygnałów emisji akustycznej, 9 – karta pomiarowa emisji akustycznej, 10 – ceramiczna kulka (próbka), 11 – uchwyt kulki, 12 – specjalna nakrętka pośrednia, 13 – powłoka chromu (przeciwpróbka), 14 – szklana szyba, 15 – komputer przeznaczony do pomiaru siły tarcia, 16 – komputer przeznaczony do pomiarów emisji akustycznej,  $F_n$  – siła nacisku (opracowano na podstawie: A. Piątkowska, J. Jagielski „Opis stanowiska badawczego z rejestracją sygnałów emisji akustycznej” Tribologia 3/2008)

Układ pomiarowy emisji akustycznej niniejszego stanowiska badawczego zbudowany jest z czujnika wysokoczęstotliwościowego 3, czujnika wysokoczęstotliwościowego 4 oraz akcelerometru 5.

Wyniki pomiarów sygnałów akustycznych, które są mierzone podczas tarcia, rejestrowane są i analizowane za pomocą programu FlexPro na komputerze 15. Program ten umożliwia m. in. wyznaczenie deskryptorów częstotliwościowych i czasowych charakteryzujących zachodzące podczas procesu tarcia rodzaje uszkodzeń powierzchni np. pęknięcia, akumulacji produktów zużycia, odrywania warstwy od podłoża, ścierania.

W przedstawionym stanowisku badawczym parę trącą stanowi ceremiczna kulka 10 oraz warstwa chromu 13 o grubości 2 [μm] na podłożu szklanym 14.

Podczas procesu tarcia emitowane są przez współpracujące elementy sygnały wibroakustyczne oraz emisja akustyczna. Sygnały te zawierają informację o przebiegu badanego procesu tarcia. Różne rodzaje węzłów tarcowych prawdopodobnie emitować będą różne sygnały

wibroakustyczne, ponieważ często różny jest ich charakter pracy. Analiza rejestrowanych sygnałów akustycznych może informować użytkownika urządzenia, maszyny roboczej o zachodzących w czasie procesu tarcia np. uszkodzeniach powierzchni trących, procesach deformacji, przemianach fazowych, mikrozderzeniach wierzchołków chropowatości, reakcjach chemicznych. Obszar wiedzy w tym zakresie jest na chwilę obecną mało poznany. Powstałe w czasie trwania tarcia sygnały mogą równocześnie pochodzić z kilku/kilkunastu źródeł, zachodzić na siebie i częściowo zniekształcać/modyfikować otrzymane wyniki. Autorzy niniejszego stanowiska jednak przewidują, że możliwe będzie na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych zebranie informacji na temat zainicjowania i rozwoju uszkodzeń oraz określenia ich wielkości i rodzaju.

W czasie współpracy ceramicznej kulki 10 po warstwie chromu 13 występuje tarcie ślizgowe przy postępowo-zwrotnym ruchu trących elementów. Siła nacisku  $F_n$  zadawana jest na uchwyt kulki 11. Uchwyt kulki 11, a tym samym ceramiczna kulka 10 nie wykonuje ruchu obrotowego. Wartość siły nacisku  $F_n$  może być stała lub zmienna. Autorzy tego stanowiska realizowali badania przy następujących wartościach siły  $F_n$ : 0,8 [N], 1,6 [N] oraz 2,4 [N]. Wówczas otrzymane podczas tarcia naciski powierzchniowe były rzędu ok. 1 [GPa].

Prawdopodobnie ze względu na duże ilości otrzymywanych informacji z zainstalowanych na stanowisku badawczym czujników oraz potrzeby odizolowania torów pomiarowych Autorzy niniejszej konstrukcji zdecydowali się na zastosowanie dwóch niezależnych torów pomiarowych rejestrujących otrzymywane dane na dwóch różnych komputerach 15 i 16. Pierwszy tor przeznaczony jest tylko do rejestracji zmian siły tarcia. Natomiast drugi do pomiarów sygnałów wibroakustycznych i emisji akustycznej. Stanowisko badawcze wyposażone jest poza tym we własny układ sterujący ruchami pary tarciowej przy pomocy trzeciego komputera (nie pokazano go na rysunku). Dzięki czemu możliwe jest programowanie takich parametrów przemieszczenia jak:

- przyspieszenie,
- czas przesuwu,
- prędkość poślizgu,
- liczba cykli ruchu posuwisto-zwrotnego,
- czas zatrzymania w pozycjach skrajnych (krajowych).

Jako elementy wykonawcze zastosowano:

- czujnik piezoelektryczny 2 pomiaru siły tarcia typu M209C12 PCB wbudowany w uchwyt próbki 11, dokonujący zapisu siły tarcia z częstotliwością 10 pomiarów na sekundę,
- czujnik wysokoczęstotliwościowy 3 emisji akustycznej typu VS550-Z o zakresie częstotliwości 400÷700 [kHz] zamocowany w uchwycie 11 kulki ceramicznej 10,
- czujnik wysokoczęstotliwościowy 4 emisji akustycznej typu VS700-D o zakresie częstotliwości 60÷1950 [kHz] umieszczony bezpośrednio na powierzchni ceramicznej kulki 10,
- akcelerometr 5 typu M352A60 o zakresie mierzonych częstotliwości wibroakustycznych 6 [Hz]÷60 [kHz] przymocowany do powierzchni ceramicznej kulki 10 poprzez przyklejenie specjalnej nakrętki pośredniej,
- kondycjoner 6 typu PA-1000 o wzmacnieniu 90 [dB] przeznaczony do wzmacniania i kompensowania sygnałów wibroakustycznych,
- wzmacniacz sygnału emisji akustycznej 7 typu AEP3 mający zmienne wzmacnienie o wartościach 34÷49 [dB],
- wzmacniacz sygnału emisji akustycznej 8 typu AEP3 mający również zmienne wzmacnienie o wartościach 34÷49 [dB],

- karta pomiarowa 9 produkcji firmy Energocontrol, posiadająca cztery wejściowe kanały analogowe i wyposażona w przetwornik 24-bitowy pracujący z maksymalną częstotliwością próbkowania 2 [MHz/kanał].

Na niniejszym stanowisku mogą być realizowane testy wielocykliczne (ruch postępowo-zwrotny współpracujących elementów odbywa się w powtarzanym wielokrotnie cyklu przemieszczeń) lub jednokrotny. Pomiary sygnałów emisji akustycznej wykonywane były w odcinkach czasu 60-sekundowych.

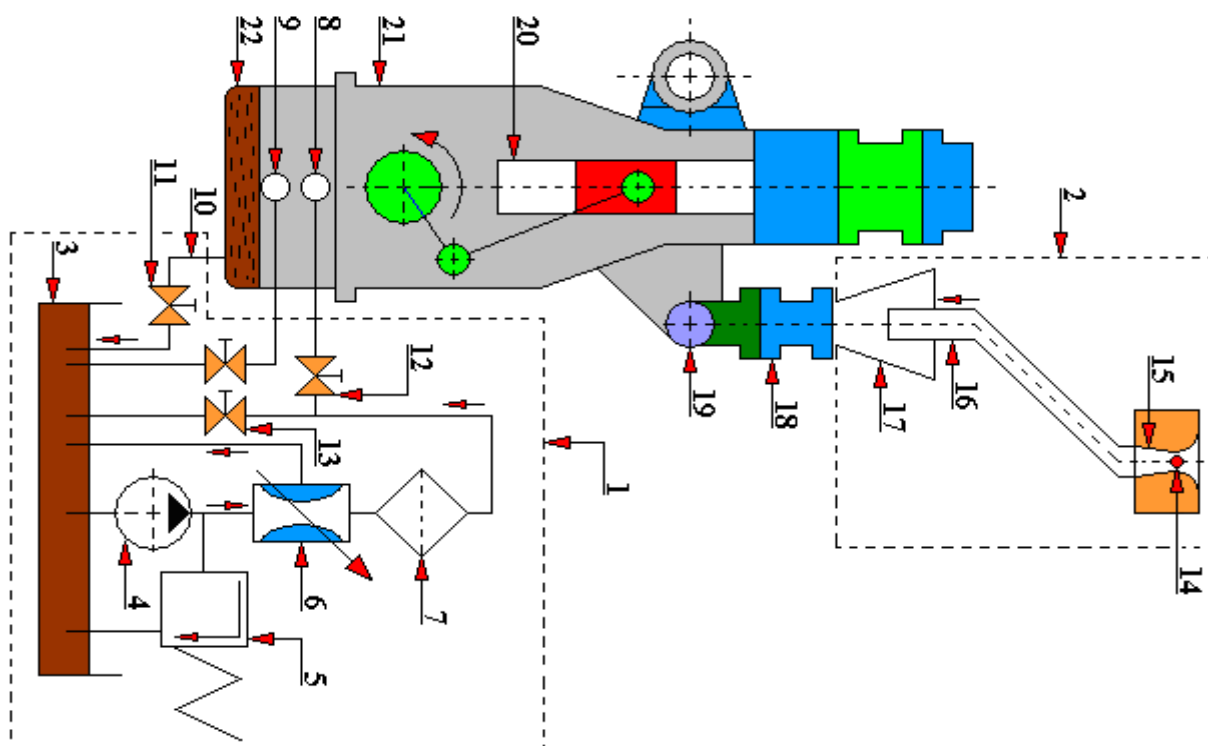
Jako parametry przeznaczone do analizy sygnału emisji akustycznej Autorzy niniejszego stanowiska badawczego wybrali:

- zmiany amplitudy sygnałów w funkcji częstotliwości (charakterystyka czasowo-częstotliwościowa STFT – *Short-Time Fourier Transform*),
- zmiany amplitudy sygnału emisji akustycznej w funkcji czasu (liczba impulsów powyżej założonego poziomu dyskryminacji, długość trwania impulsów o maksymalnej amplitudzie, wartość maksymalna amplitudy, odstępy czasu pomiędzy impulsami).

Autorzy przedstawionej tu konstrukcji stwierdzają, że niniejsze stanowisko badawcze umożliwia detekcję i rejestrację sygnałów wibroakustycznych emisji akustycznej związanej z mikrotarciem, pomiar sygnałów impulsowych, określenie zapoczątkowania i rozwoju uszkodzenia węzła tarcowego oraz określenie jego rodzaju.

#### 4.10. Stanowisko do przyspieszonego badania zużycia grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych

Niniejsze stanowisko badawcze (rys. 4.10.1 oraz 4.10.2) zostało opracowane przez Laboratorium Badań Silników Politechniki Rzeszowskiej i jest przeznaczone do badań kwalifikacyjnych oraz badań tribologicznych w warunkach zwiększonego zapylenia powietrza silnika spalinowego.



Rys. 4.10.1. Schemat stanowiska badawczego przeznaczonego do przyspieszonego badania zużycia grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych

1 – układ hydrauliczny dodatkowego oczyszczania oleju, 2 – zespół podający materiał pylisty, 3 – zbiornik oleju, 4 –

pompa oleju, 5 – zawór redukujący, 6 – regulator przepływu, 7 – dodatkowy filtr oleju, 8 – króciec dopływowy, 9 – króciec odpływowy, 10 – przewód spustowy, 11 – zawór odcinający, 12 – zawór odcinający, 13 – zawór odcinający, 14 – urządzenie do dokładnego wydawania i rozpylania materiału pylistego, 15 – dysza zbieżno-rozbieżna de Levala, 16 – przewód doprowadzający materiał pylisty, 17 – dysza zbieżna, 18 – kolektor dolotowy, 19 – gaźnik, 20 – grupa tłokowo-cylindrowa, 21 – skrzynia korbowa, 22 – miska olejowa (opracowano na podstawie: Pawlus P., Michalski J. 2008 „Metodyka badania grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych”. Tribologia 3/2008)

Wyposażenie niniejszego stanowiska badawczego obejmuje hamulec cieczowy (hydrauliczny) i sterowanie (nie pokazane na rysunkach), układ podawania i rozpylania pyłu drogowego, układ dokładnej filtracji oleju smarującego, układ zasilania paliwem oraz układ chłodzenia powietrzem i chłodzenia oleju smarującego (nie przedstawione na rysunkach). Zasada działania tego urządzenia badawczego jest następująca. Przed zamontowaniem danego silnika przeznaczonego do badań wykonuje się wszelkie pomiary metrologiczne układu tłok-cylinder, które obejmują pomiar m. in.:

- luzów sworzni w otworach tłoka,
- wysokości rowków pierścieniowych w tłokach,
- średnic tłoków,
- luzów w zamkach,
- średnic cylindrów w dwóch przekrojach i na kilku wysokościach,
- szerokości i wysokości pierścieni tłokowych.

Po ich wykonaniu i ponownym zmontowaniu silnika, montuje się go na stanowisku do badań zużyciowych. Dodatkowo podłączane są do niego czujniki monitoringu przebiegu procesu jego pracy. Następnie przeprowadza się próby wg opracowanego programu badań. Niniejsze stanowisko badawcze umożliwia kontrolowanie zanieczyszczenia powietrza wlotowego do komory spalania. Innym wymaganiom podlegają np. tłokowe silniki lotnicze, innym sprężarki tłokowe, więc sam charakter przebiegu badań jest różny do różnych jednostek napędowych w zależności od ich przeznaczenia. Po zakończeniu prób następuje demontaż badanego silnika celem ponownego wykonania pomiarów metrologicznych. Na podstawie otrzymanych wyników wyciąga się wnioski celem np. unowocześnienia konstrukcji.

System tłok-cylinder występuje m. in. w takich tłokowych maszynach roboczych jak:

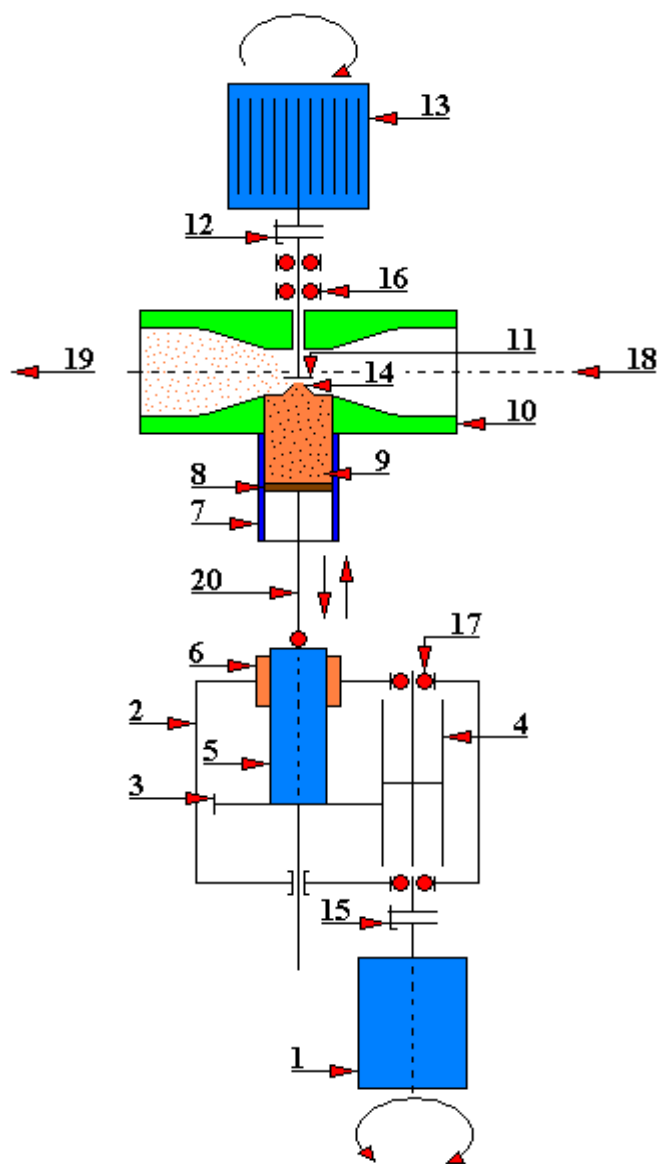
- silniki spalinowe,
- sprężarki,
- pompy.

Analiza tribologiczna tego systemu obejmuje zazwyczaj tuleję cylindrową, tłok oraz pierścienie. Czynniki decydującymi o trwałości silnika spalinowego są warunki tarcia oraz związane z tym zużycie współpracujących elementów układu tłokowo-cylindrowego [Priest M., Taylor C.M. 2000]. Wzdłuż drogi tłoka występuje zmienna grubość filmu olejowego. Skutkuje to tym, że mamy różne warunki smarowania, od granicznego, mieszanego aż do hydrodynamicznego na środkowym odcinku drogi tłoka. Jako główne rodzaje zużycia cylindrów Autorzy prac [Włodarski J.K. 1982, Hebda M., Wachal A. 1980, Pawlus P. 1999] wymieniają:

- ściernie (dominujące),
- korozyjne,
- adhezyjne,
- zmęczeniowe,
- kawitacyjne.

Stanowisko do przyspieszonego badania zużycia grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych umożliwia przeprowadzenie badań kwalifikacyjnych w zakresie sprawdzenia cech technicznych i właściwości oraz oceny ekonomiczno-technicznej przydatności, jak również do oceny i określenia trwałości i niezawodności danego silnika spalinowego.

Na rysunku 4.10.2. został przedstawiony schemat dozownika pyłu zastosowanego na stanowisku badawczym do przyspieszonego badania grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych. Zasada jego pracy jest następująca. W tulei 7 znajduje się materiał pylisty 9 o znanej granulacji, na który działa tłok 8. Tłok ten wypycha pył przez dyszę 14. Pył z dyszy trafia do komory de Levala 10, w której znajduje się tarcza 11. Tarcza ta dodatkowo rozdrabnia i dozuje materiał pylisty 9. Dysza de Levala 10 jest zasilana powietrzem 18. Wylotem 19 rozdrobniony materiał pylisty 9 kierowany jest do badanego silnika spalinowego. Pracą tłoka 8 steruje silnik krokowy 1, który za pomocą przekładni zębatej oraz wężła śruba 5 – nakrętka 6 przesuwa ramię 20 tłoka 8 o zadaną wartość. Tarcza 11 posiada oddzielny niezależny napęd od silnika elektrycznego 13.

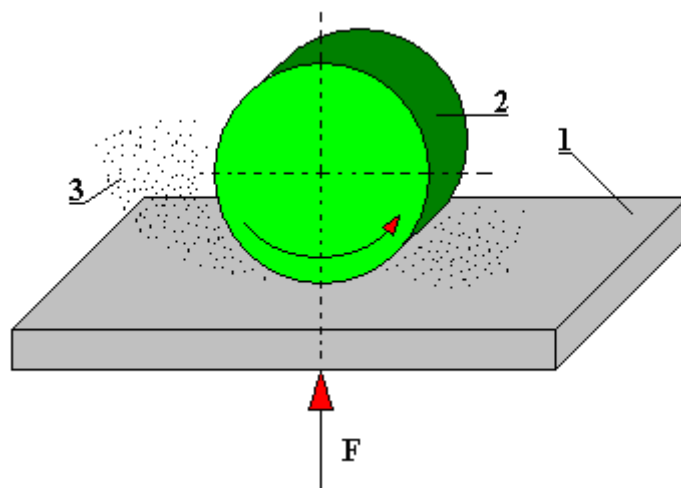


Rys. 4.10.2. Schemat dozownika pyłu stanowiska badawczego przeznaczonego do przyspieszonego badania zużycia grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych

1 – silnik skokowy, 2 – kadłub przekładni mechanicznej, 3 – koło zębate walcowe, 4 – koło zębate walcowe, 5 – śruba napędu tłoczka, 6 – nakrętka, 7 – tuleja, 8 – tłok, 9 – materiał pylisty, 10 – dysza zbieżno-rozbieżna de Levala, 11 – tarcza rozdrabniająca, 12 – sprzęgło podatne, 13 – silnik elektryczny, 14 – dysza, 15 – sprzęgło elastyczne, 16 – łożysko, 17 – łożysko, 18 – wlot sprężonego czystego powietrza, 19 – wylot sprężonego powietrza zanieczyszczonego materiałem pylistym, 20 – ramię tłoka (opracowano na podstawie: Pawlus P., Michalski J. 2008 „Metodyka badania grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych”. Tribologia 3/2008)

#### 4.11. Urządzenie do badania ścieralności T-07

Stanowisko badawcze o symbolu T-07 jest komercyjnym urządzeniem produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu przeznaczonym do oceny odporności na zużycie materiałów lub pokryć metalowych podczas tarcia o luźne ścierniwo. Schemat ogólny metody badawczej wykorzystywanej do badania odporności na zużywanie ścierniwo przedstawiono na rysunku 4.11.1. Z zasobnika podawane jest ścierniwo w obszar współpracy pary ciernej, którą stanowi próbka z badanego materiału oraz obracająca się rolka gumowa. Siła docisku wywierana jest zazwyczaj przez próbkę badanego materiału, która najczęściej jest stalowa. Istnieje tu możliwość regulacji zarówno siły docisku badanej próbki jak również liczby obrotów gumowej rolki.



Rys. 4.11.1. Zasada działania urządzenia do badania ścieralności T-07 o styku współpracujących elementów typu walec – płaszczyna

1 – próbka badanego materiału, 2 – gumowa rolka, 3 – ścierniwo,  $F$  – siła docisku próbki do przeciwpróbki

Podstawą do opracowania konstrukcji tribotestera T-07 jest urządzenie do badania ścieralności materiałów konstrukcyjnych wg patentu PL 160596, którego twórcami są Jan Wulczyński i Witold Piekoszowski. Rozwiązanie konstrukcyjne przedstawione w tym zgłoszeniu patentowym zostało omówione szerzej w pracy [Mikołajczyk J. 2018].

Na rys. 4.11.2 przedstawiono schemat urządzenia T-07 w widoku od czoła. Tribotester ten zbudowany jest z trzech zespołów:

- zespołu napędowego,
- zespołu obciążającego,
- zespołu podawania materiału ściernego.

W skład zespołu napędowego wchodzi: silnik elektryczny 10, który napędza wałek główny 5 poprzez zębatą przekładnię pasową 9 i jednostopniową przekładnię zębatą 8. Wałek ten osadzony jest w korpusie 12 za pomocą dwóch łożysk stożkowych 6. Na drugim końcu wałka głównego 5 zamocowana jest przeciwpróbka 2. Przeciwpróbka ta ma kształt rolki, której zewnętrzna część jest wykonana z odpowiedniego gatunku gumy. Guma ta jest wulkanizowana do stalowej piasty. Budowa przeciwpróbki 2 zastosowanej w urządzeniu do badania ścieralności T-07 została przedstawiona na rys. 4.11.10.

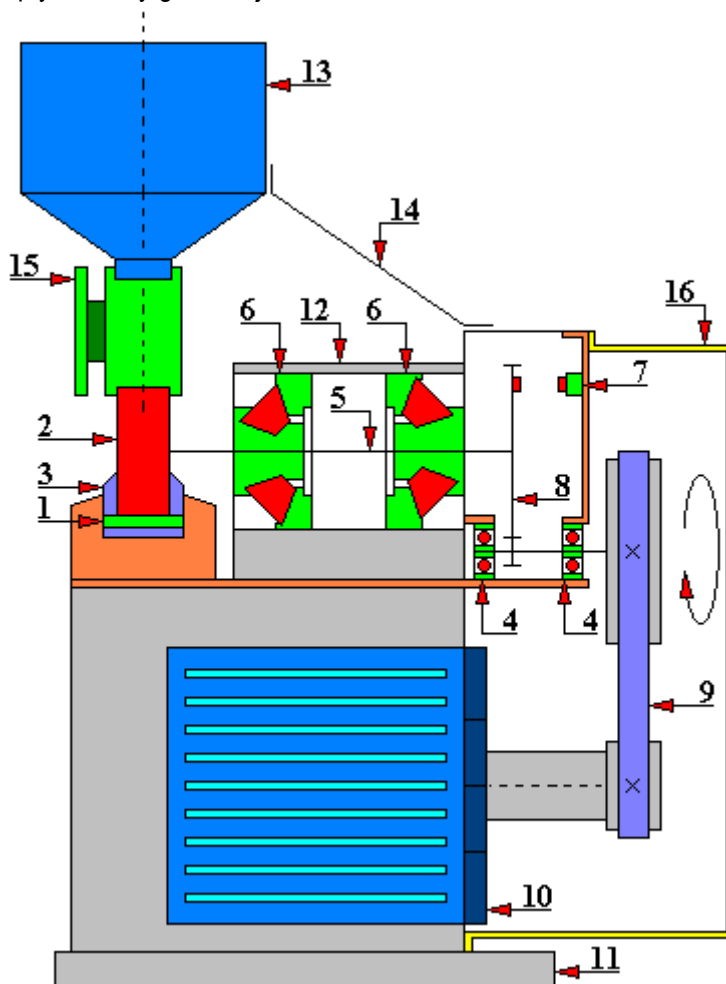
Próbka 1, przedstawiona dokładniej na rys. 4.11.11, dociskana jest do przeciwpróbki 2 za pomocą zespołu obciążającego. Zespół ten składa się z dźwigni 6 (rys. 4.11.13), wieszaka 17, obciążników 7 oraz obejmującej próbkę 1.

Dźwignia 6 (rys. 4.11.3) w tym rozwiązaniu konstrukcyjnym jest podparta na dwóch łożyskach igiełkowych. Wieszak 17 przeznaczony jest do nakładania zadanego obciążenia.



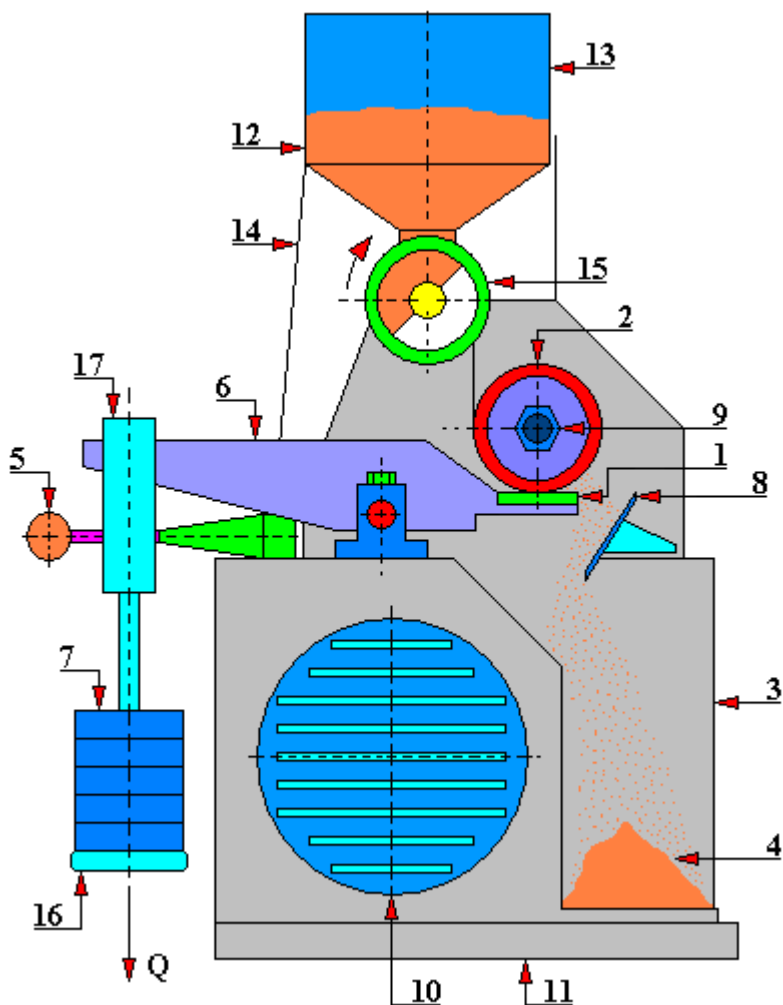
Kształt obciążników stalowych zastosowanych w urządzeniu T-07 został przedstawiony na rys. 4.11.12.

Zespół podawania materiału ściernego (rys. 4.11.3) zbudowany jest ze zbiornika na materiał ścierny 13 oraz z dozującego zaworu obrotowego 15. Zużyty materiał ścierny kierowany jest rynienką 8 do zbiornika 3. Dozujący zawór obrotowy 15 posiada otwór o regulowanej średnicy, znajdujący się z pobliżu badanego węzła tarcia. Ruch ścierniwa w kierunku węzła tarcia odbywa się pod wpływem siły grawitacji.



Rys. 4.11.2. Schemat urządzenia do badania ścieralności T-07. Widok od czopa

1 – badana próbka, 2 – przeciwpróbka, 3 – obejmująca mocująca próbkę, 4 – łożysko kulkowe jednorzędowe, 5 – wał główny, 6 – łożysko stożkowe, 7 – czujnik licznika obrotów, 8 – jednostopniowa przekładnia zębata, 9 – zębata przekładnia pasowa, 10 – silnik elektryczny, 11 – podstawa, 12 – korpus, 13 – zbiornik na materiał ścierny, 14 – usztywnienie zbiornika na materiał ścierny, 15 – dozujący zawór obrotowy, 16 – osłona napędu.



Rys. 4.11.3. Schemat urządzenia do badania ścieralności T-07. Widok od strony węzła obciążenia

1 – badana próbka, 2 – przeciwpółka, 3 – pojemnik na zużyty materiał ścierny, 4 – zużyty materiał ścierny, 5 – blokada dźwigni obciążającej, 6 – dźwignia obciążająca, 7 – obciążniki, 8 – rynienka odprowadzająca zużyty materiał ścierny, 9 – nakrętka mocująca przeciwpółkę, 10 – silnik elektryczny, 11 – podstawa, 12 – materiał ścierny, 13 – zbiornik na materiał ścierny, 14 – uszczelnienie zbiornika na materiał ścierny, 15 – dozujący zawór obrotowy, 16 – podstawa wieszaka, 17 – wieszak, Q – zadane obciążenie.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono:

- widok urządzenia od strony węzła tarcia (rys. 4.11.4),
- widok od strony napędu (rys. 4.11.5),
- widok od strony zespołu obciążenia (rys. 4.11.6),
- sposób mocowania próbki w tribotesterze (rys. 4.11.7),
- schemat współpracy węzła tarcia rolka (przeciwpółka) – powierzchnia płaska (próbka) po zamontowaniu jej w obejmie (rys. 4.11.8),
- sposób mocowania przeciwpółki (rys. 4.11.9),
- budowę przeciwpółki (rys. 4.10.10),
- badaną próbkę (rys. 4.10.11).



Rys. 4.11.4. Urządzenie do badania ścieralności T-07. Widok od strony węzła tarcia. Pracownia tribologii Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. (fot. J. Mikołajczyk)

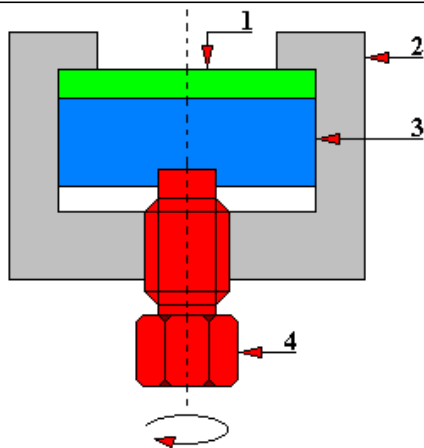


Rys. 4.11.5. Urządzenie do badania ścieralności T-07. Numer fabryczny T-07/118/04 z 2004 roku. Widok od strony napędu. Pracownia tribologii Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. (fot. J. Mikołajczyk)



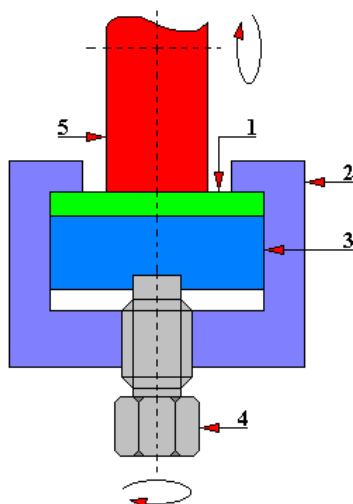
Rys. 4.11.6. Urządzenie do badania ścieralności T-07. Numer fabryczny T-07/118/04 z 2004 roku. Widok od strony zespołu obciążenia. Pracownia tribologii Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (fot. J. Mikołajczyk).

Na rys. 4.11.7 przedstawiono sposób mocowania próbki w urządzeniu do badania ścieralności T-07. Badaną próbkę 1 należy umieścić między obejmę 2 i dźwignię 3. Następnie dokręcić śrubą 4. Przy wymianie próbki na nową w/w czynności należy wykonać w odwrotnej kolejności. Zarówno podczas mocowania próbki 1 jak i jej zdejmowania konieczne jest zdemontowanie rynienki odprowadzającej zużyte ścierniwo do pojemnika na zużyty materiał ścierny.



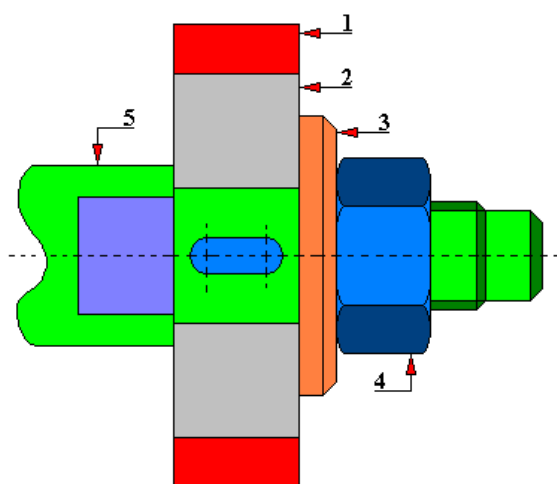
Rys. 4.11.7. Sposób mocowania próbki w urządzeniu do badania ścieralności T-07

1 - badana próbka, 2 – obejmą, 3 – dźwignia obciążająca, 4 - śruba



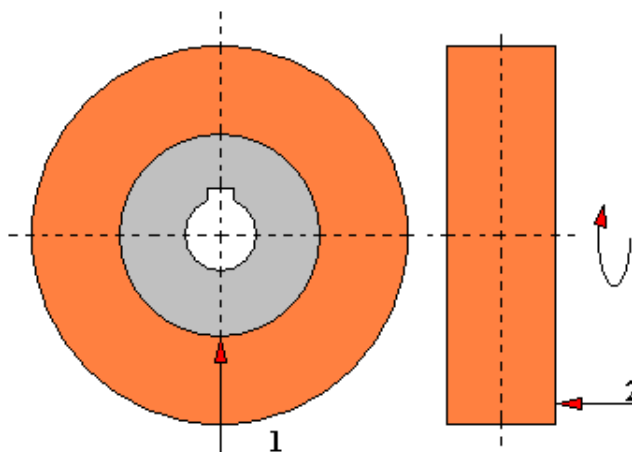
Rys. 4.11.8. Schemat współpracy węzła tarcia w urządzeniu do badania ścieralności T-07

1 - badana próbka, 2 – obejmą, 3 – dźwignia obciążająca, 4 – śruba, 5 – obrotowa przeciwpółka w postaci tarczy gumowej



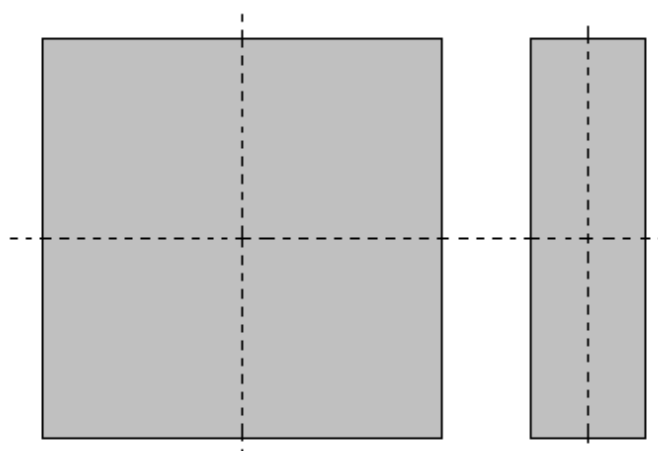
Rys. 4.11.9. Sposób mocowania przeciwpółki zastosowany w urządzeniu do badania ścieralności T-07

1 – przeciwpółka (część tarczy gumowej), 2 – przeciwpółka (część piasty stalowej), 3 – stalowa podkładka dociskowa, 4 – nakrętka, 5 – wałek główny

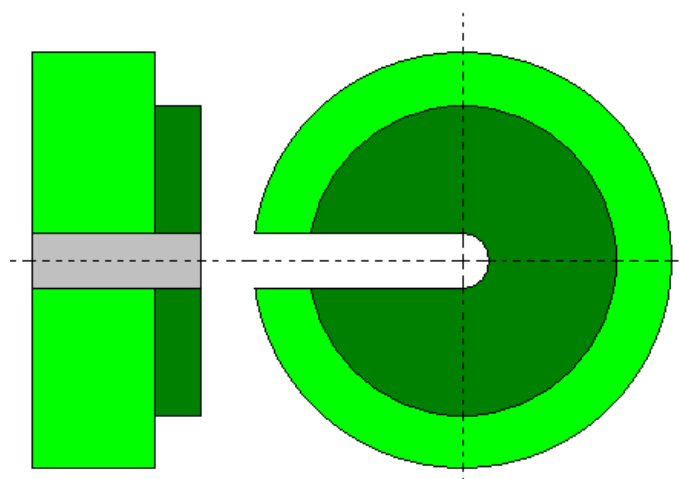


Rys. 4.11.10. Budowa przeciwpróbki zastosowanej w urządzeniu do badania ścieralności T-07

1 – stalowa piasta, 2 – zewnętrzna część przeciwpróbki wykonana z gumy o odpowiednich właściwościach



Rys. 4.11.11. Badana próbka (najczęściej stalowa) o wymiarach 30x30x3 [mm] zastosowana w urządzeniu do badania ścieralności T-07



Rys. 4.11.12. Kształt obciążników stalowych zastosowanych w urządzeniu do badania ścieralności T-07.

Tribotester ten wyposażony jest dodatkowo w układ kontrolno-pomiarowy (rys. 4.11.13) służący do zliczania liczby obrotów przeciwpróbki i wyłączania silnika napędowego, po wykonaniu zadanej liczby obrotów. Rolę tego układu pełni sterownik PS-2 Controller zbudowany

ze wzmacniacza impulsów, cyfrowego panelu odczytowego, interfejsu oraz ze złącza komputerowego.

Zasada badania przeprowadzona przy pomocy tribotestera T-07 polega na tym, że jednakowych warunkach pracy (obciążenia i prędkości) dokonuje się tarcia próbek, wykonanych z badanego i wzorcowego materiału. Częstki ściernie podawane są do strefy styku tarcia i przyciskane do próbki obracającą się gumową rolką. Pomiar polega na porównaniu zużycia próbek – wzorcowej i z badanego materiału.

Urządzenie to posiada tylko jedną rolkę gumową (przeciwpróbkę) w zestawie. Czyli przeciwpróbka jest tylko jednego rodzaju. Ogranicza to w pewnym zakresie obszar zastosowania tego urządzenia. Twardość badanych materiałów lub powłok metalowych musi być z tego powodu mniejsza niż 1400 HV oraz różnica twardości na głębokości 0,3 [mm] nie powinna przekraczać 10%. Przy stosowaniu jako próbek materiałów porowatych, wielkość ziaren badanego materiału ściernego nie może być większa niż 0,1 [mm].



Rys. 4.11.13. Sterownik PS-2 Controller zastosowany do programowania parametrów pracy urządzenia do badania ścieralności T-07. Pracownia tribologii Wydziału Nauk Techniczny Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (fot. J. Mikołajczyk).

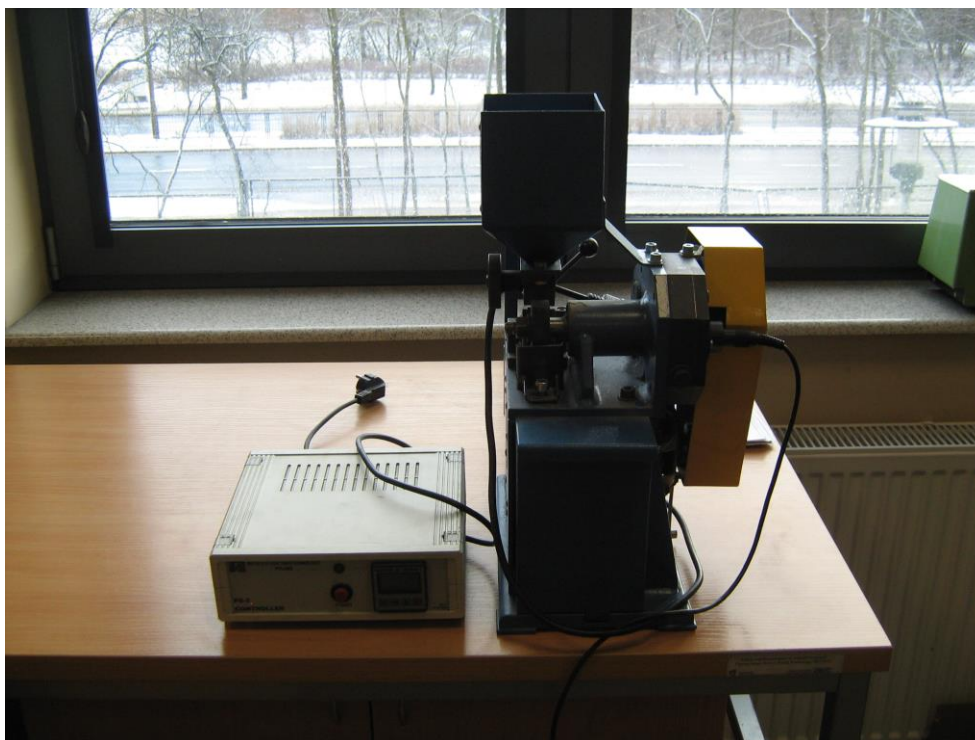
Do niewątpliwych zalet urządzenia T-07 należy zaliczyć:

- możliwość przeprowadzania badań z szeroką gamą rodzajów ścierniwa,
- z różnymi materiałami (lub powłokami) próbek,
- z próbkami praktycznie po dowolnej obróbce cieplnej, cieplno-chemicznej czy powierzchniowej,
- w różnych warunkach temperaturowych i wilgotnościowych,
- prosta konstrukcja,
- niezawodne działanie,
- łatwa obsługa.

Do wad tego urządzenia można zaliczyć:

- ograniczoną do sześciu cyfr wyświetlacza sterownika PS-2 Controller liczbę obrotów przeciwpróbki, tym samym liczba ta nie może przekroczyć wartości jednego miliona,

- możliwość przeprowadzania badań tylko w warunkach statycznych, tzn. stała prędkość obrotowa przeciwpróbki oraz stała ilość podawanego materiału ściernego.



Rys. 4.11.14. Przygotowany do przeprowadzania badań tribotester T-07. Pracownia tribologii Wydziału Nauk Techniczny Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (fot. J. Mikołajczyk).

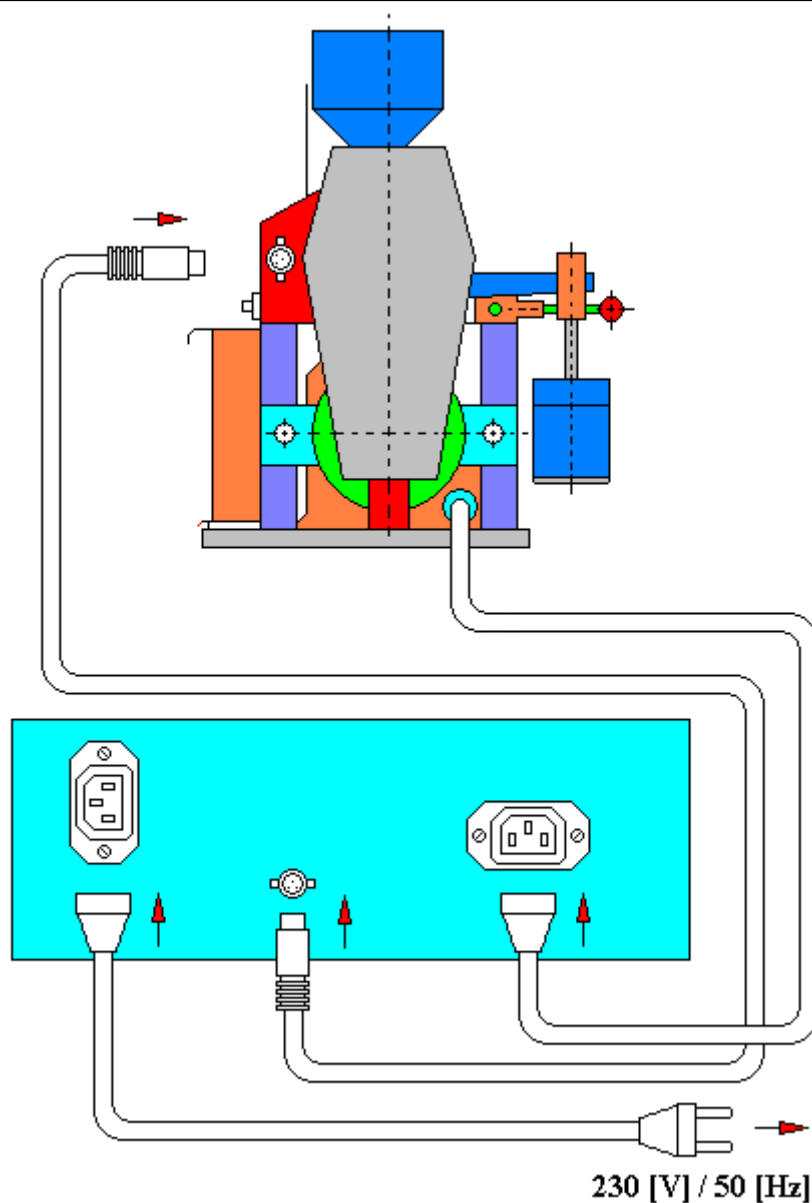
Badania odporności na zużywanie ściernie przeprowadzone za pomocą tribotestera T-07 przy użyciu luźnego ścierniwa wykonuje się zgodnie z wymogami normy *Ensuring of wear resistance* .... GOST 23.208-79.

Na rys. 4.11.15 przedstawiono sposób podłączenia do sieci elektrycznej sterownika PS-2 Controller oraz tribotestera T-07. Sterownik PS-2 zliczając impulsy otrzymane z czujnika obrotów zamontowanego w tribotesterze porównuje je z zadaną wartością obrotów. Z chwilą zrównania się tych wartości, odłącza zasilanie od urządzenia. Jednostką napędową niniejszego tribotestera jest silnik elektryczny zawierający w sobie hamulec. Z chwilą otrzymania napięcia, hamulec jest luzowany. Z chwilą braku napięcia hamulec zadziała. To rozwiązanie jest podobne jak zastosowane w suwnicach na halach produkcyjnych (z chwilą odcięcia napięcia elektrycznego ciężar zawieszony na zawiesiach suwnicy nie spada). Ten sposób rozwiązania konstrukcyjnego powoduje, że z chwilą gdy sterownik PS-2 Controller odłącza napięcie, rolka przeciwpróbki natychmiast się zatrzymuje. W przeciwnym razie mogłaby się jeszcze obracać przez pewien czas z powodu sił bezładności. Tym samym liczba obrotów byłaby albo mogła by być różna nawet dla tego samego zastosowanego/badanego ścierniwa. Takie zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne jest korzystne nawet dla samej dokładności przeprowadzanych badań.

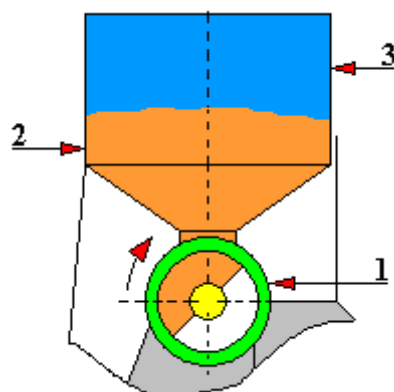
Na rysunkach 4.11.16 oraz 4.11.17 przedstawiono dwa rodzaje sposobów dozowania materiału ściernego do obszaru tarcia w urządzeniach przeznaczonych do badania ścieralności. Zarówno w jednym jak i drugim rozwiązaniu ścierniwo przemieszcza się grawitacyjnie.

Zastosowana rolka gumowa przeciwpróbki w tribotesterze T-07 ma średnicę  $\varnothing 50$  [mm] oraz szerokość  $\neq 15$  [mm]. Twardość zewnętrznej gumowej powłoki wynosi  $78\div 85$  [°ShA].



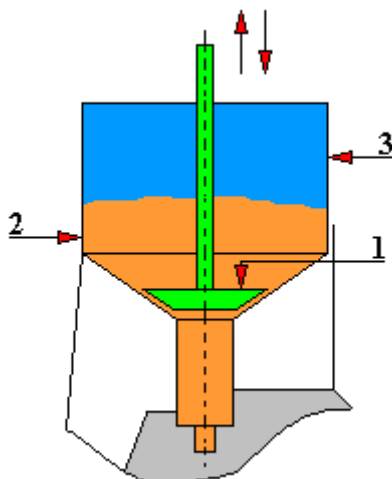


Rys. 4.11.15. Sposób podłączenie zasilania napięcia do sterownika PS-2 Controller oraz do tribotestera T-07.



Rys. 4.11.16. Sposób rozwiązania dozowania materiału ściernego zastosowanego w urządzeniu T-07

1 – obrotowy zawór dozujący, 2 – materiał ścierny, 3 – zbiornik na ścierniwo



Rys. 4.11.17. Sposób rozwiązania dozowania materiału ściernego zastosowany w innych trybosteterach przeznaczonych do badania ścieralności

1 – grzybek dozujący materiał ścierny, 2 – materiał ścierny, 3 – zbiornik na ścierniwo

## 4.12. Tribotester T-20 typu kula-tarcza

Stanowisko badawcze o symbolu T-20 jest komercyjnym urządzeniem produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu. Urządzenie to umożliwia przeprowadzanie badań odporności na zużywanie ściernie materiałów konstrukcyjnych i powłok nanoszonych na trące elementy maszyn zgodnie z metodą określoną w normie PN-EN 1071-6:2008. W szczególności za pomocą tego urządzenia można określić metodą ball-cratering odporność na zużycie ściernie w zależności od:

- prędkości obrotowej,
- obecności i rodzaju ścierniwa,
- drogi tarcia,
- zadanego obciążenia.

Za pomocą trybosteteru T-20 typu kula-tarcza można wyznaczyć następujące parametry:

- współczynnik szybkości zużywania powłoki  $K_c$ ,
- współczynnik szybkości zużywania podłoża  $K_s$ ,
- grubość badanej powłoki przeciwzużyciowej,
- charakterystykę zużyciową badanego skojarzenia tarcowego,
- charakterystykę tarciovą badanego skojarzenia materiałów.

Urządzenie to charakteryzuje się następującymi parametrami węzła tarcia:

- a) stałe obciążenie styku w czasie próby badawczej (od 0,1 [N] do 25 [N]),
- b) rodzaj ruchu: ślizganie stałe w czasie próby badawczej z regulowaną bezstopniowo prędkością w zakresie  $0 \div 0,4$  [m/sek],
- c) rodzaj styku: powierzchnia kulista-powierzchnia płaska, utworzony przez próbkę (tarczę) dociskaną do obracającej się przeciwpróbki (kula).

Średnica zastosowanej w trybosteterze T-20 przeciwpróbki (kuli) wynosi  $\varnothing 25,4$  [mm], natomiast średnica próbki (tarczy)  $\varnothing 25,4$  [mm]. Niniejsze stanowisko badawcze jest nowoczesnym rozwiązaniem konstrukcyjnym umożliwiającym ciągły pomiar i rejestrację następujących mierzonych parametrów:

- siły tarcia,
- przemieszczenia,
- drogi tarcia (liczby obrotów),
- temperatury otoczenia węzła tarcia.

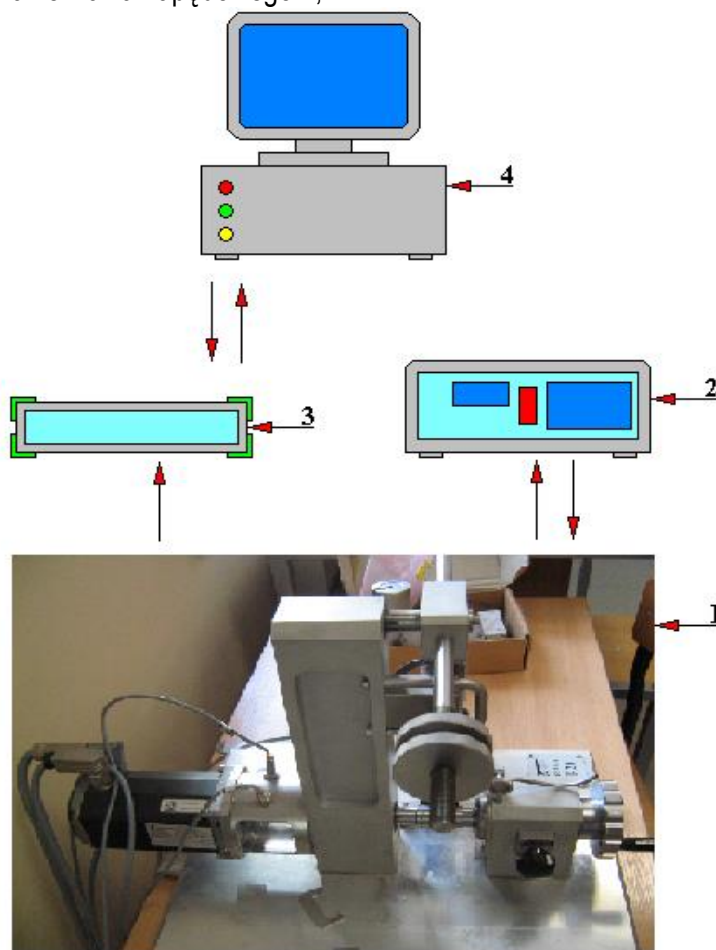
W skład omawianego stanowiska badawczego (rys. 4.12.1) wchodzi trzy niezależne urządzenia:

- a) tribotester T-20,
- b) sterownik BT-20,
- c) wzmacniacz Spider 8.

Elementem zespalaającym te trzy urządzenia jest system komputerowy z oprogramowaniem T-20. Opcjonalnie to stanowisko badawcze może być dodatkowo wyposażone w system zasilania zawieszoną ścierną o dowolnym składzie, mieszanej przy zastosowaniu mieszadła magnetycznego i podawanej do strefy tarcia przy użyciu pompki.

Na rysunkach 4.12.2 oraz 4.12.3 przedstawiono ogólny schemat budowy omawianego tribotestera T-20. W skład jego budowy wchodzi:

- a) podstawa 1 wykonana w formie płyty do której zamocowane są czujniki pomiarowe, oprzyrządowania pomocnicze oraz inne zespoły urządzenia;
- b) zespół napędowy składający się z silnika prądu stałego 9, sprzęgła kształtowego elastycznego 10, wałka napędowego 7 oraz wspornika napędu 2 przymocowanego do podstawy 1 za pomocą śrub, w którym znajdują się łożyska toczne stanowiące ułożyskowanie wałka napędowego 7;

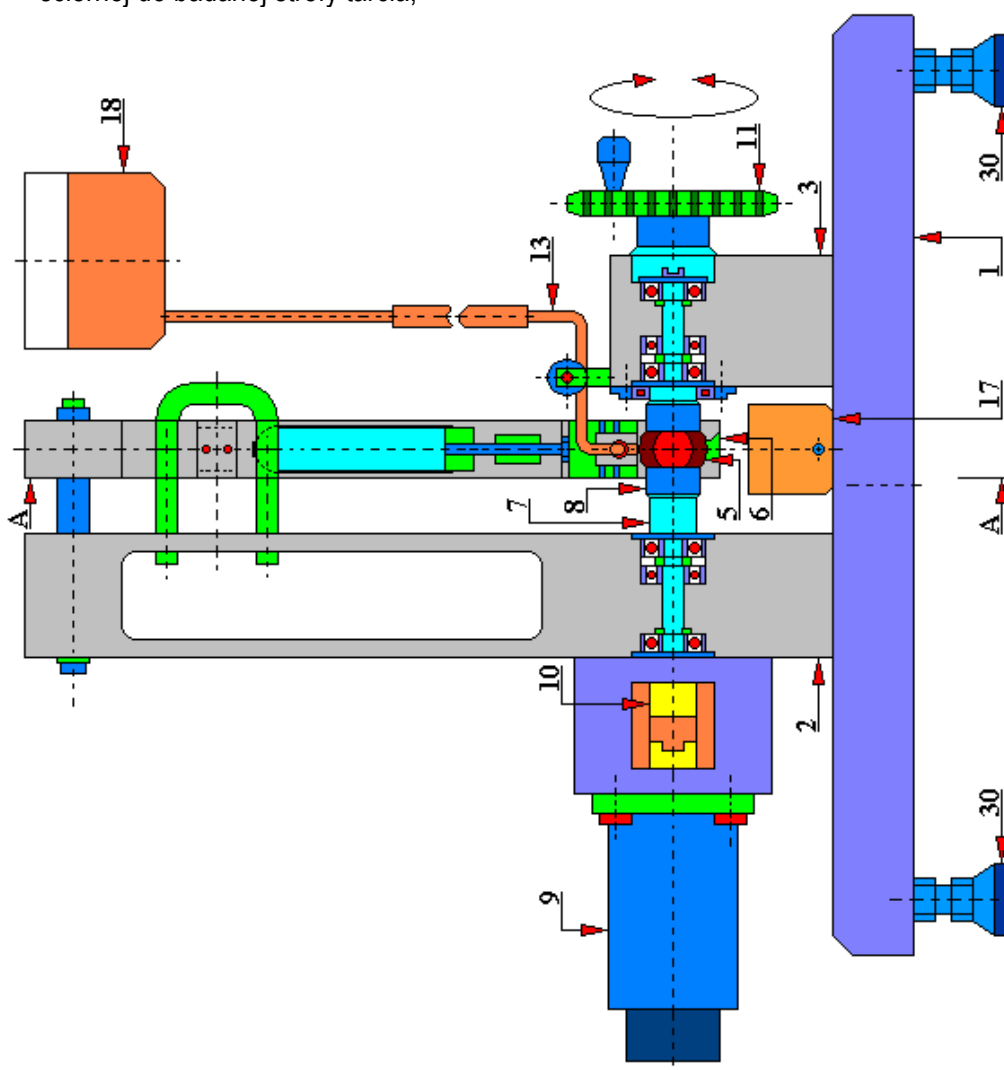


Rys. 4.12.1. Schemat ogólny stanowiska badawczego typu kula-tarcza

1 – tribotester T-20, 2 – sterownik BT-20, 3 – wzmacniacz Spider 8, 4 – komputer typu PC wraz z oprogramowaniem T-20

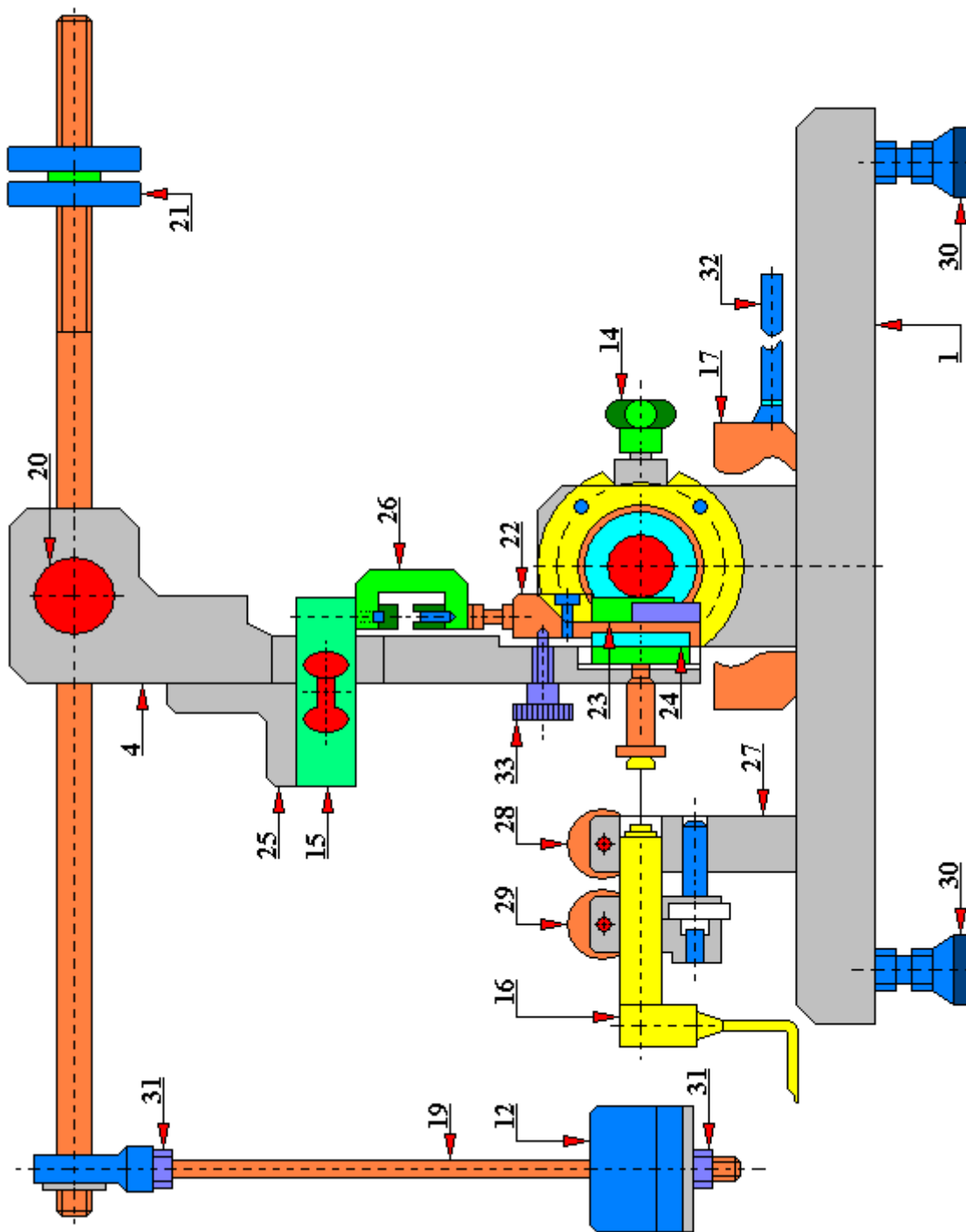
- a) zespół docisku, składający się z wspornika docisku 3, pokrętła dociskowego 11 połączonego mechanizmem śrubowym ze wspornikiem docisku 3 oraz wałka 8 ułożyskowanego w pokrętła dociskowym 11 za pomocą łożysk tocznych; zespół docisku przeznaczony jest do mocowania przeciwpróbki;

- b) zespół dźwigni obciążającej, składający się z dźwigni 4, która jest obrotowo ułożyskowana na sworzniu 20, który z kolei zamocowany jest we wsporniku napędu 2; na prawej gwintowanej części dźwigni 4 zamocowane są obciążniki wyważające 21, natomiast na lewej części dźwigni 4 w specjalnym wyźłobieniu zamocowana jest zawieszka 19 z szalką służącą do nakładania obciążników 12 wywierających nacisk na badany węzeł tarcia; zespół dźwigni obciążającej przeznaczony jest do swobodnego przemieszczania zespołu próbki w płaszczyźnie poziomej i pionowej oraz do zerowania nacisku przy nieobciążonym styku;
- c) zespół mocowania próbki składający się z uchwytu 22, płytki dociskowej 23, która jest mocowana do uchwytu 22 za pomocą śruby i łożyska liniowego kulkowego 24, zapewniającego możliwość przesuwu uchwytu w kierunku działania siły tarcia; zespół mocowania próbki (tarczy) usytuowany jest na dolnej części dźwigni 4;
- d) zespół podawania zawieszki (opcjonalnie), składający się ze zbiornika zawieszki 18, podłączonej do niego rurki dopływowej zawieszki 13 oraz zbiornika 17 na przepracowaną zawieszinę; zespół podawania zawieszki przeznaczony jest do podawania zawieszki ścierniej do badanej strefy tarcia;



Rys. 4.12.2. Schemat ogólny budowy tribotestera T-20 typu kula-tarcza

1 – podstawa, 2 – wspornik napędu, 3 – wspornik docisku, 5 – przeciwpróbka, 6 – próbka, 7 – wałek napędowy, 8 – łożysko toczne wałka, 9 – silnik prądu stałego, 10 – sprzęgło kształtowe elastyczne, 11 – pokrętko dociskowe, 13 – rurka dopływowa zawieszki, 17 – zbiornik na przepracowaną zawieszinę, 18 – zbiornik na zawieszinę, 30 – nóżka regulacyjna



Rys. 4.12.3. Schemat ogólnej budowy tribotestera T-20 typu kula-tarcza dla przekroju A-A

1 – podstawa, 2 – wspornik napędu, 3 – wspornik docisku, 4 – dźwignia, 5 – przeciwpróbka, 6 – próbka, 7 – wałek napędowy, 8 – łożysko toczne wałka, 9 – silnik prądu stałego, 10 – sprzęgło kształtowe elastyczne, 11 – pokrętło dociskowe, 12 – obciążniki, 13 – rurka dopływowa zawiesziny, 14 – blokada, 15 – tensometryczny przetwornik siły, 16 – indukcyjny czujnik przemieszczenia, 17 – zbiornik na przepracowaną zawieszinę, 18 – zbiornik na zawieszinę, 19 – zawieszka z szalką, 20 – sworzeń, 21 – obciążniki wyważające, 22 – uchwyt, 23 – płytka dociskowa, 24 – łożysko liniowe kulkowe, 25 – wspornik, 26 – popychacz, 27 – obejmą, 28 – pokrętło zabezpieczające, 29 – pokrętło zacisku przetwornika, 30 – nóżka regulacyjna, 31 – nakrętka, 32 – uchwyt zbiornika na przepracowaną zawieszinę, 33 – radełkowana śruba ustalająca

- a) zespół czujnika siły tarcia, składający się ze wspornika 25, przetwornika tensometrycznego 16 oraz popychacza 26; wspornik 25 zamocowany jest na dźwigni obciążającej 4 za pomocą śrub, natomiast siła tarcia przekazywana jest z węzła tarcia poprzez popychacz 26; zespół czujnika siły tarcia przeznaczony jest do zamocowania przetwornika tensometrycznego 16 w płaszczyźnie działania siły tarcia;
- b) zespół przetwornika przemieszczenia, składający się z indukcyjnego przetwornika przemieszczeń 16 zamocowanego w obejmie 27 przy pomocy pokrętła zacisku 29; obejmka 27 posiada również pokrętło zabezpieczające 28 przeznaczone do zabezpieczenia położenia przetwornika przemieszczenia po jego precyzyjnym ustawieniu; zespół przetwornika przemieszczenia służy do pomiaru przemieszczenia spowodowanego zużyciem się elementów badanej pary tarczej.

Na rysunku 4.12.4 przedstawiono stanowisko badawcze typu kula-tarcza zbudowane z zestawu urządzeń: sterownika BT-20, wzmacniacza Spider 8 oraz tribotestera T-20, natomiast na rys. 4.12.5 tribotester T-20 w widoku od strony węzła obciążenia. Węzeł tarcia typu kula-tarcza zastosowany w tribotesterze T-20 został przedstawiony na rys. 4.12.6.



Rys. 4.12.4. Stanowisko badawcze typu kula-tarcza zbudowane z zestawu urządzeń: sterownika BT-20, wzmacniacza Spider 8 oraz tribotestera T-20. Pracownia tribologii Wydziału Nauk Techniczny Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (fot. J. Mikołajczyk).



Rys. 4.12.5. Tribotester T-20 (widok od strony węzła obciążenia). Pracownia tribologii Wydziału Nauk Techniczny Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (fot. J. Mikołajczyk).

Sterownik BT-20 (rys. 4.12.11 i 4.12.12), wchodzący w skład układu pomiarowo-sterującego urządzenia T-20, umożliwia:

- zliczanie liczby obrotów za pomocą czujnika impulsów Impulse Counter;
- wyświetlanie aktualnej prędkości obrotowej;
- rozpoczynanie biegu testowego z poziomu sterownika po wyłączeniu funkcji PC Control (przyciski Start/Stop);
- ustawianie prędkości obrotowej wrzeciona przy pomocy regulatora Speed Adjustment;
- automatyczne zatrzymanie napędu maszyny testującej w chwili osiągnięcia zadanej liczby obrotów.

Sterownik BT-20 pozwala, tak jak już to zostało zaznaczone wyżej, na ustawienie ilości obrotów oraz prędkości obrotowej tarczy testowej. Liczba obrotów obliczana jest według wzoru:

$$N = \frac{s}{\pi d}$$

gdzie:  $N$ - ilość obrotów,

$s$  – droga tarcia [m],

$d$ - średnica kuli [m],  $d = 0,0254$  [m]

Dla przykładu, drodze tarcia wynoszącej 1 kilometr odpowiada następująca ilość obrotów:

$$N = \frac{1000}{3,14 \cdot 0,0254} = 12538$$

Natomiast prędkość obrotową oblicza się według wzoru:

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot d}$$

95

gdzie:  $n$  – prędkość obrotowa [obr/min],  
 $v$  – prędkość poślizgu [m/sek],  
 $d$  – średnica kuli [m];  $d = 0,254$  [m].

Dla przykładu, przyjmując że założona prędkość poślizgu wynosi  $0,1$  [m/sek], prędkość obrotowa będzie równa:

$$n = \frac{60 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 0,0254} = 75 \text{ [obr/min]}$$



Rys. 4.12.6. Węzeł tarcia typu kula-tarcza zastosowany w triboterze T-20. Pracownia tribologii Wydziału Nauk Techniczny Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (fot. J. Mikołajczyk).

Wymiary gabarytowe (szerokość x wysokość x głębokość) zestawu badawczego są następujące:

- |                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| a) sterownik BT-20:     | 225x85x200 [mm], |
| b) wzmacniacz Spider 8: | 330x75x270 [mm], |
| c) triboter T-20:       | 440x350x510 [mm] |

Ciężar maszyny badawczej T-20 wynosi  $25$  [kg], wzmacniacza Spider 8:  $2,75$  [kg], natomiast sterownika BT-20:  $1,8$  [kg].

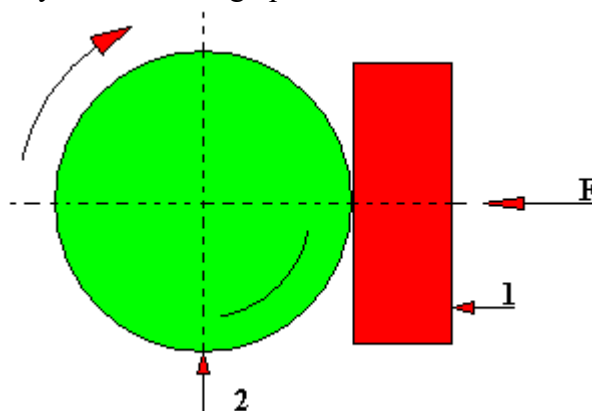


Wyniki szybkości zużycia ściernego powłoki  $K_c$  i szybkości zużycia podłoża  $K_s$  przy danej prędkości obrotowej, obciążeniu oraz zmiennej drodze tarcia oblicza się w oparciu o normę PN-EN 1071-6.

Równanie, które przyjmuje się za podstawę do wyznaczenia zużycia w przypadku przetarcia powłoki jest następujące:

$$S \cdot N = \frac{V_c}{K_c} + \frac{V_s}{K_s}$$

gdzie:  $S$  – droga poślizgu kuli,  
 $N$  – obciążenie normalne,  
 $V_c$  – objętość usuniętej powłoki,  
 $V_s$  – objętość usuniętego podłoża,  
 $K_s$  – szybkość zużywania ściernego podłoża,  
 $K_c$  – szybkość zużywania ściernego powłoki.

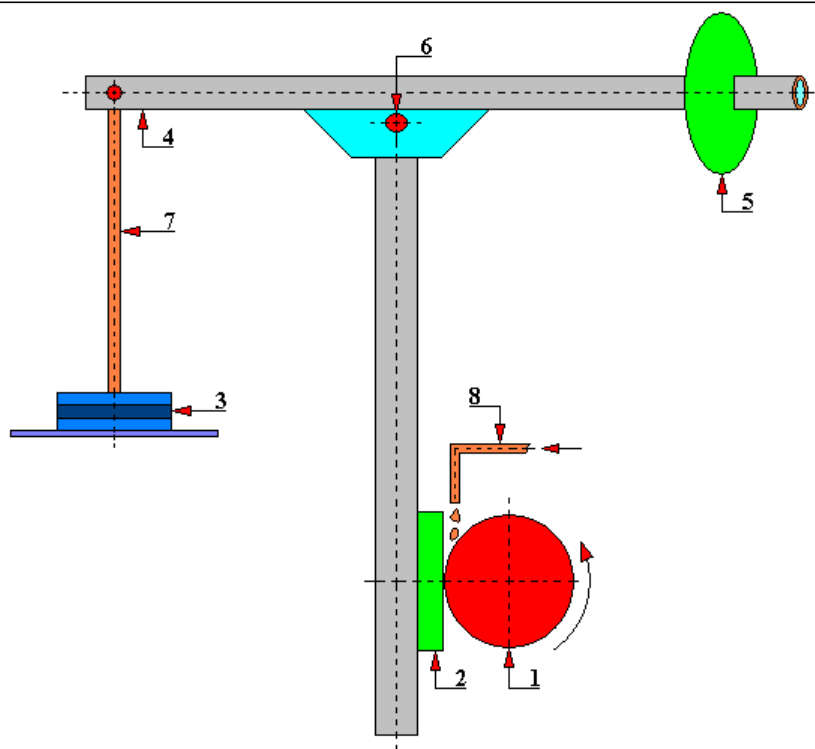


Rys. 4.12.7. Schemat węzła tarcia maszyny badawczej T-20

1 – nieruchoma badana próbka w postaci tarczy, 2 – obracająca się przeciwpróbka w postaci kuli,  $F$  – siła działająca na próbkę

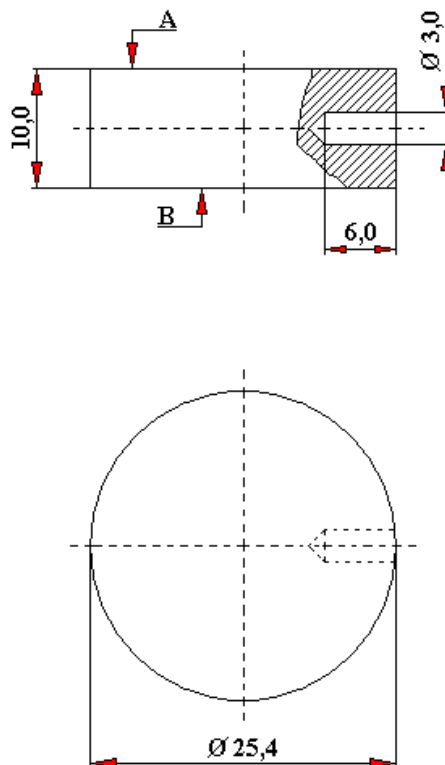
W ramach 5. Programu Ramowego Unii Europejskiej powstała inicjatywa opracowania metody testowania nazwanej roboczo ball-cratering [Gee i inni 2003]. Jest to metoda tzw. kulotestu (rys. 4.12.8), służąca do wyznaczania grubości powłok za pomocą pomiaru średnic kłaterów wytartych kulą (przeciwpróbka) w obecności zawiesiny ścierniej. Grubość powłok wyznacza się z uwzględnieniem możliwości zmian zarówno prędkości poślizgu jak też zmian obciążenia oraz kontroli zawiesiny ścierniej. Przeciwpróbka (kula) 1 obraca się na powierzchni próbki (nieruchoma tarcza) 2. Do strefy tarcia doprowadza się badaną i kontrolowaną zawiesinę ścierną przewodem zasilającym 8. W wyniku przeprowadzonego badania otrzymuje się kuliste wgłębienie (krater), które jest mierzone. Jeżeli badana powłoka nałożona na powierzchnię próbki (tarczy) nie zostanie w czasie badania przetarta, wówczas wyznacza się współczynnik zużywania powłoki  $K_c$ . Jeżeli natomiast w czasie przeprowadzania badań laboratoryjnych nastąpi przetarcie powłoki naniesionej na próbkę (tarczę), można wówczas obliczyć współczynnik zużywania powłoki  $K_c$  oraz współczynnik zużywania podłoża  $K_s$ .

Pomysł ten został zapisany w postaci projektu normy europejskiej PN-EN 1071-6:2008 i jest rozwijany w wielu ośrodkach naukowych, czego przykładem jest omawiany tu tribotester polskiej konstrukcji T-20 powstały na podstawie idei metody ball-cratering.



Rys. 4.12.8. Schemat zestawu badawczego do badania zużycia ściernego powłok metodą ball-cratering, które to badanie również można wykonywać na tribotesterze T-20

1 – przeciwpółka (kula), 2 – próbka (tarcza), 3 – obciążnik, 4 – dźwignia, 5 – przeciwwaga, 6 – punkt podparcia, 7 – zawieszka szalki obciążenia, 8 – przewód podający zawieszinę ścierną do obszaru tarcia



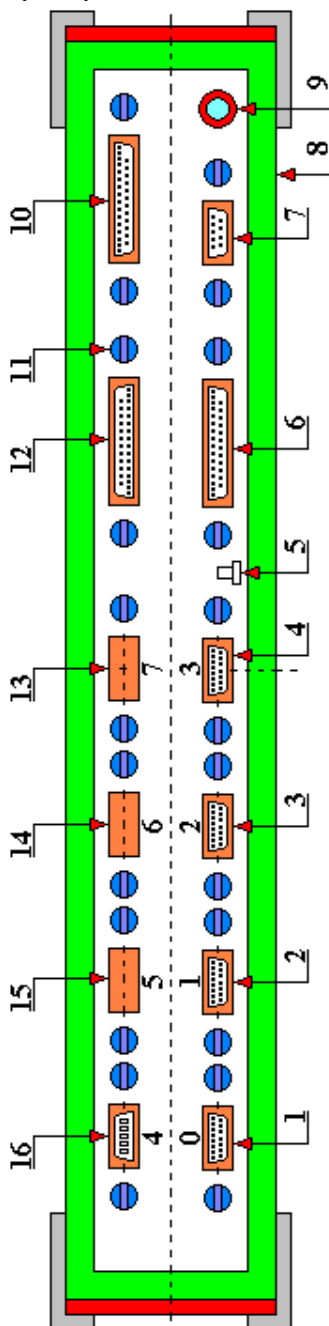
Rys. 4.12.9. Próbkę (tarcza) zastosowaną w tribotesterze T-20

A, B – powierzchnie tarcia

Po zakończonych badaniach producent tribotestera T-20 zaleca umycie za pomocą etanolu węzła tarcia, miejsc mocowania tarczy testowej, próbki, jej uchwytu oraz miejsc, które uległy zabrudzeniu przez użycie ścierniwa. Przykładowa procedura przygotowania próbek testowych została przedstawiona poniżej:

- a) odtłuszczenie w toluenie przez 5÷10 minut, najlepiej w myjce ultradźwiękowej,
- b) czyszczenie w heksanie przez 5 minut (również w myjce ultradźwiękowej),
- c) suszenie w suszarce przez ok. 20 minut w temperaturze 110÷120 [°C].

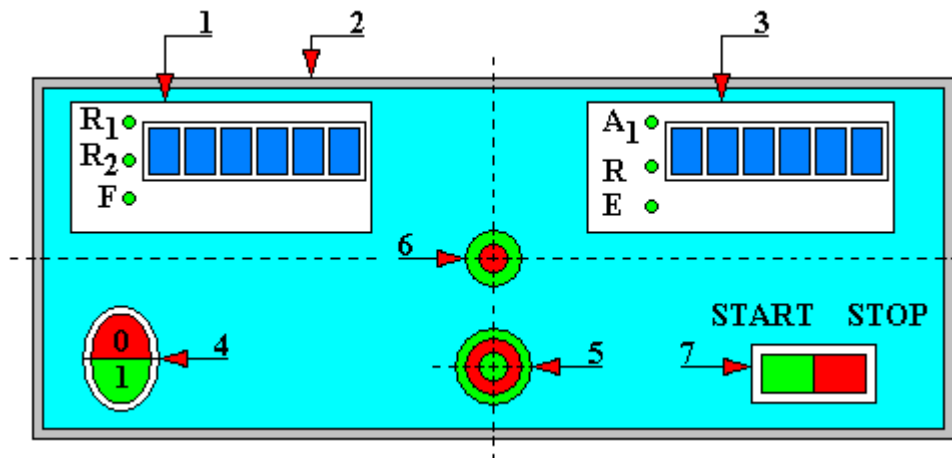
Producent tego urządzenia wyraźnie zaznaczył w dokumentacji techniczno-ruchowej, aby podczas dotykania próbek testowych stosować rękawiczki bawełniane. Natomiast przed użyciem próbek testowych należy przechowywać je w eksykatorze. Dbłość o pozorne drobiazgi może mieć istotny wpływ na wyniki otrzymywanych badań.



Rys. 4.12.10. Panel tylny wzmacniacza pomiarowego Spider 8

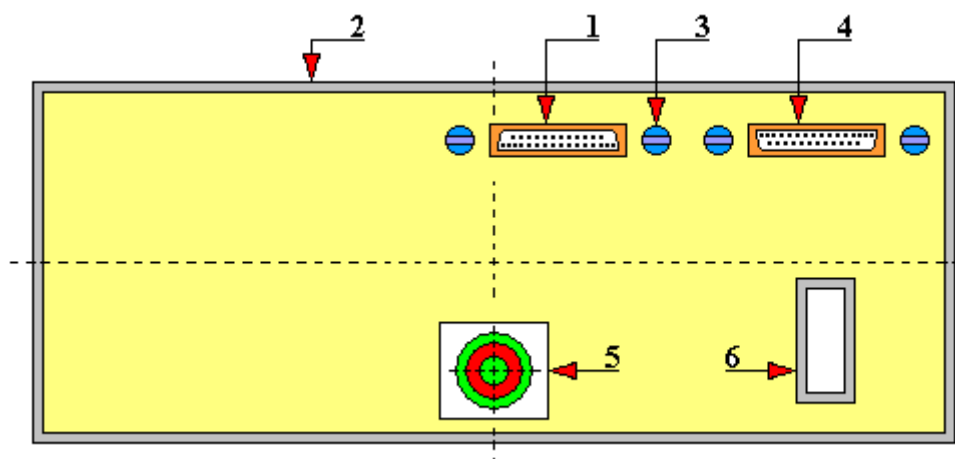
1 – port numer 0 piętnastopinowy (przeznaczony dla czujnika liczby obrotów), 2 – port numer 1 (przeznaczony dla

przetwornika przemieszczenia), 3 – port numer 2 piętnastopinowy (przeznaczony dla przetwornika siły tarcia), 4 – port numer 3 piętnastopinowy (wolny), 5 – zacisk uziemienia, 6 – port PC/Master dwudziestopięciopinowy (przeznaczony do komputera), 7 – port RS 232 (wolny), 8 – obudowa wzmacniacza, 9 – gniazdo zasilające wzmacniacza 12 V DC, 10 – gniazdo Digital I/O (przeznaczone dla sterownika BT-20), 12 – gniazdo wejścia drukarki dwudziestopięciopinowy, 13 – port wolny, 14 – port wolny, 15 – port wolny, 16 – port przeznaczony dla termopary



Rys. 4.12.11. Panel przedni sterownika BT-20

1 – licznik impulsów wskazujący ilość obrotów przeciwpróbki (kuli), 2 – obudowa, 3 – tachometr wskazujący prędkość obrotową przeciwpróbki (kuli) w obr/min, 4 – włącznik zasilania, 5 – pokrętło potencjometru przeznaczone do ustawiania prędkości obrotowej przeciwpróbki (kuli), 6 – wskaźnik wskazujący sposób uruchamiania biegu badawczego (gdy załączony: start z poziomu oprogramowania, gdy wyłączony: start z poziomu sterownika BT-20, 7 – przycisk służący do rozpoczynania/kończenia biegu badawczego z poziomu sterownika (najpierw należy wyłączyć wskaźnik nr 6)



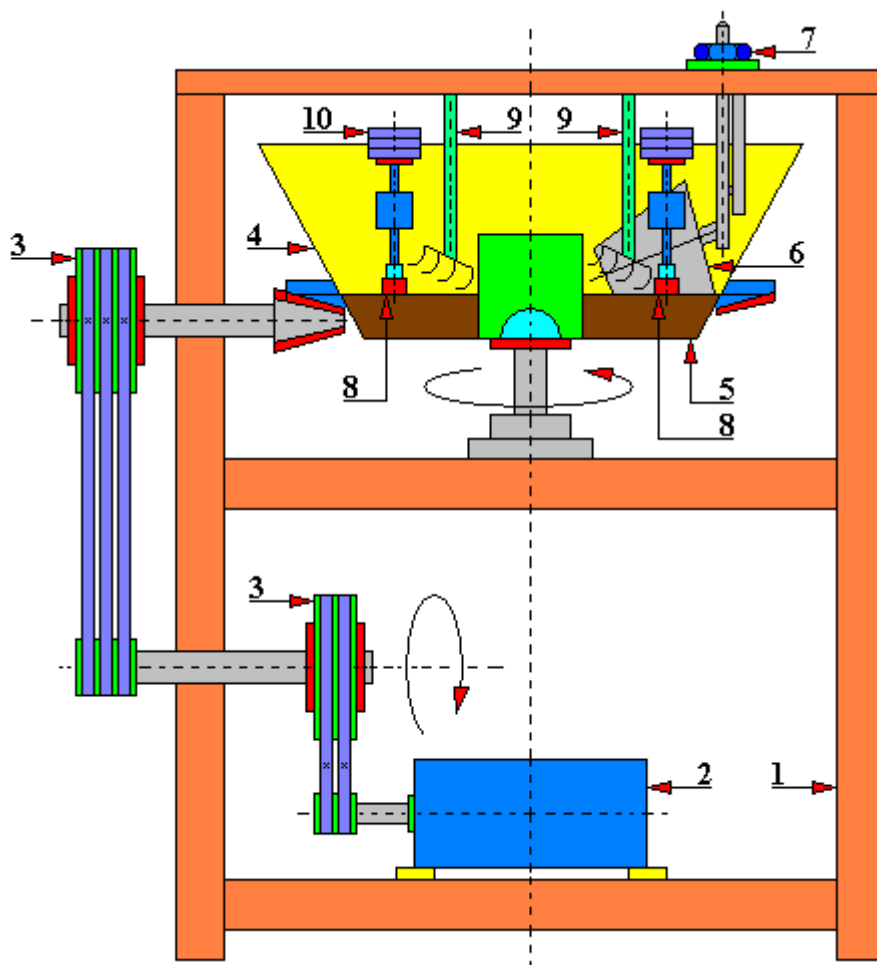
Rys. 4.12.12. Panel tylny sterownika BT-20

1 – gniazdo do którego podłączony jest wzmacniacz Spider 8, 2 – obudowa, 3 – śruba mocująca gniazdo, 4 – gniazdo połączone z czujnikiem impulsów, 5 – gniazdo zasilające i kontrolujące napęd tribotestery T-20, 6 – gniazdo zasilania AC 230 V/50 Hz

#### 4.13. Maszyna do badania zużycia w glebie typu „wirująca misa”

Stanowiska badawcze typu „wirująca misa” przeznaczone są głównie do badań zużycia elementów maszyn rolniczych pracujących w różnych rodzajach gleb o różnej wilgotności. Są to stanowiska o gabarytowo dużych wymiarach – średnica misy nawet powyżej jednego metra, oraz dużych masach – ciężar samej gleby może wynosić nawet kilkaset kilogramów. Poniżej omówiono dwa warianty stanowiska badawczego zaprojektowanego i wykonanego na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Pierwotnie stanowisko to (rys. 4.13.1) zbudowane było z ramy 1, do której zamocowano silnik elektryczny 2 napędzający

za pomocą przekładni pasowej 3 wirująca misę 4. Wewnątrz misy znajdowała się badana gleba. Do nieruchomej ramy 1 zamontowano przeciwsośnie widełki 9 (dwie sztuki) spulchniające glebę, rolki 6 (również dwie sztuki) ugniatające glebę oraz uchwyty 8 mocujące próbki (dwie sztuki). Wewnątrz misy umieszczono czujnik wilgotności gleby [Napiórkowski J. 2005].



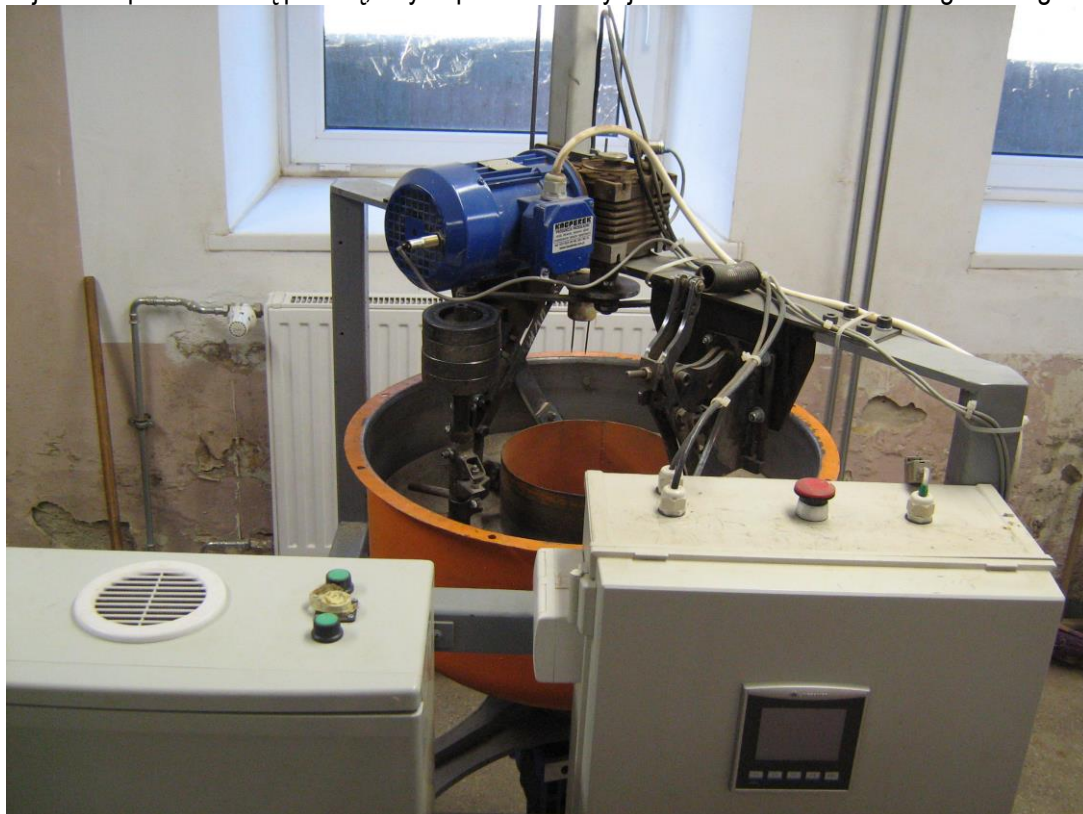
Rys. 4.13.1. Schemat stanowiska typu „wirująca miska” przeznaczanego do badania zużycia w glebie

1 – rama, 2 – silnik elektryczny, 3 – przekładnia pasowa, 4 – wirująca miska, 5 – gleba, 6 – rolka ugniatająca, 7 – docisk rolki, 8 – uchwyt z próbką, 9 – widełki spulchniające, 10 – obciążniki próbki (opracowana na podstawie Napiórkowski J. 2005)

Stanowisko to, ze względu na swoje zalety (prosta konstrukcja, niezawodność działania, łatwość obsługi, łatwość wymiany badanych próbek stalowych, powtarzalność otrzymywanych wyników) zostało zmodernizowane i rozbudowane. Rozbudowa dotyczyła m. in. zastosowania systemu wizualizacji i archiwizacji danych otrzymywanych w wyniku przeprowadzanych badań, systemu sterowania pracą misy, systemu nawilżania gleby, wprowadzenia mechanizmu oscylacji ruchu próbek stalowych oraz systemu sterowania tym ruchem (rys. 4.13.2 oraz 4.13.3).

W tribotesterze tym zastosowano próbki (dwie sztuki mocowane przeciwsośnie) stanowiących prostopadłościany o wymiarach 30x25x10 [mm]. Materiał próbek (rys. 4.13.6) może być praktycznie dowolny, jednak na tym stanowisku głównie przeprowadzano badania dla stali 38GSA, która jest powszechnie stosowana w Polsce do produkcji lemieszki płuznych. Aby nie ingerować temperaturą w strukturę materiału próbek, wycinano je za pomocą wycinarek wodnych. Płaszczyznę tarcia mocowano pod kątem  $2^{\circ} \div 3^{\circ}$  w stosunku do obrabianej powierzchni. Do mocowania badanych próbek służą dwie niezależne sekcje zamocowane na nieruchomej ramie na zawieszeniu wahaczowym, wleczonym z możliwością pomiaru siły tarcia. Każda z tych

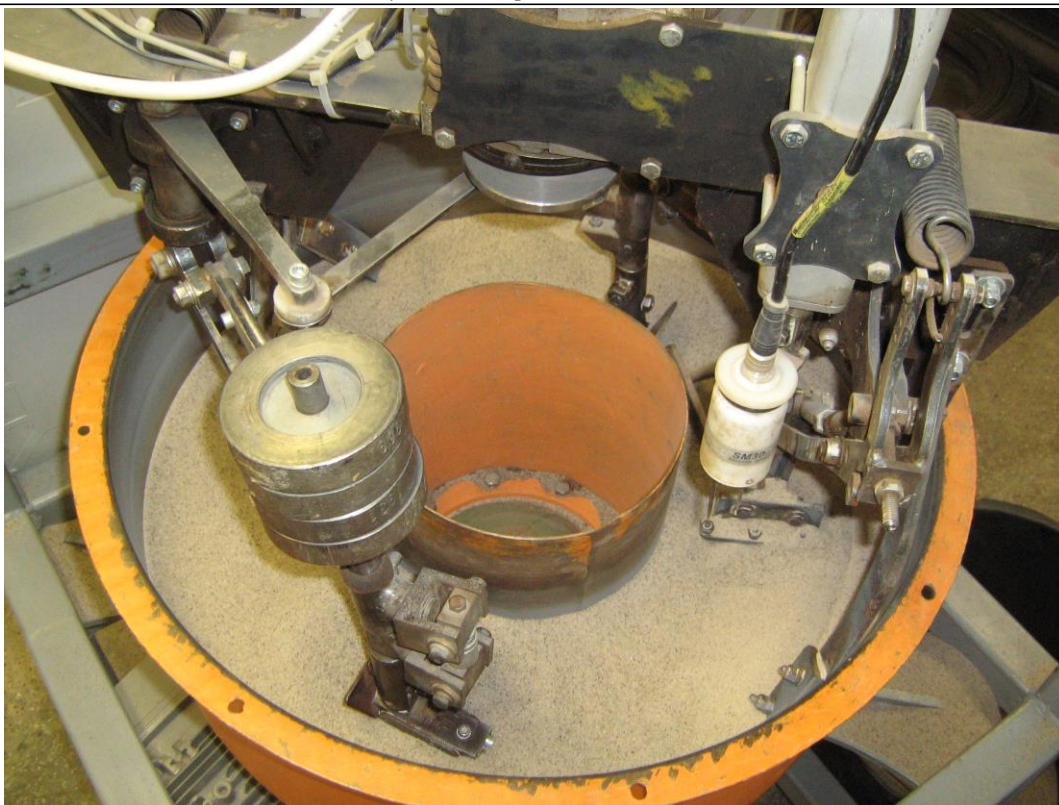
sekcji posiada mechanizmy do spulchniania oraz dogniatania powierzchni materiału (gleby) po przejściu stopki z badaną próbką, aby zapewnić kondycjonowanie stanu materiału glebowego.



Rys. 4.13.2. Widok zmodernizowanego stanowiska typu „wirująca miska” przeznaczonego do badania zużycia w glebie (na pierwszym planie szafy sterujące z falownikami oraz oprogramowaniem, w głębi część mechaniczna stanowiska). Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (fot. J. Mikołajczyk)

Modernizacja niniejszego stanowiska badawczego umożliwiła m. in.:

- pomiar i rejestrację sił tarcia niezależnie dla obu sekcji roboczych,
- wybór rodzaju ruchu (bez oscylacji lub z oscylacją),
- sterowanie wilgotnością masy ścierniej (gleby),
- pomiar i rejestrację wilgotności masy ścierniej,
- pomiar i rejestrację temperatury masy ścierniej,
- pomiar i rejestrację przebytej drogi tarcia,
- zadawanie drogi tarcia,
- zadawanie prędkości liniowej ścieranych próbek,
- zadawanie prędkości oscylacji,
- zadawanie wilgotności badanej glebie.



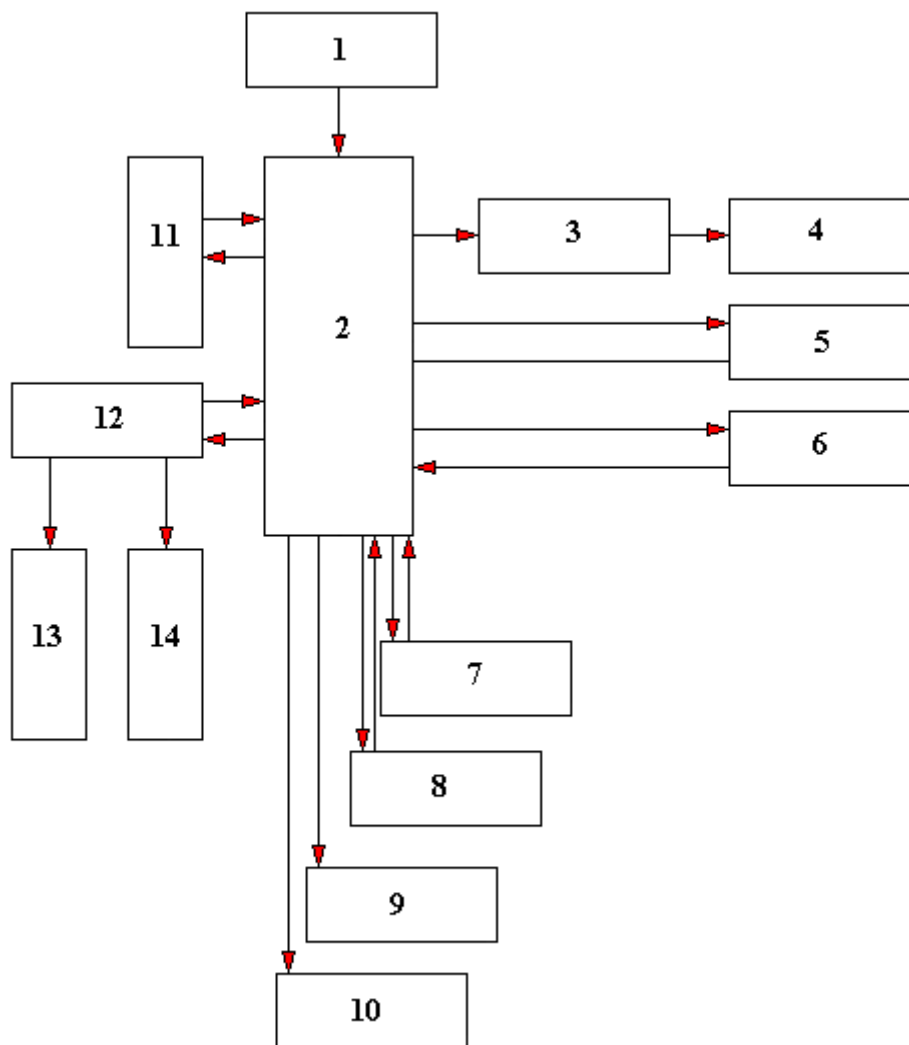
Rys. 4.13.3. Widok głównych elementów roboczych stanowiska typu „wirująca miska” przeznaczonego do badania zużycia w glebie. Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (fot. J. Mikołajczyk)

Głównym elementem systemu wizualizacji i archiwizacji danych (rys. 4.13.4) stanowiska typu „wirująca miska” jest sterownik PLC V350-35-R2 zasilany napięciem wyjściowym 24 [V] za pomocą zasilacza typu RS-150-24. Sterownik komunikuje się poprzez moduł EX-A1 z modułem wagowym IO-LC3 obsługującym czujniki siły tarcia dla sekcji nr 1 oraz nr 2. Ze względów praktycznych zastosowano tu tensometryczne czujniki siły typu EMS20-200N.

Do napięciowego wejścia sterownika PLC V350-35-R2 podłączono za pośrednictwem wzmacniacza czujnik wilgotności typu SM300 wyposażony w przetwornik temperatury. Aby zastosowany w tym rozwiązaniu konstrukcyjnym czujnik wilgotności wskazywał prawidłowy pomiar, konieczne jest całkowite zagłębienie jego elektrod w glebie. Czynność ta jest realizowana za pomocą aktualizatora liniowego typu LAS4-2-1-250-24-EI, który również jest połączony ze sterownikiem PLC.

Jeżeli w czasie przeprowadzania badań, wilgotność gleby będzie mniejsza od wartości zadanej, wówczas okresowo sterownik załącza pompę wody. Czynność tę wykonuje do chwili, aż wartości wilgotności zadanej i zmierzonej będą równe.

Do pomiaru wartości wirowania miski, a tym samym prędkości zużywania próbek, został zastosowany czujnik PCID-4RP. Ustawienie mechanizmu oscylacji zostało zrealizowane za pomocą sygnału generowanego przez czujnik położenia mechanizmu oscylacji typu PCIN-5.



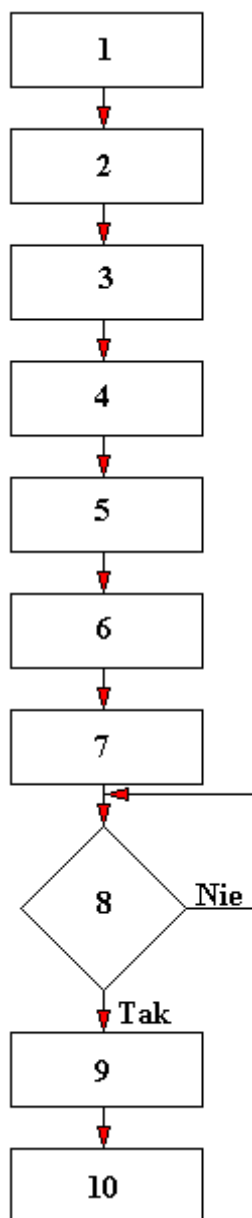
Rys. 4.13.4. Schemat blokowy systemu sterowania i monitorowania parametrów pracy stanowiska typu „wirująca misa” przeznaczonego do badania zużycia w glebie

1 – zasilacz typu RS-150-24, 2 – sterownik typu V 350-35-R2, 3 – wzmacniacz, 4 – czujnik wilgotności i temperatury typu SM 300, 5 – czujnik prędkości wirowania misy typu PCID-4RP, 6 – czujnik położenia mechanizmu oscylacji typu PCIN-5, 7 – przemiennik częstotliwości typu SV015IC5-1F zasilający motoreduktor napędowy misy, 8 – przemiennik częstotliwości typu SV004IC5-1F zasilający motoreduktor napędowy oscylacji, 9 – aktualizator liniowy położenia typu LAS4-2-1-250-24-EI czujnika wilgotności i temperatury, 10 – pompa wody, 11 – moduł EX-A1, 12 – moduł IO-LC3, 13 – czujnik siły typu EMS20-200N dla sekcji nr 1, 14 – czujnik siły typu EMS20-200N dla sekcji nr 2 (opracowano na podstawie Napiórkowski J. i inni 2014)

Do regulacji prędkości ruchu obrotowego misy i ruchu oscylacyjnego zastosowano falowniki firmy LS. Umożliwiają one praktycznie dowolną regulację (w zakresie od 0 Hz do 50 Hz) prędkości zarówno w trybie manualnym lub programowalnym czy to z poziomu falownika czy też z poziomu sterownika PLC. Do regulacji prędkości wirowania misy użyto falownika typu SV015IC5-1F, natomiast do regulacji prędkości ruchu oscylacyjnego – falownika SV004IC5-1F. Misa napędzana jest za pomocą motoreduktora o mocy znamionowej 1,5 [kW]. Sterownik PLC posiada wbudowane porty komunikacyjne typu RS 232 umożliwiające wymianę danych z komputerem.

Do obsługi sterownika PLC oraz wszystkich podległych mu urządzeń służy program o nazwie „Zużywanie ściernie” zawierający dwa robocze okna menu o nazwach „Monitorowanie i nadzór” oraz „Pomiar wilgotności”.

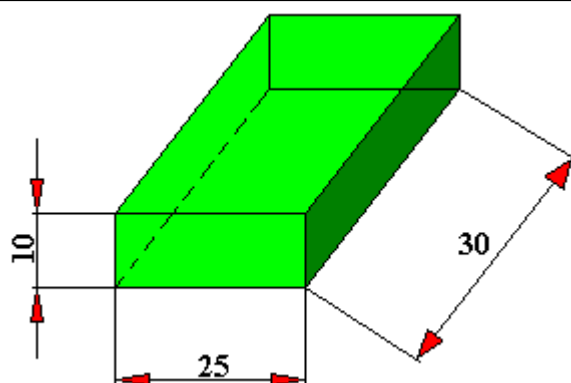




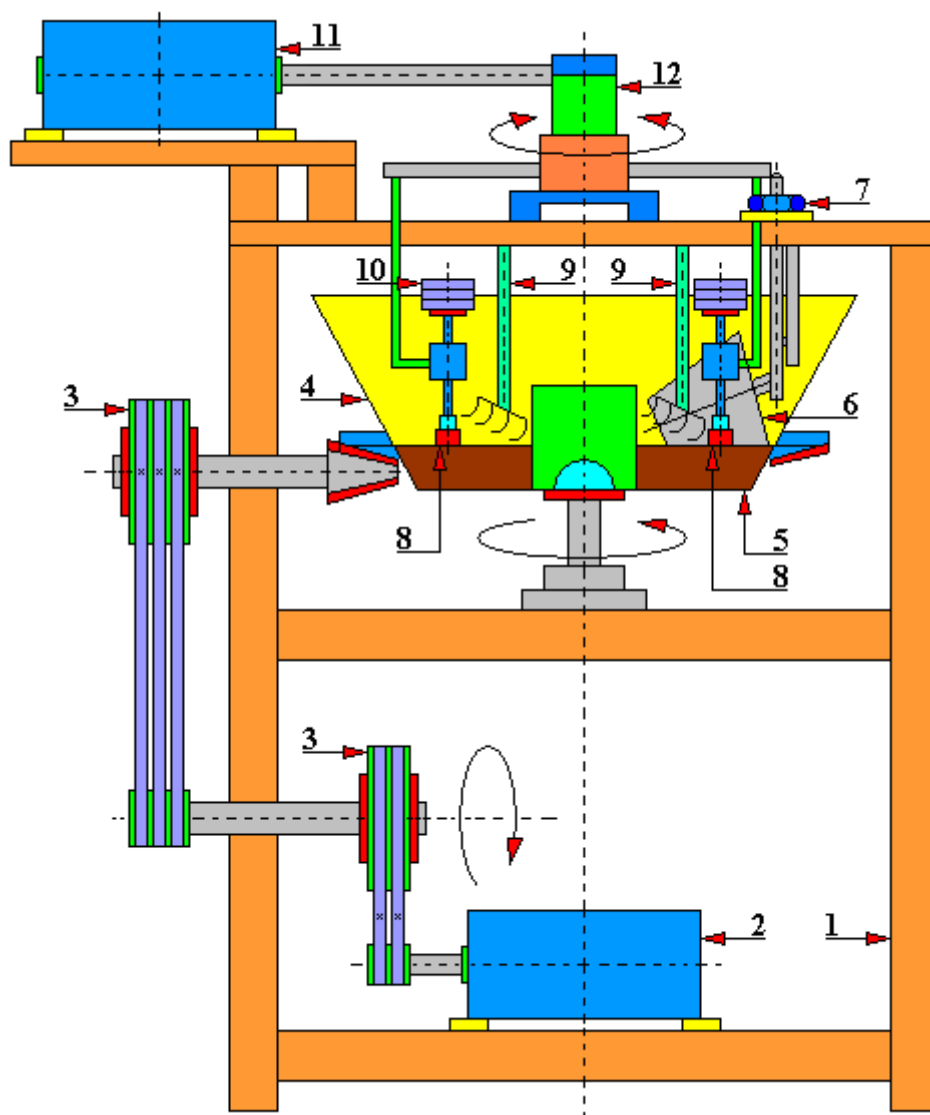
Rys. 4.13.5. Algorytm funkcjonowania stanowiska typu „wirująca miska” przeznaczonego do badania zużycia w glebie

1 – montaż badanych próbek (2 sztuki) w uchwytach, 2 – uruchomienie sterownika PLC V350-35-R2, 3 – ustalenie/zadanie wartości wilgotności i rodzaju masy ścierniej (gleby), 4 – uruchomienie automatycznego pomiaru wilgotności masy ścierniej (gleby), 5 – ustalenie/zadanie wartości prędkości tarcia, 6 – ustalenie/zadanie drogi tarcia i rodzaju ruchu (z oscylacją lub bez oscylacji), 7 – uruchomienie procesu zużycia, 8 – blok warunkowy: porównanie zadanej drogi tarcia z drogą rzeczywistą, 9 – eksport np. do komputera danych pobranych ze stanowiska badawczego w czasie przebiegu doświadczenia, 10 – demontaż zużytych próbek uchwytów, ewentualna wymiana materiału ściernego, prace przygotowawcze do kolejnego badania (opracowano na podstawie Napiórkowski J. i inni 2014)

Na rysunku 4.13.5 przedstawiono algorytm funkcjonowania niniejszego stanowiska badawczego, natomiast na rys. 4.13.7 schemat zmodernizowanego stanowiska – część mechaniczną. Częstość próbkowania danych (wilgotność, temperatura, prędkość obrotowa miski, prędkość ruchu oscylacji, droga tarcia) pobieranych ze stanowiska badawczego dla zastosowanego sterownika PLC wynosi 1 [Hz].



Rys. 4.13.6. Zastosowana próbka ze stali 38GSA do badań zużyciowych na stanowisku typu „wirująca miska”. W przypadku zmiany rodzaju uchwytów próbek istnieje możliwość zamontowania próbek o innym kształcie.

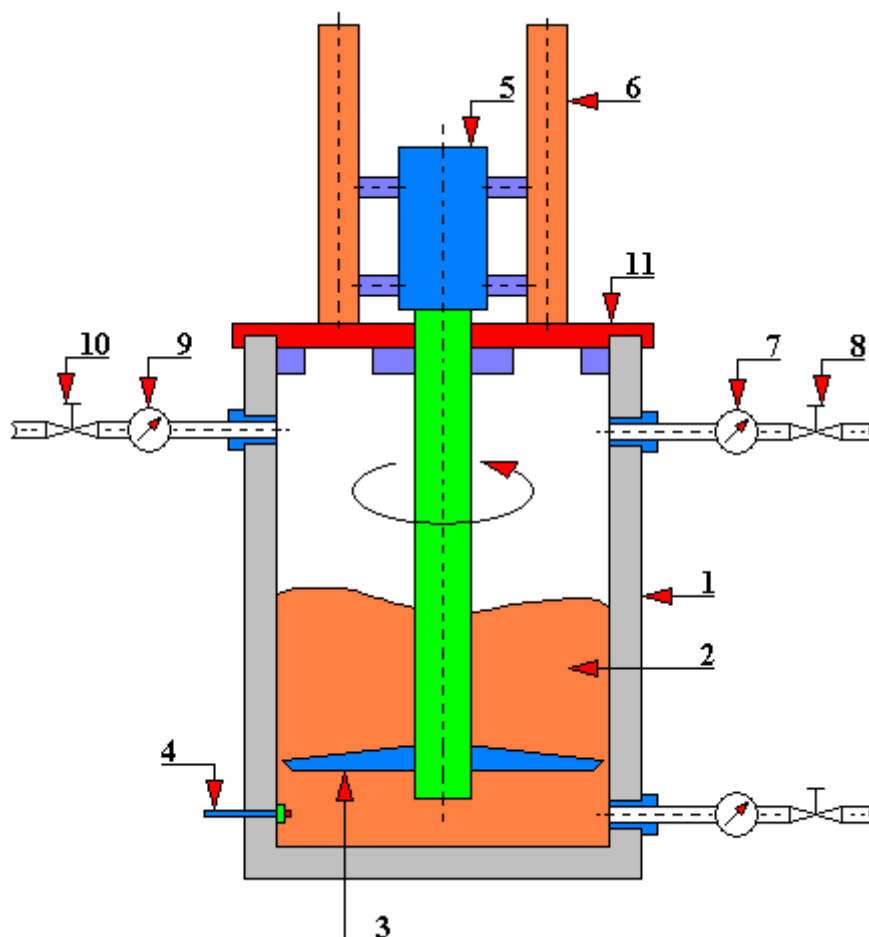


Rys. 4.13.7. Schemat zmodernizowanego stanowiska typu „wirująca miska” przeznaczonego do badania zużycia w glebie (bez układu sterowania)

1 – rama, 2 – silnik elektryczny napędu ruchu głównego (wirowego misy), 3 – przekładnia pasowa, 4 – wirująca miska, 5 – gleba, 6 – rolka ugniatająca, 7 – docisk rolki, 8 – uchwyt z próbka, 9 – widelki spulchniające, 10 – obciążniki próbki, 11 – silnik napędu ruchu oscylacyjnego, 12 - reduktor

#### 4.14. Stanowisko do badań zużycia elementów roboczych w glebie metodą „ground tunneling”

Niniejsze stanowisko badawcze, przedstawione na rys. 4.14.1, przeznaczone jest do badania zużycia materiałów roboczych obrabiających glebę w czasie głębokiej penetracji. Wówczas w czasie np. głębokiej orki, frakcje struktury gleby są zmienne w zależności od głębokości narzędzia roboczego. Także wilgotność i ciśnienie otoczenia mogą mieć duże wartości. Parametry te mogą i wpływają na trwałość głównych elementów roboczych narzędzi rolniczych.



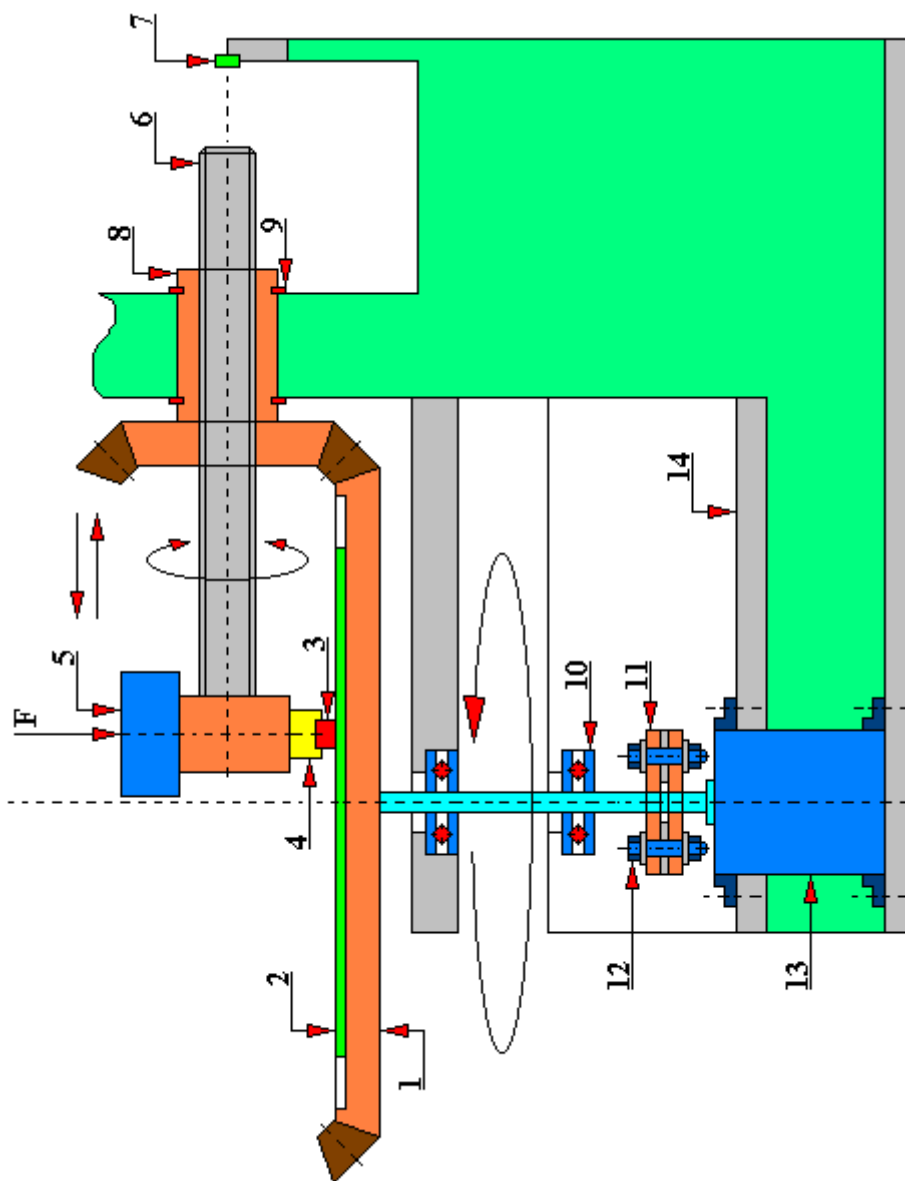
Rys. 4.14.1. Schemat budowy urządzenia typu „ground tunneling” przeznaczonego do badań zużycia elementów roboczych w glebie

1 – cylinder, 2 – gleba, 3 – łopata badawcza z próbkami, 4 – czujnik ciśnienia gleby, 5 – silnik napędowy, 6 – układ docisku, 7 – manometr ciśnienia powietrza, 8 – zawór ciśnienia powietrza, 9 – manometr ciśnienia wody, 10 – zawór ciśnienia wody, 11 – pokrywa cylindra (opracowano na podstawie Rostamiego i inni 2012)

Stanowisko to zbudowane jest z cylindra 1, wewnątrz którego znajduje się badana gleba. W glebie 2 znajduje się wirnik 3 z uchwytami na próbki. Napęd wirnika stanowi silnik 5 o regulowanej prędkości obrotowej. Parametry, takie jak ciśnienie oraz wilgotność, panujące we wnętrzu cylindra mogą być regulowane i monitorowane. Dzięki temu analiza wyników otrzymanych na podstawie tak przeprowadzonych badań jest łatwiejsza i dokładniejsza, a zadane warunki pracy wewnątrz cylindra odzwierciedlają warunki panujące w warunkach rzeczywistych.

## 4.15. Stanowisko badawcze z płótnem ściernym

Stanowisko badawcze z płótnem ściernym (rys. 4.15.1) przeznaczone jest do badań próbek podlegających zużyciu ściernemu, uderzeniom oraz naprężeniom powstającym w badanych materiałach w ruchu po łuku.



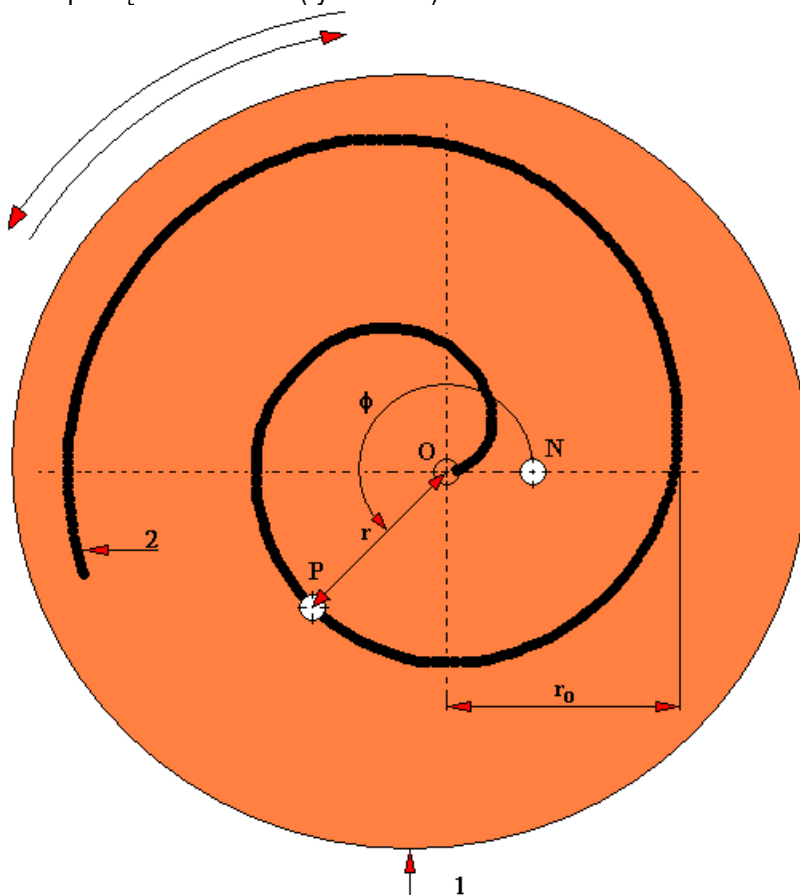
Rys. 4.15.1. Schemat stanowiska badawczego z płótnem ściernym

1 – płyta obrotowa z naciętymi zębami stożkowymi, 2 – płótno ścierne, 3 – badana próbka, 4 – uchwyt próbki badawczej, 5 – masa obciążająca próbkę badawczą, 6 – mechanizm śrubowy przesuwu promieniowego badanej próbki, 7 – czujnik krańcowy, 8 – koło zębate stożkowe pełniące rolę nakrętki, 9 – pierścień osadczy, 10 – łożysko oporowe, 11 – sprzęgło podatne, 12 – śruba mocująca tarcze sprzęgła podatnego, 13 – silnik napędowy, 14 – korpus stanowiska badawczego,  $F$  – siła obciążająca badaną próbkę (opracowano na podstawie Pohody J. 2005)

Badana próbka 3 podczas obrotu płyty 1 przemieszczana jest z pozycji środkowej do krawędzi tarczy ściernej 2 i z powrotem. Tarcza ścierna 2 w postaci płótna ściernego o określonej granulacji jest przymocowana do obrotowej płyty 1. W wyniku złożenia ruchu obrotowego płyty 1 oraz ruchu posuwisto-zwrotnego próbki 3 umieszczonej w uchwycie 4 otrzymuje się, patrząc na powierzchnie płótna 2, ruch po łuku. W zależności od relacji prędkości obrotowej płyty 1 do prędkości przemieszczania się próbki 3, ruch po łuku (spiralą) jest bardziej lub mniej

„zagęszczony”, a otrzymany w ten sposób ruch złożony zapewnia ciągle stykanie się powierzchni próbki z płótnem ściernym. Niniejsze stanowisko badawcze oparte jest na normie ČSN 01 5084 *Determination of metal material.....* (Pohoda J. 2005).

Tor ruchu badanej próbki, zakreślony na powierzchni płótna ściernego o określonej granulacji, będzie spiralą Archimedesesa (rys. 4.15.2)



Rys. 4.15.1. Droga próbki przebyta na powierzchni płótna ściernego w kształcie koła, które to płótno zamocowane jest do obrotowej płyty stanowiska badawczego

1 – płótno ścierne, 2 – droga próbki przebyta w czasie wykonywania badania

Jeżeli punkt P (w naszym przypadku powierzchnia próbki współpracującej z powierzchnią płótna ściernego) będzie poruszał się jednostajnie po promieniu obracającego się ze stałą prędkością kątową wokół bieguna O płótna ściernego zamocowanego do płyty obrotowej, to jego torem będzie spirala Archimedesesa.

Jeżeli drogę OP oznaczymy przez  $r$ , a kąt obrotu od położenia początkowego przez  $\phi$ , to równanie biegunowe spirali Archimedesesa będzie następujące:

$$r = k \cdot \phi$$

gdzie :  $k$  – współczynnik proporcjonalności

Jeżeli przez  $r_0$  oznaczymy długość promienia wodzącego, odpowiadającą pełnemu obrotowi, czyli kątowi równemu  $2\pi$ , to wówczas równanie spirali Archimedesesa będzie następujące:

$$r = \frac{r_0}{2\pi} \cdot \phi$$

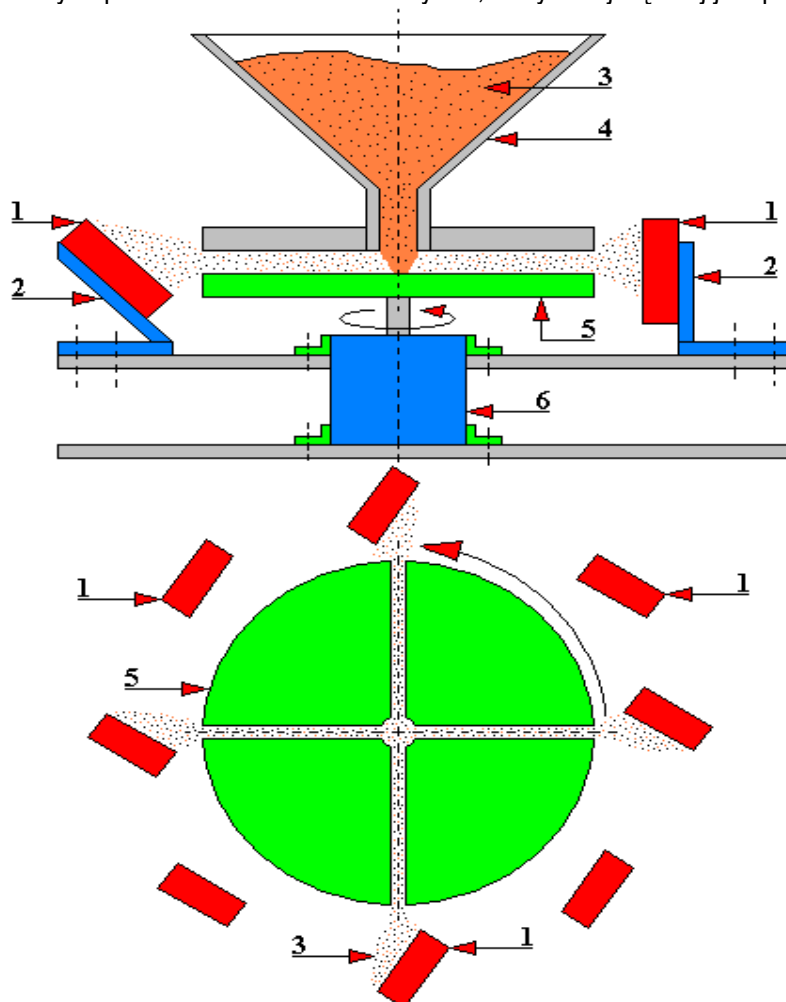
Jeżeli w chwili rozpoczęcia ruchu punkt (w naszym przypadku badana próbka) znajdował się w położeniu A oddalonym o  $a$  od środka, wówczas równanie spirali Archimedesesa przyjmie postać:

$$r = a + k \cdot \varphi$$

Spirala Archimedesesa przecina dowolny promień, wychodzący z punktu O, nieskończenie wiele razy; odległości punktów przecięcia od bieguna rosną w postępie arytmetycznym (Poradnik mechanika 1972). Odmianą spirali Archimedesesa jest spirala logarymiczna, którą również można otrzymać na tym stanowisku, jednak konieczna jest wówczas modernizacja napędu promieniowego ruchu próbki, tak aby prędkość promieniowa próbki rosła, natomiast prędkość obrotowa płyty obrotowej była stała w czasie przeprowadzania badania.

#### 4.16. Stanowisko do badań ściernych wysokotemperaturowych typu HT-ET

Stanowisko badawcze typu HT-ET (rys. 4.16.1) przeznaczone jest do badań erozji cząstek stałych w odśrodkowym czterokanałowym akceleratorze. Materiał ścierny 3 umieszczony w zbiorniku 4 przemieszcza się grawitacyjnie w kierunku odrzutnika odśrodkowego 5 (akceleratora). Odrzutnik ten nadaje cząstkom ściernym dużą energię kinetyczną kierując je w stronę próbek 1 zamocowanych w uchwytach 2. Próbki 1 umieszczone są pod różnymi kątami wokół akceleratora. Dzięki takiemu rozwiązaniu konstrukcyjnemu możliwe jest „bombardowanie” powierzchni badanych próbek 1 materiałem ściernym 3, którym najczęściej jest piasek kwarcowy.



Rys. 4.16.1. Stanowisko do badań ściernych wysokotemperaturowych typu HT-ET

1 – badana próbka, 2 – uchwyt próbki, 3 – masa ścierna, 4 – zbiornik na masę ścierną, 5 – odrzutnik odśrodkowy, 6 – silnik napędowy (opracowano na podstawie Franek F. i inni 2009)

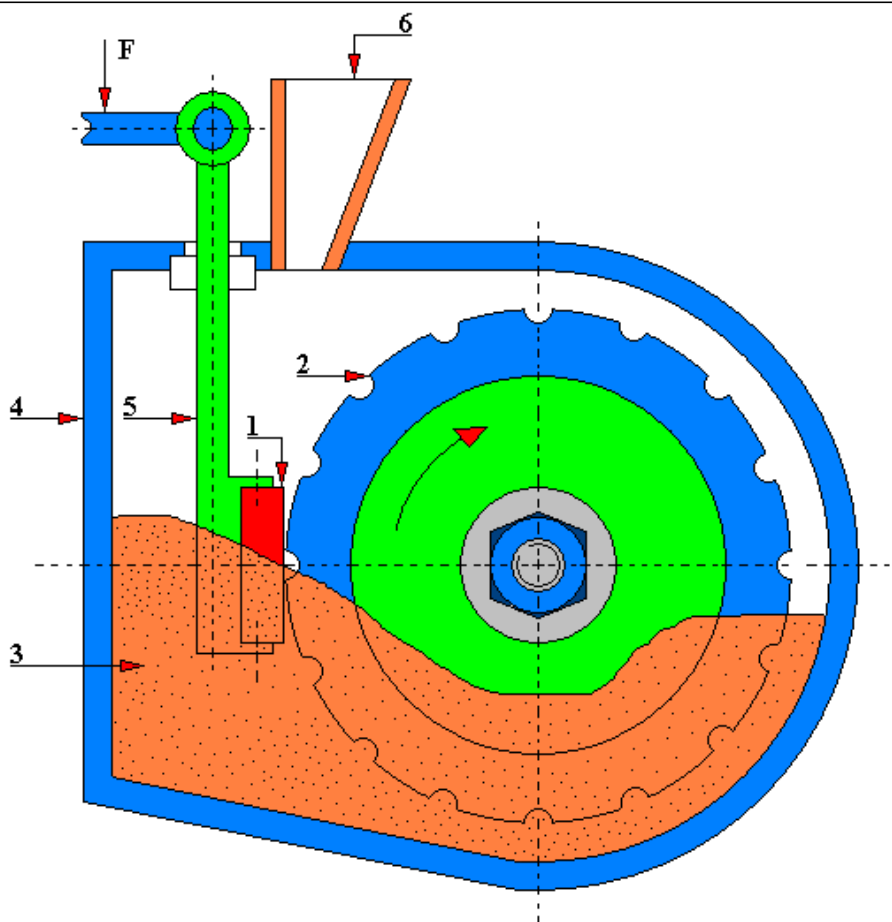
#### 4.17. Stanowisko badawcze zbudowane w oparciu o metodę Hawortha

Na wpływ rodzaju masy ścierniej, środka ściernego na przebieg oraz wartości zużycia w zależności od danej sytuacji doświadczalnej zwróciło już uwagę wielu Autorów ( m.in. Napiórkowski J. 1994, Zwierzycki W. 1990), co miało na celu spowodowanie pewnego ustandaryzowania, unormowania stanowisk badawczych przeznaczonych do badań tarcia oraz zużycia w masie ścierniej. Obecnie do najczęściej stosowanych mediów mających zastosowanie do badań tworzyw konstrukcyjnych można zaliczyć m.in.:

- ziarna korundu,
- węgliki krzemu,
- piasek kwarcowy lub frakcje piasku naturalnego,
- masę glebową.

Poniżej zostało przedstawione stanowisko badawcze dla którego została opracowana przez American Society for Testing and Material (ASTM) metoda badawcza zwana metodą Hawortha.

Stanowisko badawcze do przeprowadzania badań metodą Hawortha (rys. 4.17.1) zbudowane jest z korpusu 4, który pełni rolę zbiornika ścierniwa, w którym to korpusie 4 na wale napędowym zamocowana jest obrotowa tarcza gumowa 2. Tarcza ta pełni rolę transportera ścierniwa 3, którym może być np. drobnoziarnisty piasek kwarcowy (*wg Standard test metod .... ASTM G65*) lub inny materiał o strukturze sypkiej i drobnoziarnistej. Gumowa tarcza obrotowa 2 współpracuje z badaną próbką 1 umocowaną w uchwycie 5. Wielkość siły docisku próbki 1 do powierzchni gumowej tarczy obrotowej 2 można regulować za pomocą obciążenia  $F$  przyłożonego na końcu zespołu dźwigni mocującej próbkę 1. Do wnętrza korpusu 4 za pomocą lejki zasypowego 6 dostarczone zostaje ścierniwo 3 o znanej granulacji, które przemieszczane jest w sposób ciągły za pomocą koła gumowego 2 na powierzchnię badanej próbki 1. Celem przeprowadzonych na niniejszym stanowisku badań jest ocena ilościowa zużywania się badanego materiału próbki w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych.



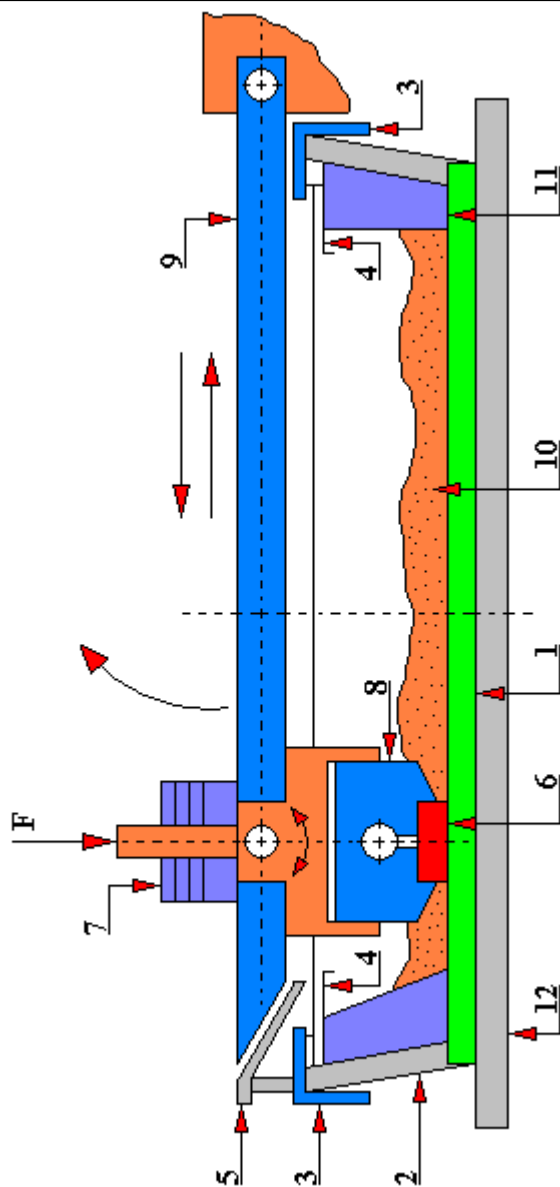
Rys. 4.17.1. Schemat urządzenia typu Haworth-ZIS 116

1 – badana próbka, 2 – gumowa tarcza, 3 – ścierniwo, 4 – korpus urządzenia badawczego, 5 – uchwyt próbki, 6 – lej zasypowy,  $F$  – siła działająca na ramię uchwytu próbki (opracowano na podstawie Granat K. 1995)

#### 4.18. Aparat Millera

Do prowadzenia badań porównawczych odporności na zużycie ścierne różnych grup stopów np. żeliw, kompozytów, stali w warunkach ścierania metal-mieszanka SiC i wody wg metody zalecanej przez American Society for Testing and Materials (ASTM) przeznaczony jest aparat Millera (rys. 4.18.1). W urządzeniu tym próbka 6, zamocowana w uchwycie 8, porusza się ruchem posuwisto-zwrotnym w rynnie (komorze roboczej) o przekroju w kształcie litery U. Dzięki temu możliwy jest spływ mieszanki SiC/woda na dno rynny po każdym suwie roboczym próbki 6. Prędkość ruchu badanej próbki 6 jest stała i wynosi 0,254 [m/sek], zaś częstotliwość ruchu tej próbki jest równa 0,8 [Hz]. Uchylnie ramię prowadnicy 9 umożliwia łatwą wymianę masy ścierniej 10 oraz wody wraz z produktami zużycia.



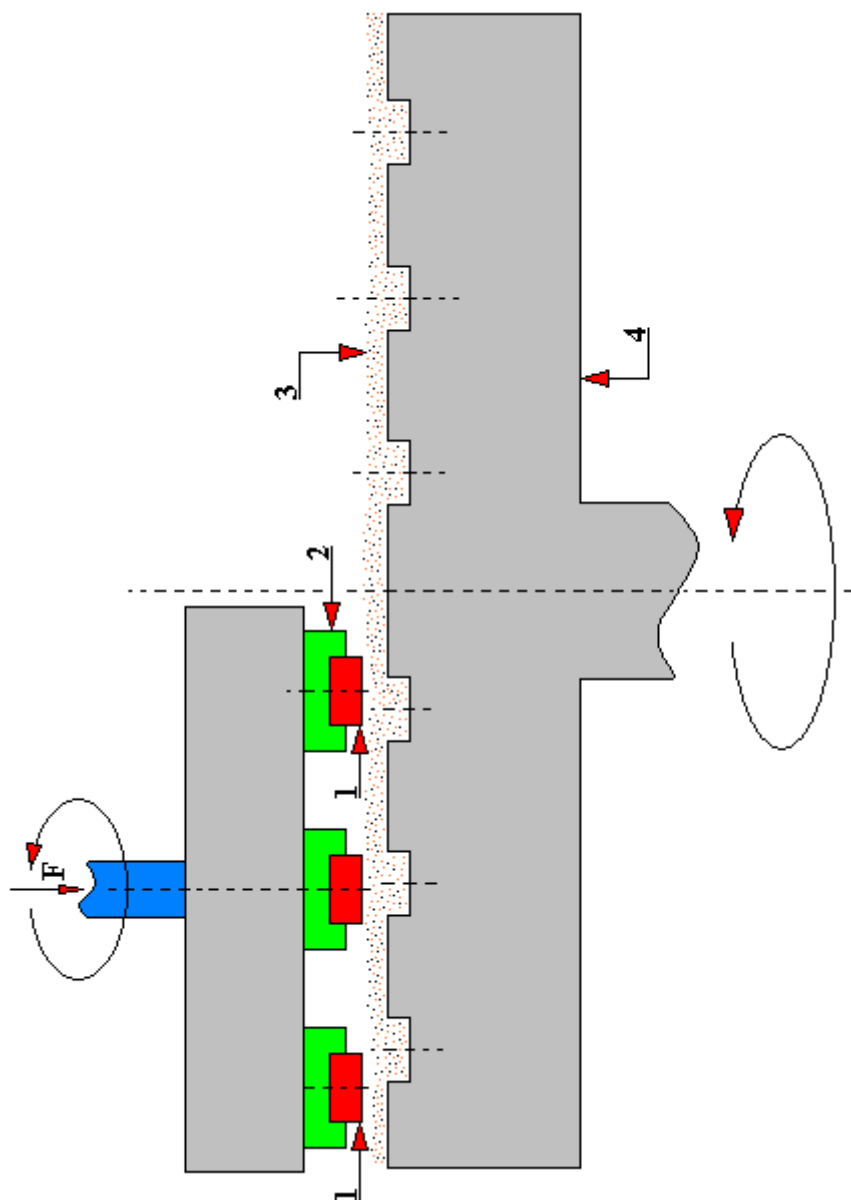


Rys. 4.18.1. Schemat ogólny budowy aparatu Millera

1 – podkładka, 2 – obudowa, 3 – listwa dociskowa, 4 – płyta ochronna, 5 – podnośnik ramienia, 6 – badana próbka, 7 – obciążniki, 8 – uchwyt próbki, 9 – prowadnica pełniąca równocześnie rolę uchylnego ramienia urządzenia, 10 – masa ścierna, 11 – wkład wewnątrz komory roboczej stanowiska badawczego, 12 – podstawa,  $F$  – siła działająca na ramię uchwytu próbki (opracowano na podstawie Kalandyk B., Glowina J. 2001)

#### 4.19. Urządzenie do pomiaru odporności na zużycie ścierne metodą MWT

Do przeprowadzania badań odporności na zużycie ścierne materiałów metodą Micro Wear Test (MWT) służy urządzenie przedstawione na rys. 4.19.1. W urządzeniu tym na powierzchnię obrotowej tarczy żeliwnej 4 nakłada się porcję ścierniwa w postaci zawiesiny sproszkowanego kwarcu, krzemienia lub innego minerału. Do tarczy tej dociskany jest siłą  $F$  obrotowy uchwyt 2, w którym zamocowane są badane próbki 1 (zazwyczaj w ilości trzech sztuk). Miarą odporności badanego materiału na zużycie ścierne jest wielkość zmniejszenia masy próbki/próbek na drodze tarcia.

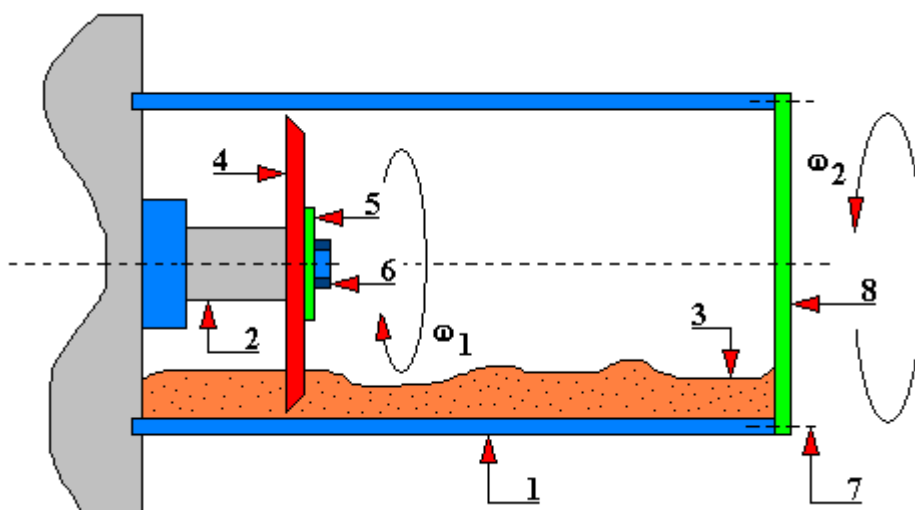


Rys. 4.19.1. Schemat działania urządzenia do pomiaru odporności na zużycie ścierne metodą MWT

1 – badana próbka, 2 – uchwyt próbki, 3 – ścierniwo, 4 – tarcza żeliwna

## 4.20. Tribotester typu CIAT

Do ciągłego testu ścieralności opracowano do badań eksperymentalnych wzajemnego oddziaływania materiałów w postaci narzędzie-materiał obrabiany stanowisko badawcze przedstawione na rys. 4.20.1. Przedmiotowe urządzenie badawcze zbudowane jest z wolno obracającego się bębna zewnętrznego 1, wewnątrz którego szybko obraca się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu bębna, wirnik 2. Do wirnika przymocowane jest narzędzie 4 (jedno lub wielonożowe). Bęben zewnętrzny 1 wypełniony jest określoną ilością badanych próbek 3 lub/i dodatkowego materiału ściernego. Narzędzie 4 podczas obrotu współpracuje z powierzchniami próbek znajdujących się we wnętrzu bębna 1. Prędkość obrotowa wirnika wewnętrznego 2 oraz bębna zewnętrznego 1 w urządzeniu tym regulowana jest za pomocą dwóch niezależnie pracujących przemienników częstotliwości. Zakres prędkości obrotowej wewnętrznego wirnika 2 wynosi od 60 do 650 [obr/min], natomiast bębna zewnętrznego 1 do 10 [obr/min].



Rys. 4.20.1. Schemat działania tribotestera typu CIAT

1 – bęben zewnętrzny, 2 – obrotowy wirnik, 3 – badane próbki i/lub dodatkowy materiał ścierny, 4 – narzędzie (obrotowy nóż), 5 – podkładka, 6 – śruba mocująca narzędzie, 7 – miejsce mocowania śrub pokrywy bębna, 8 – pokrywa bębna,  $\omega_1$  – prędkość kątowa wirnika 2,  $\omega_2$  – prędkość kątowa bębna 1 (opracowano na podstawie Franek F. i inni 2009)



Rys. 4.20.2. Widok ogólny tribotestera typu CIAT po zdjęciu bębna zewnętrznego (Lugbauer M., Kröll A. 2009)

#### 4.21. Tribotester typu zbiornik gleby (soil bin)

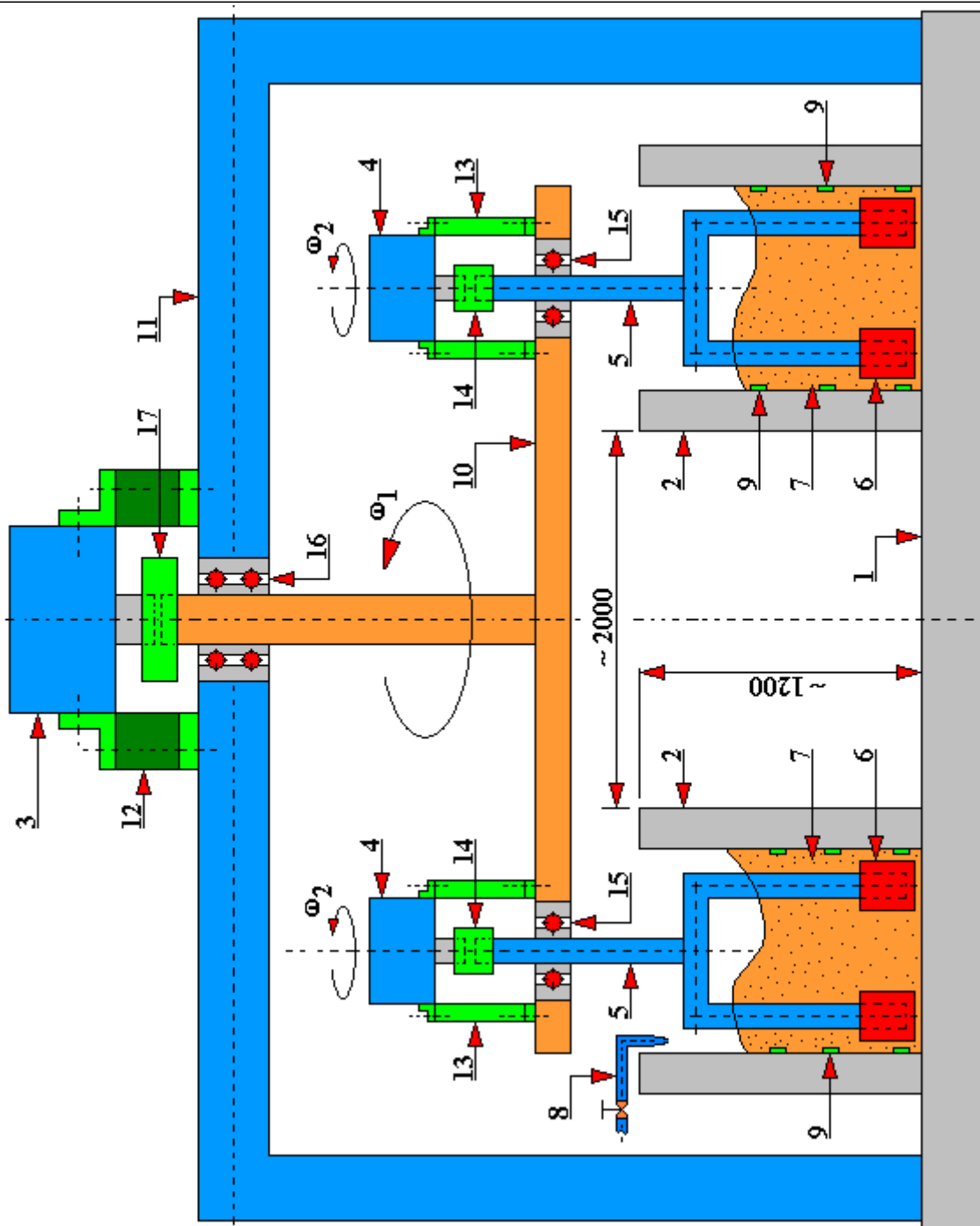
Stanowisko badawcze typu „zbiornik gleby” („soil bin”) jest zbliżone w istocie swojego działania do urządzenia typu „wirująca misa” z tym, że gabaryty tego stanowiska oraz jego masa utrudniają wprawienie jego elementów roboczych w ruch obrotowy. Poza tym, wprawienie tak dużej masy gleby (ok. kilku ton) w ruch, mogłoby spowodować pewną segregację jej cząstek (ze względu na siłę odśrodkową), a tym samym wpłynąć na otrzymywane wyniki badań. Trudno określić, czy te wyniki różniłyby się i ewentualnie w jakim stopniu, od wyników otrzymywanych w warunkach rzeczywistych (np. na konkretnej powierzchni pola ornego).

W stanowisku typu „zbiornik gleby” przedstawionym na rys. 4.21.1, nieruchomy zbiornik umieszczony jest na betonowej posadzce. Zbiornik ten tworzą ściany 2 zbudowane z dwóch współosiowych pierścieni o wysokości ok. 1200 [mm]. Zewnętrzny pierścień ma średnicę ok. 4000 [mm], natomiast wewnętrzny ok. 2000 [mm]. Oba mają najczęściej tę samą wysokość lub pierścień wewnętrzny (ze względów na wyposażenie stanowiska m.in. w zainstalowane czujniki, system nawilżania, mechanizmy ruchu itp.) może być niższy od pierścienia zewnętrznego o ok. 200 [mm]. Pomiedzy tymi pierścieniami znajduje się masa glebowa o masie do kilku ton. Próbki badawcze 6 umieszczone są w mechanizmie obrotowym zamontowanym nad zbiornikiem z glebą. Układ napędowy napędzany jest za pomocą silnika elektrycznego głównego ruchu obrotowego o mocy ok. 40 [kW]. Silniki napędowe ruchu obrotowego uchwytów próbek mają moc ok. kilku kilowatów. Stanowisko to wyposażone jest również w system sterowania hydraulicznego (nie przedstawiony na rysunku) zapewniający symulację pracy zamontowanych narzędzi roboczych podczas ich samoczynnego zagłębiania w danej glebie. Obrotowy uchwyt badanych próbek umożliwia mocowanie badanych próbek w szerokim zakresie wymiarowym.

Stanowisko to może posiadać kilka ramion (od 2 do 6), do których montowane są układy napędowe obrotowych uchwytów 5 próbek 6 – w zależności od ich konstrukcji. Stelaż oprzyrządowania oraz rama 11 stanowiska wykonane najczęściej są ze stali zwykłej jakości. W skrajnych przypadkach, gdy odczynniki gleby są mocno zasadowe lub mocno kwaśne (w zależności od jej pochodzenia) elementy robocze mające bezpośredni kontakt z badaną glebą, mogą być wykonane ze stali nierdzewnych lub kwasoodpornych w celu zwiększenia ich żywotności.

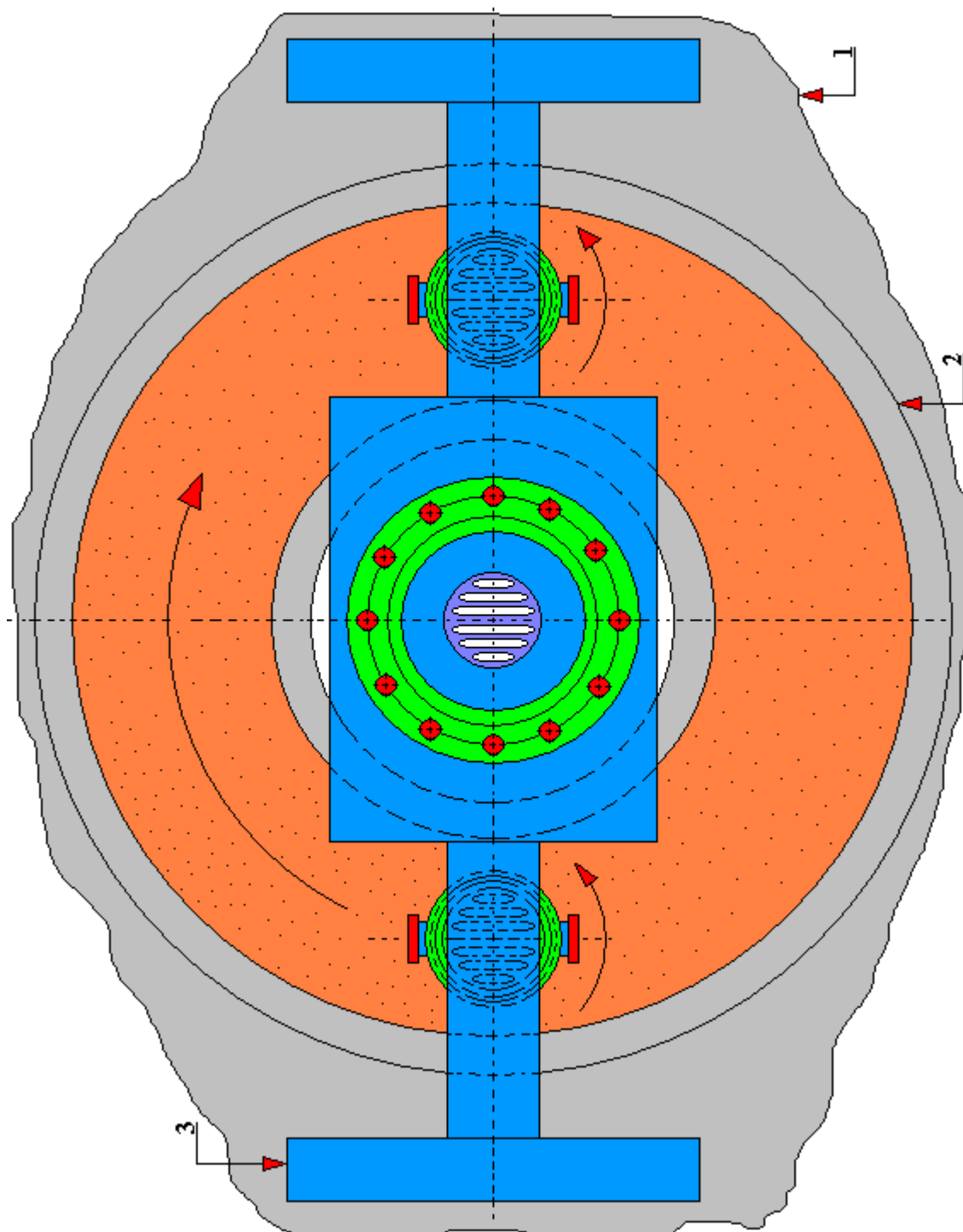
Po zakończeniu badań wymienia się masę glebową, demontuje zużyte próbki, oczyszcza stanowisko i przygotowuje je do kolejnych badań.

Na rys. 4.21.2 przedstawiono widok stanowiska badawczego typu „zbiornik gleby” w widoku z góry, natomiast na rys. 4.21.3 schemat stanowiska, gdy wewnętrzna ściana zbiornika gleby jest niższa od ściany zewnętrznej (najczęściej stosowane wykonanie).



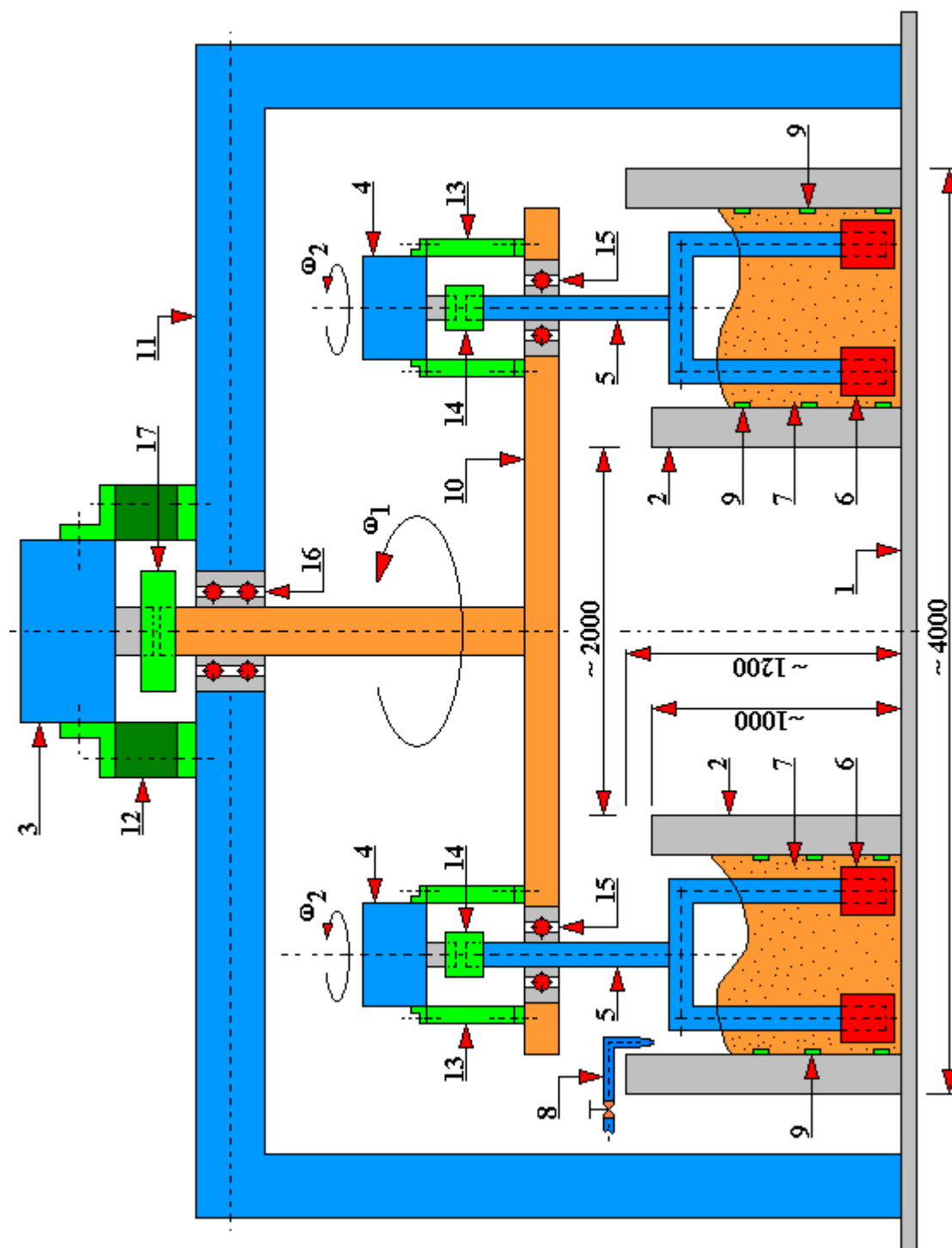
Rys. 4.21.1. Schemat stanowiska badawczego typu „zbiornik gleby” (soil bin)

1 – posadzka betonowa, 2 – ściany zbiornika, 3 – silnik głównego ruchu obrotowego, 4 – silnik ruchu obrotowego uchwytu próbek, 5 – obrotowy uchwyt próbek, 6 – badana próbka, 7 – gleba, 8 – system dozowania wody, 9 – czujnik wilgotności gleby, 10 – główne ramię obrotowe, 11 – rama stanowiska, 12 – kołnierz mocujący silnik 3 do ramy 11, 13 – kołnierz stalowy mocujący silnik 4 do głównego ramienia obrotowego, 14 – sprzęgło wału silnika 4 i uchwytu próbek 5, 15 – łożysko uchwytu obrotowego próbek 5, 16 – łożysko głównego ramienia obrotowego 11, 17 – sprzęgło wału silnika 3 głównego ruchu obrotowego i wału ramienia obrotowego 10,  $\omega_1$  – prędkość kątowna silnika głównego ruchu obrotowego,  $\omega_2$  – prędkość kątowna silnika ruchu obrotowego uchwytu próbek



Rys. 4.21.2. Schemat stanowiska badawczego typu „zbiornik gleby” (soil bin) w widoku z góry

1 – posadzka betonowa, 2 – zewnętrzna ściana zbiornika, 3 – rama (korpus) stanowiska badawczego (rys. J. Mikołajczyk)



Rys. 4.21.3. Schemat stanowiska badawczego typu „ziornik gleby” (soil bin) z wewnętrzną ścianą zbiornika niższą od zewnętrznej

1 – posadzka betonowa, 2 – ściany zbiornika, 3 – silnik głównego ruchu obrotowego, 4 – silnik ruchu obrotowego uchwytu próbek, 5 – obrotowy uchwyt próbek, 6 – badana próbka, 7 – gleba, 8 – system dozowania wody, 9 – czujnik wilgotności gleby, 10 – główne ramię obrotowe, 11 – rama stanowiska, 12 – kołnierz mocujący silnik 3 do ramy 11, 13 – kołnierz stalowy mocujący silnik 4 do głównego ramienia obrotowego, 14 – sprzęgło wału silnika 4 i uchwytu próbek 5, 15 – łożysko uchwytu obrotowego próbek 5, 16 – łożysko głównego ramienia obrotowego 11, 17 – sprzęgło wału silnika 3 głównego ruchu obrotowego i wału ramienia obrotowego 10,  $\omega_1$  – prędkość kątowna silnika głównego ruchu obrotowego,  $\omega_2$  – prędkość kątowna silnika ruchu obrotowego uchwytu próbek (rys. J. Mikołajczyk)

## 4.22. Tribotester typu HT-CIAT

Tribotester typu High Temperature Cyclic Impact Abrasion Test (HT-CIAT) został opracowany i wykonany przez Austrian Competence of Center for Tribology w Wiener Neustadt (Austria). W urządzeniu tym masa ścierna o danej granulacji oddziałuje na badany materiał poprzez sprężone powietrze. Widok ogólny urządzenia został przedstawiony na rys. 4.22.1. Ścierniwo oraz sprężone powietrze kierowane jest równoległe do powierzchni badanej próbki, przy czym jej powierzchnia nachylona jest pod kątem  $45^\circ$  do poziomu. Na stanowisku tym możliwe jest przeprowadzanie badań w szerokim zakresie temperatur rzędu  $500^\circ\text{C} \div 750^\circ\text{C}$  i przepływie środka ściernego rzędu kilku gramów/sek. Granulacja ścierniwa od  $\varnothing 0,4$  do  $\varnothing 0,9$  [mm].



Rys. 4.22.1. Widok ogólny tribotesteru HT-CIAT

1 – komora testowa, 2 – szafa sterująca, 3 – zbiornik ścierniwa, 4 – izolacja termiczna, 5 – zespół podający sprężony czynnik gazowy (opracowano na podstawie Badisch E., Winkelmann H. 2009)

W zbiorniku 3 znajduje się przygotowane ścierniwo, które podawane jest grawitacyjnie do trójnika, którego jeden koniec połączony jest z zespołem regulacji sprężonego ciśnienia 5, natomiast drugi z komorą testową 1 umieszczoną w szamotowym cylindrze z nawiniętymi spiralami grzewczymi. Całość umieszczona jest w obudowie termicznej 4. Zadana temperatura, wielkość ciśnienia sprężonego powietrza (opcjonalnie innego czynnika gazowego) oraz ilość podawanego ścierniwa są regulowane, a ich dane archiwizowane za pomocą systemu komputerowego.



#### 4.23. Tribotester CMŁ-2 (SMC-2)

Tribotester typu SMC-2 przeznaczony jest do badania materiałów na zużycie i wyznaczanie ich przeciwnych cech przy tarcii ślizgowym i tarcii tocznym przy normalnych temperaturach z parami próbek typu tarcza-tarcza, tarcza-klocek oraz tuleja-wał. Niniejsze urządzenie jest rozwinięciem wcześniejszej konstrukcji tribotestera również radzieckiej produkcji MI-1.

Dane techniczne niniejszego urządzenia są następujące:

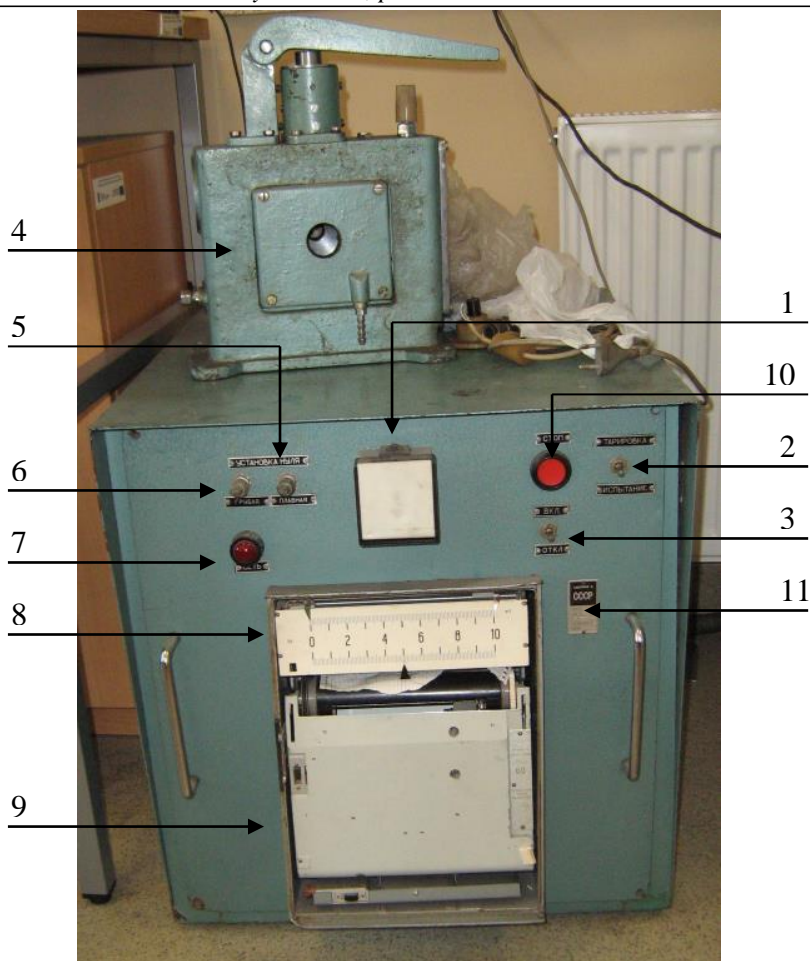
- liczba obrotów wału dolnej próbki: 300; 500; 1000 [obr/min];
- przedział dopuszczalnego błędu liczby obrotów wału dolnej próbki od zmierzonej wielkości:  $\pm 10\%$ ;
- przedział dopuszczalnego błędu mierzonej sumowej (całkowitej) wartości obrotów dolnej próbki wg licznika:  $\pm 100$  obrotów;
- maksymalny moment tarcia: 150 [kg siły · cm];
- maksymalny moment tarcia dla pary wał-tuleja i tarcza-klocek przy 1000 obr/min: 100 [kg siły · cm];
- zakres pomiarowy momentu tarcia: od 15 do 150 [kg siły · cm];
- względna rozpiętość (wariacja) wskazana przez momentomierz od wartości mierzonej nie powinna być większa niż 5%;
- względna rozpiętość (wariacja) wskazań skali obciążenia od mierzonej wartości nie powinna być większa niż 7%;
- zapotrzebowanie mocy elektrycznej nie powinno być większe niż 2,2 [kW];
- prób czułości momentomierza w przedziałach zakresu roboczego nie powinien być większy niż 1,5 [kg siły · cm].

Wymiary gabarytowe urządzenia wynoszą:

- długość: 1130 [mm];
- szerokość: 655 [mm];
- wysokość: 1030 [mm].
- Zakres pomiaru obciążenia [kg siły] wynosi:
- dla próbek okrągłych (typu tarcza) oraz typu tarcza-klocek: od 20 do 200 [kg siły];
- dla próbek typu wał-tuleja: od 50 do 500 [kg siły].



Rys. 4.22.1. Widok ogólny urządzenia SMC-2 (po lewej stronie widoczny jest pulpit sterujący z drukarką momentu tarcia). Fot. J. Mikołajczyk



Rys. 4.22.2. Widok ogólny pulpitu sterującego tribotesteru SMC-2 z drukarką momentu tarcia. Na górze widoczne oprzyrządowanie przeznaczone do wyznaczania wskazań mechanizmu obciążenia dla zakresu do 500 kg siły. Fot. J. Mikołajczyk

1 – licznik impulsów, 2 – przełącznik „Badanie/Tarowanie”, 3 – włącznik licznika impulsów, 4 – oprzyrządowanie przeznaczone do wyznaczania wskazań mechanizmu obciążenia dla zakresu do 500 kg siły, 5 – ustawianie zera (dokładne), 6 – ustawianie zera (zgrubne), 7 – kontrolka podłączenia do sieci, 8 – potencjometr (regulator), 9 – drukarka, 10 – przycisk „Stop”, 11 – tabliczka znamionowa.

Wymiary gabarytowe pulpitu sterowania wynoszą:

- długość: 590 [mm];
- szerokość: 570 [mm];
- wysokość: 550 [mm].

Masa urządzenia wynosi 500 kg.

Masa pulpitu sterującego wynosi 75 kg.

Tribotester SMC-2 zbudowany jest z następujących głównych elementów:

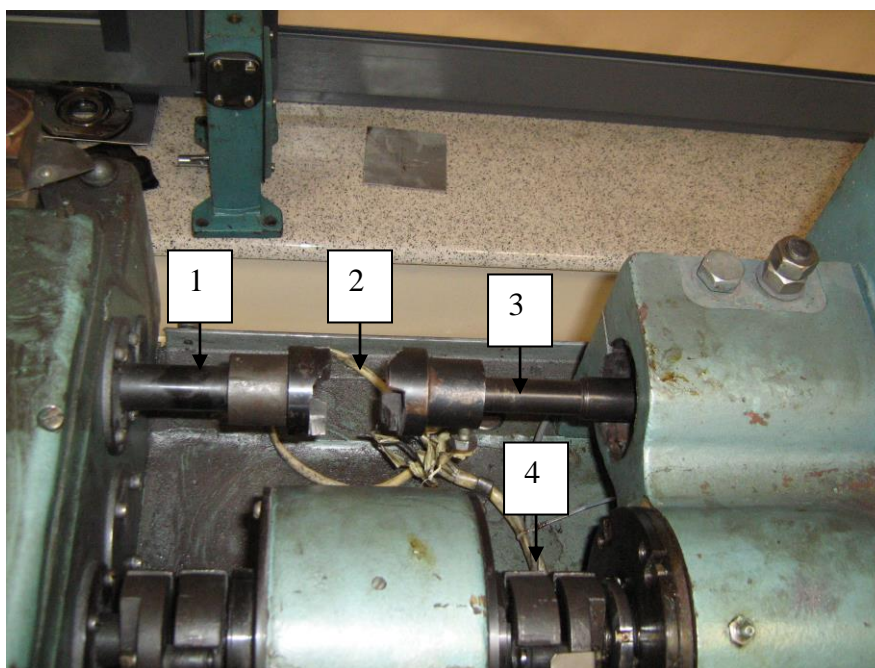
- a) mechanizmu karetki;
- b) mechanizmu obciążenia;
- c) wrzeciennika dolnej próbki;
- d) czujnika;
- e) mechanizmu napędu;
- f) pulpitu sterowania.

W celu przeprowadzania badań w środkach smarnych o małej lepkości z różnymi próbkami, urządzenie to zostało wyposażone w dwie komory badawcze wraz z przyrządami pomocniczymi. Pierwsza wymienna komora badawcza przeznaczona jest dla próbek typu tarcza-tarcza oraz tarcza-klocek. Natomiast druga tylko dla próbek typu tuleja-wał. Na rys. 4.22.1

przedstawiono widok ogólny tribotestera SMC-2 znajdującego się na Wydziale Technicznym Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.



Rys. 4.22.3. Widok wału napędu karetki po zdjęciu osłony. Widoczne przewody wody chłodzącej zasilanej z instalacji wodociągowej. Fot. J. Mikołajczyk



Rys. 4.22.4. Widok (po zdjęciu osłony) miejsca przeznaczonego do zamontowania czujnika indukcyjnego (fot. J. Mikołajczyk).

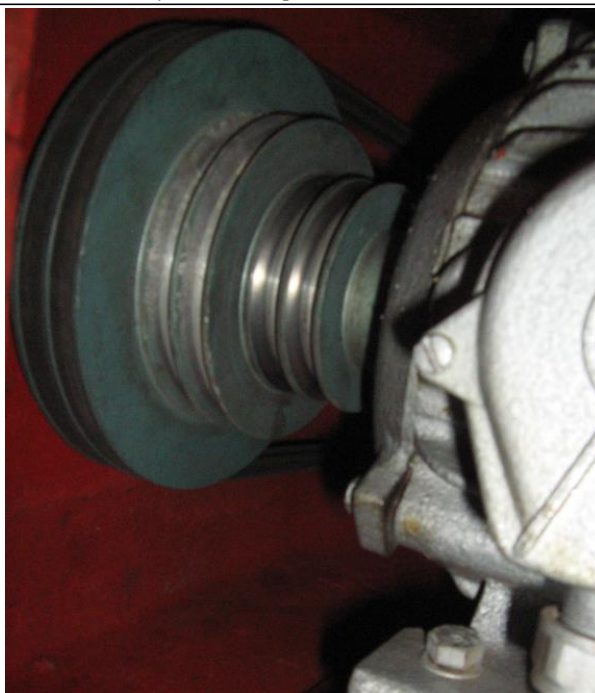
1 – wałek napędowy od strony reduktora, 2 – miejsce podłączenia czujnika indukcyjnego, 3 – wałek powrotny od próbki górnej, 4 – wał napędu karetki



Rys. 4.22.5. Licznik obrotów próbki dolnej zastosowany w oryginalnym wyposażeniu tribotesteru SMC-2 (fot. J. Mikołajczyk).



Rys. 4.22.6. Na pierwszym planie wał napędu karetki. W głębi po prawej stronie wał napędu dolnej próbki, po lewej - wał próbki górnej. Fot. J. Mikołajczyk

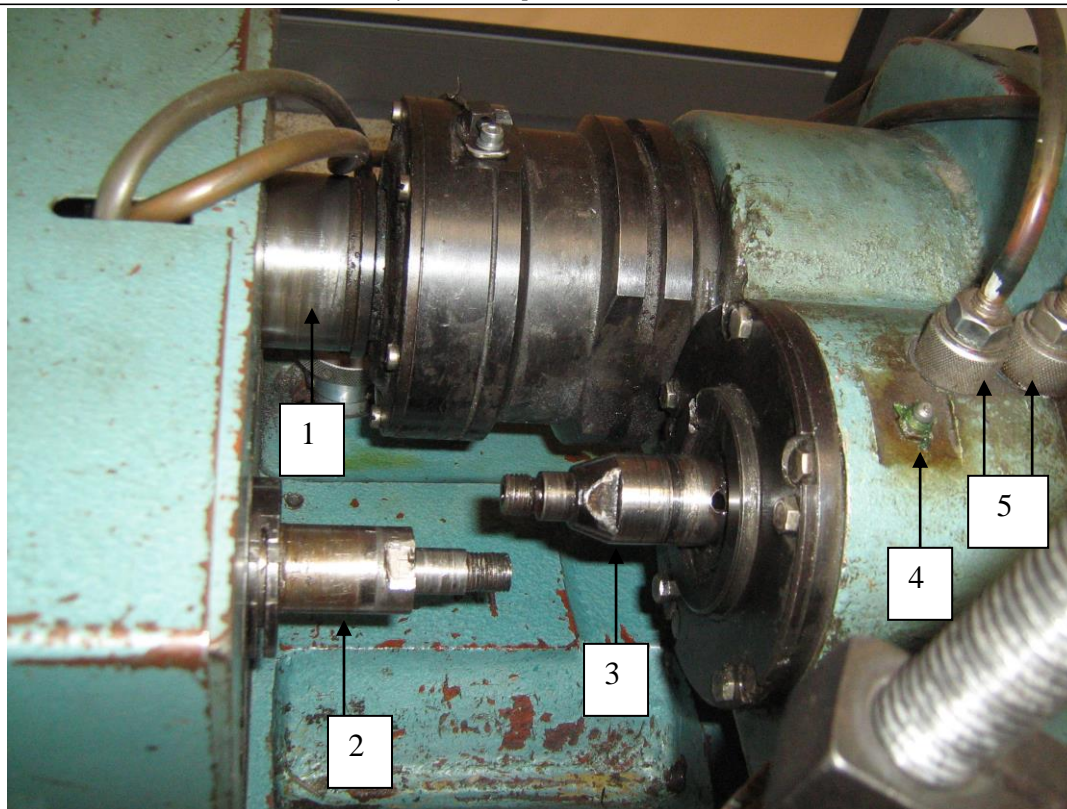


Rys. 4.22.7. Widok kół pasowych osadzonych na wale silnika napędowego tribotestera SMC-2. Na każdym stopniu koła osadzone są po dwa pasy klinowe.

Pulpit sterujący (rys. 4.22.2.) stanowi oddzielny zespół tribotestru SMC-2, który można umiejscowić na oddzielnym miejscu. Operator sterujący urządzeniem posiada możliwość śledzenia na skali potencjometru wartość zmierzonego momentu tarcia. Na czołowej powierzchni panelu pulpitu sterującego znajduje się również licznik sumujący liczbę obrotów wału dolnej próbki. Licznik ten otrzymuje sterujące impulsy elektryczne od czujnika neodymowego umieszczonego na wale napędowym karetki.



Rys. 4.22.8. Przewody systemu chłodzenia wału napędu karetki oraz wrzeciennika dolnej próbki



Rys. 4.22.9. Widok komory roboczej po zdjęciu osłon

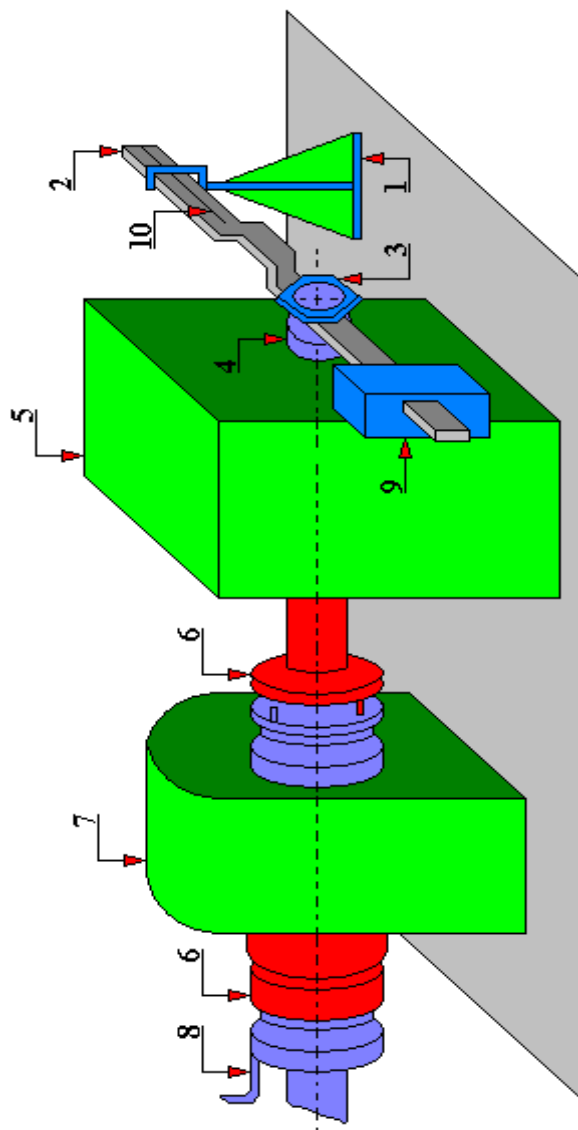
1 – wał napędu karetki, 2 – wał próbki dolnej, 3 – wał próbki górnej, 4 – smarowniczka, 5 – punkty doprowadzenia wody chłodzącej (fot. J. Mikołajczyk)



Rys. 4.22.10. Przykładowe próbki typu tarcza-tarcza wykonane ze stali, przeznaczone do badań tribologicznych na urządzeniu SMC-2 (fot. J. Mikołajczyk)



Rys. 4.22.11. Przykładowe próbki typu tarcza-tarcza wykonane z materiału ściernego złączone spoiwem, przeznaczone do badań na tribotesterze SMC-2 (fot. J. Mikołajczyk)

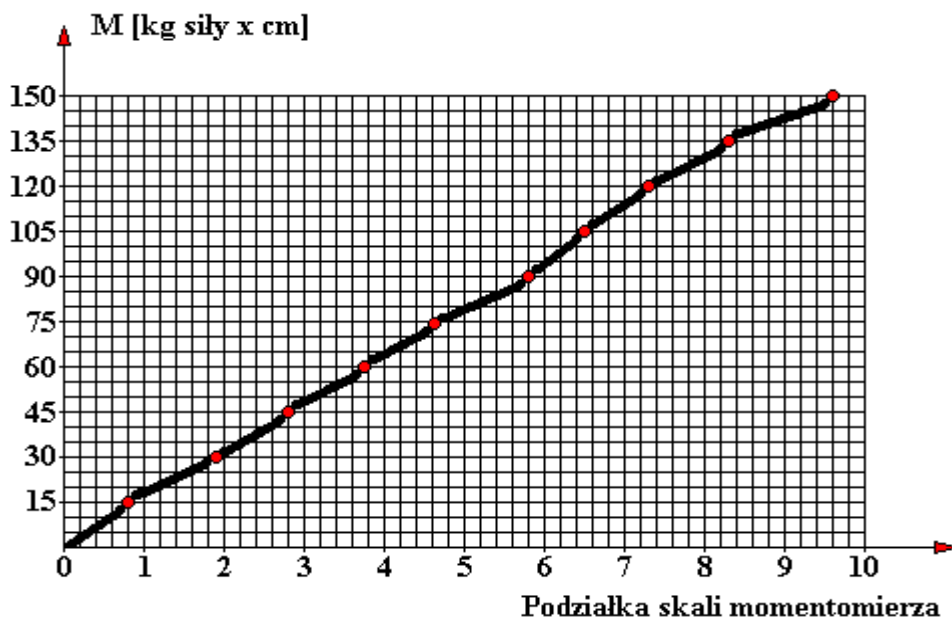


Rys. 4.22.12. Ustawienie urządzenia CML-2 (SMC-2) w celu kontroli momentu pomiarowego

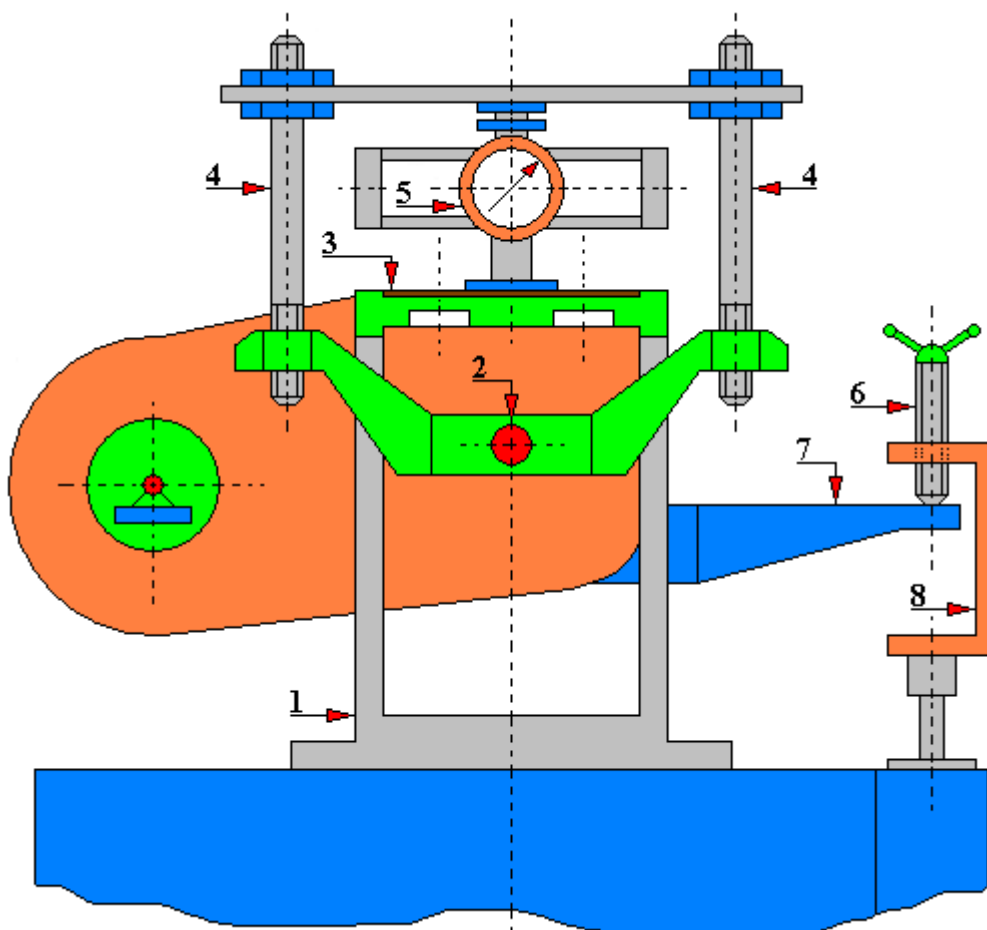
1 – wieszak, 2 – dźwignia, 3 – nakrętka, 4 – wał, 5 – płyta dolnej próbki, 6 – tarcza, 7 – czujnik, 8 - ustalacz, 9 – obciążenie, 10 – rysa kontrolna (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

**Tabela 4.22.1. Zmierzone wartości momentu pomiarowego (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)**

Moment rzeczywisty [kg siły · cm]	Ruch w prawo Podziałka skali momentu	Ruch wsteczny Podziałka skali momentu
15	9	9
30	18,5	----
45	28	28
60	37	37
75	46,5	46,5
90	51	51
105	65,5	---
120	73,5	73,5
135	83	83
150	96	96



Rys. 4.22.13. Zmierzone wartości momentu pomiarowego przedstawione w układzie : zadany moment rzeczywisty  $M$  [kg siły · cm] oraz skala podziałki momentomierza dla ruchu w kierunku prawym (opracowano na podstawie wyników pomiarów z Tabeli 4.22.1]



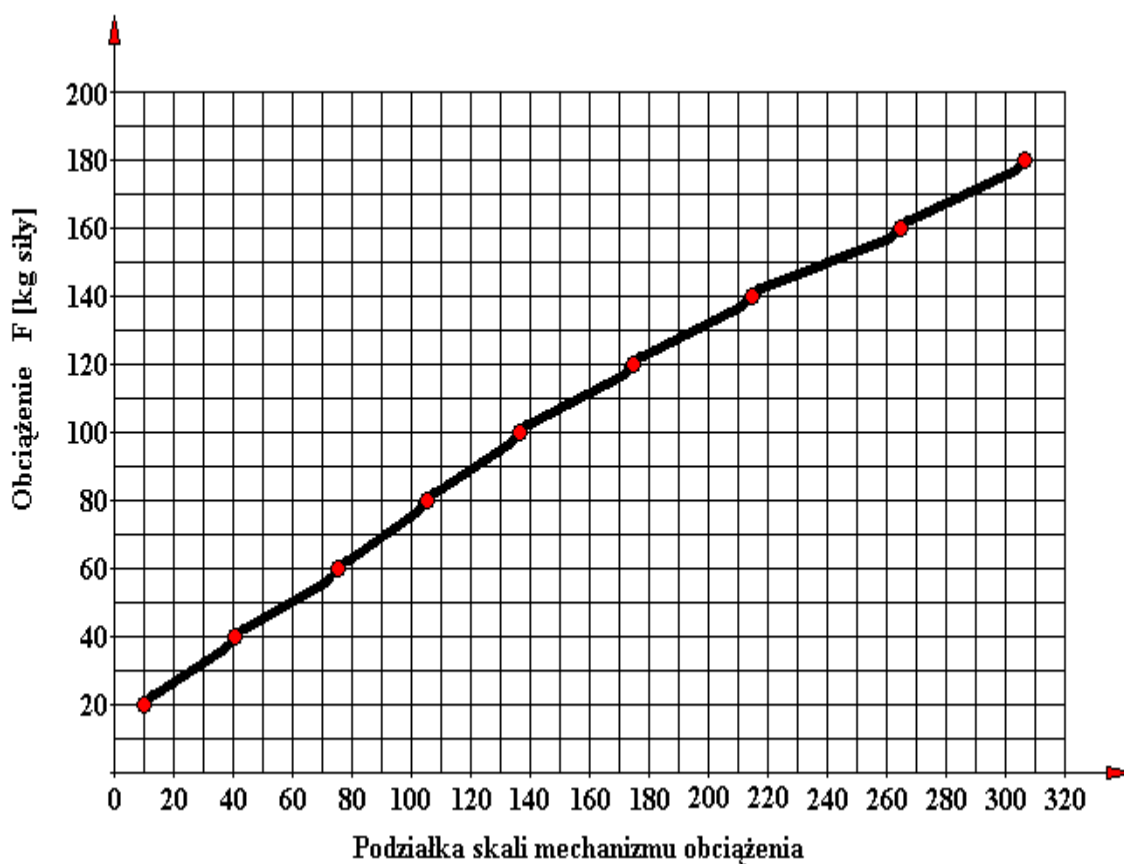
Rys. 4.22.14. Ustawienie urządzenia do wyznaczenia błędu/uchybu przyłożonego obciążenia do 200 kg siły

1 – korpus, 2 – wał główny, 3 – pokrywka, 4 – przyrząd przeznaczony do tarowania wg zadanego obciążenia, 5 – dynamometr typ ДОСМ-3-0,2 zgodny z normą GOST 5.1546-72, 6 – śruba, 7 – wspornik, 8 – kabłąk/klamra (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

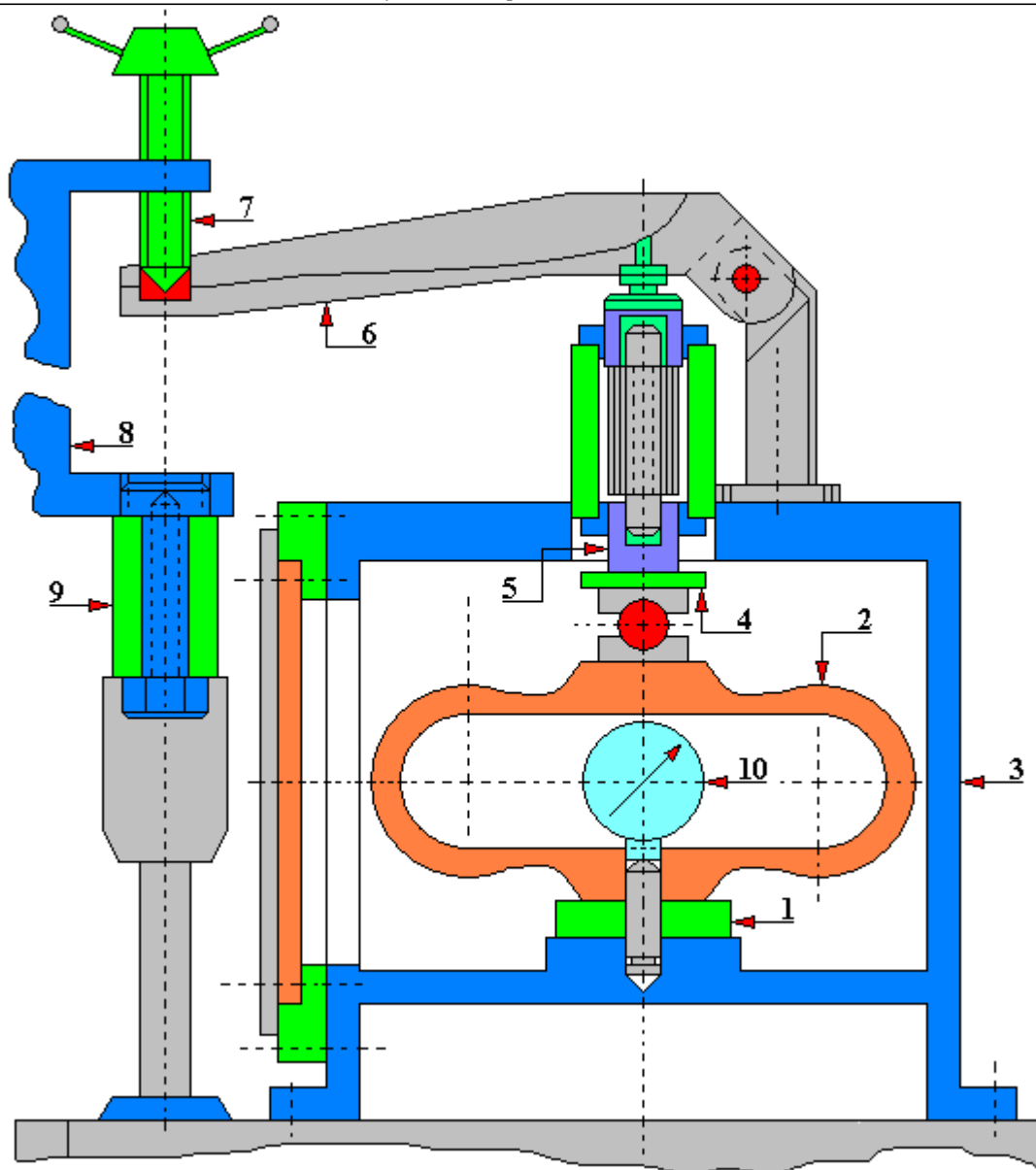


**Tabela 4.22.2. Zmierzone wartości wskazań skali mechanizmu obciążenia podczas testu do 200 kg siły (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)**

Rzeczywiste obciążenie [kg siły]	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Średnia pomiarów
20	11,0	10,0	9,0	10,0
40	42,5	42,0	41,0	41,8
60	81,0	76,0	75,0	77,3
80	105,0	106,5	105,0	105,5
100	---	138,5	137,5	138,0
120	---	182,0	169,0	175,5
140	---	222,0	212,0	217,0
160	---	271,0	260,0	265,5
180	---	310,0	306,0	308,0
200	---	---	---	



Rys. 4.22.15. Zmierzone wartości wskazań skali mechanizmu obciążenia w zależności od zadanego obciążenia dla testu do 200 kg (grafik dla wskazań wartości średniej z pomiarów 1, 2 oraz 3). Opracowano na podstawie wyników pomiarów z Tabeli 4.22.2]

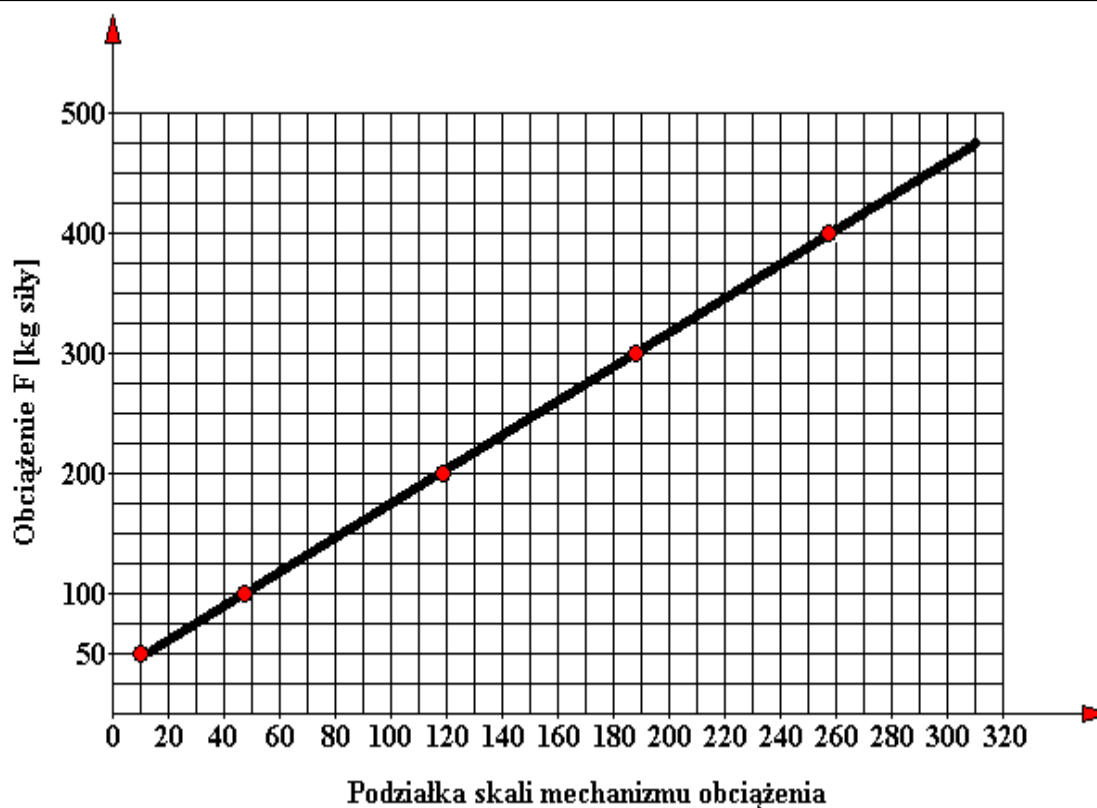


Rys. 4.22.16. Ustawienie urządzenia do wyznaczania błędu/uchybu przyłożonego obciążenia do 500 kg siły

1 – płyta, 2 – dynamometr/siłomierz typ ДОСМ-3-1 zgodny z normą GOST 9500-60, 3 – komora do badania próbek typu „tuleja-wał”, 4 – płyta, 5 – podpora, 6 – dźwignia, 7 – śruba, 8 – kabłąk/klamra, 9 – przedłużacz, 10 – zegar siłomierza (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

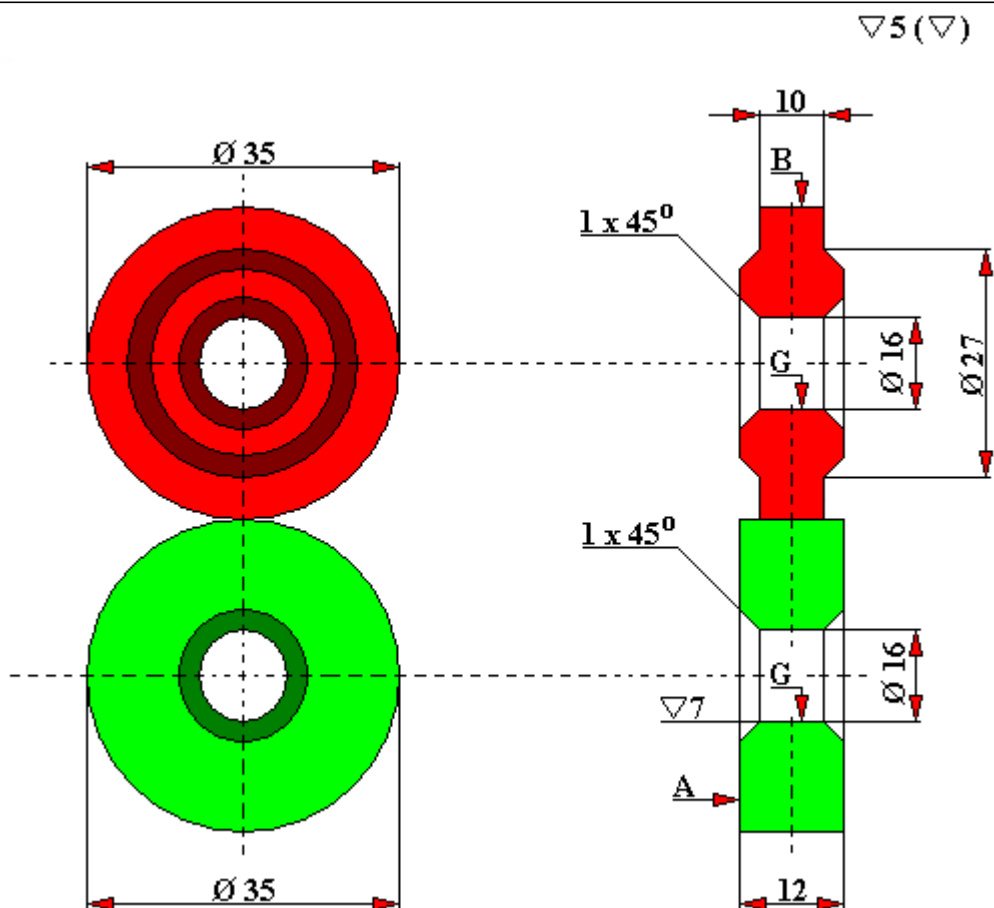
**Tabela 4.22.3. Zmierzone wartości wskazań skali mechanizmu obciążenia podczas testu do 200 kg siły (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)**

Rzeczywiste obciążenie [kg siły]	Wskazania skali mechanizmu obciążenia
50	10
100	48
200	118
300	188
400	258
500	----



Rys. 4.22.17. Zmierzone wartości wskazań skali mechanizmu obciążenia w zależności od zadanego obciążenia dla testu do 500 kg. Opracowano na podstawie wyników pomiarów z Tabeli 4.22.3

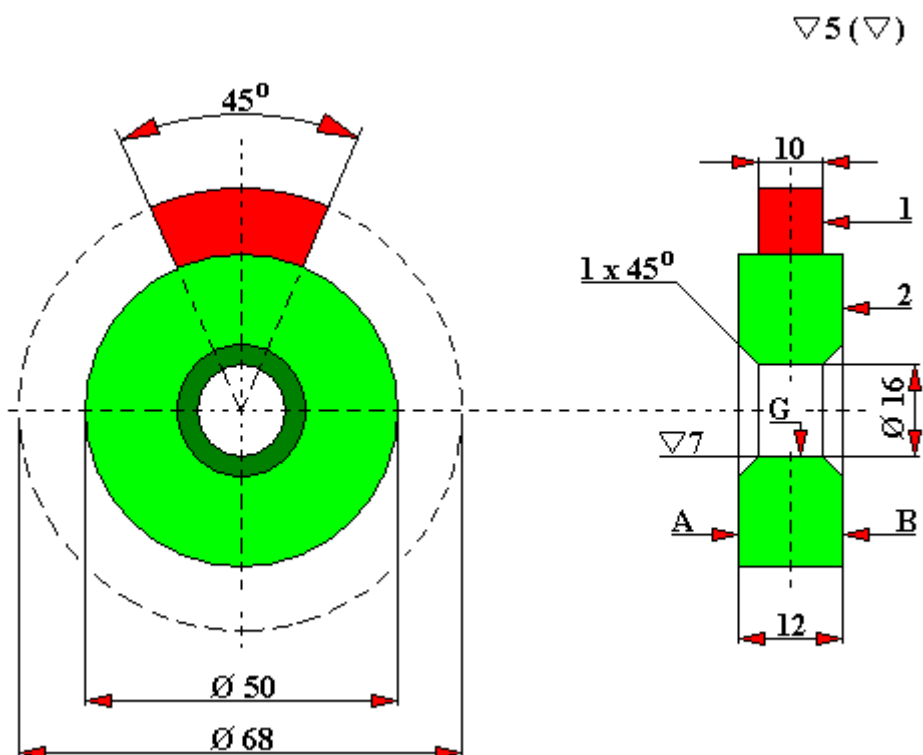
Na rysunkach 4.22.18, 4.22.19, 4.22.20, 4.22.21 oraz 4.22.22 przedstawiono typy próbek możliwe do badań na urządzeniu SCM-2. W szczególności na rys. 4.22.18 przedstawiono wymiary próbek stosowanych podczas badań tarcia tocznego dla pary kinematycznej typu krążek po krążku. Para ta może współpracować zarówno bez środka smarnego, jak również ze środkiem smarnym. Próbkę mogą być wykonane praktycznie z dowolnych materiałów, dlatego producent nie podał w dokumentacji techniczno-ruchowej gatunku/gatunków z jakich powinny być one wykonane. Tribotester ma służyć do przeprowadzania badań i wszelkie ograniczenia np. dotyczące rodzaju zastosowanych materiałów na pary cierne mogłyby być z uszczerbkiem dla nauki. Jednak ze względu na pewien reżim wymiarowy, łańcuch wymiarowy konieczne jest wykonanie badanych próbek o danych wymiarach, odchyłkach oraz o danym kształcie.



Rys. 4.22.18. Próbkę okrągłe (krążek po krążku).

Nierównoległość powierzchni A do powierzchni B maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie czołowe powierzchni A względem powierzchni G maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie promieniowe powierzchni B względem powierzchni G maksymalnie 0,03 [mm].

Na rys. 4.22.19 przedstawiono schemat współpracy oraz wymiary par ciernych dla węzła tarcia typu tarcza-kłodek. W tym przypadku występuje tarcie ślizgowe. Kształt próbki 1 (klocka) decyduje w tym przypadku o tym, jaki rodzaj styku występuje pomiędzy współpracującymi powierzchniami. Kształt próbki 1 odzwierciedla kształt przeciwpróbki 2, dzięki temu rodzaj styku jest konforemny. Rozwiązanie konstrukcyjne niniejszego tribotestera umożliwiają przeprowadzanie badań dla w/w próbek zarówno w środku smarowym jak też bez środka smarowego. Badana próbka 1 (kłodek) zamocowana jest w specjalnym uchwycie przeznaczonym zarówno dla próbek o styku konforemny jak też i styku herzowskim. Uchwyt ten został przedstawiony na rysunkach 4.22.33 oraz 4.22.34.



Rys. 4.22.19. Schemat współpracy węzła tarcia: tarcza-klocek. Styk konforemny.

1 – próbka (klocek), 2 – przeciwpróbka (tarcza)

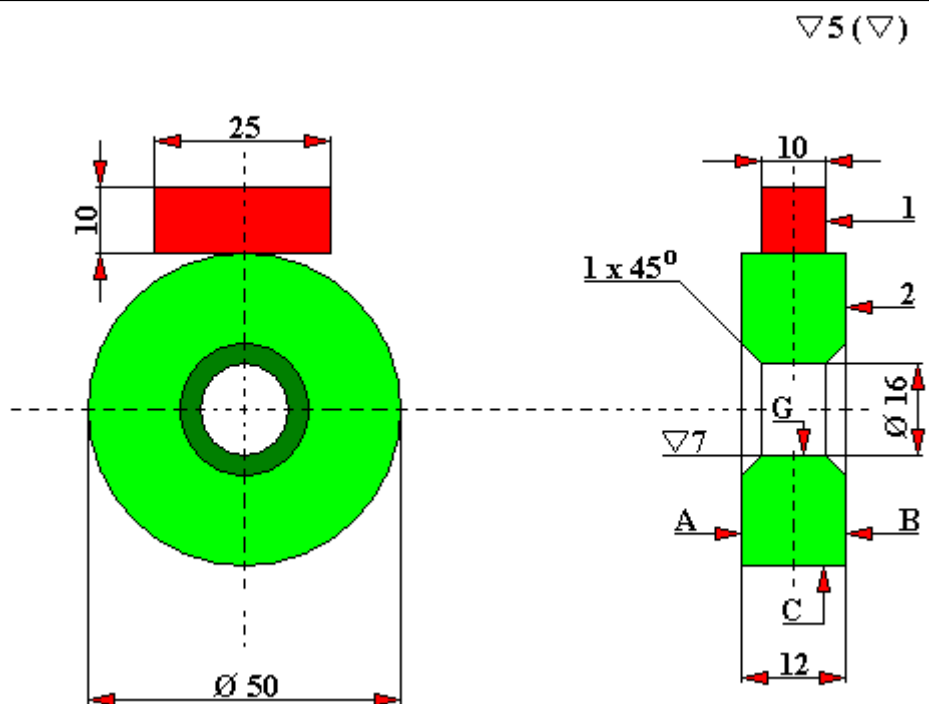
Nierównoległość powierzchni A do powierzchni B maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie czołowe powierzchni A względem powierzchni G maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie promieniowe powierzchni B względem powierzchni G maksymalnie 0,03 [mm].

Na rys. 4.22.20 przedstawiono schemat współpracy oraz wymiary par ciernych typu tarcza-klocek dla styku perzowskiego. Badana próbka 1 ma kształt prostopadłościanu o wymiarach 10x10x25 [mm]. Natomiast wymiary geometryczne przeciwpróbki 2 są identyczne jak dla próbek typu tarcza-klocek ze stykiem konforemnym. Średnica zewnętrzna przeciwpróbki wynosi  $\varnothing 50$  [mm] z ukosowanym otworem wewnętrznym o średnicy  $\varnothing 16$  [mm] przeznaczonym do zamocowania przeciwpróbki na wale napędowym. Grubość tarczy przeciwpróbki wynosi 12 [mm].

Na kolejnych rysunkach (4.22.21 oraz 4.22.22) przedstawiono schemat współpracy oraz wymiary par ciernych dla węzła typu tuleja-wał. Producent tribotestera SMC-2 rozróżnia tu dwa przypadki dotyczące obciążenia badanych próbek:

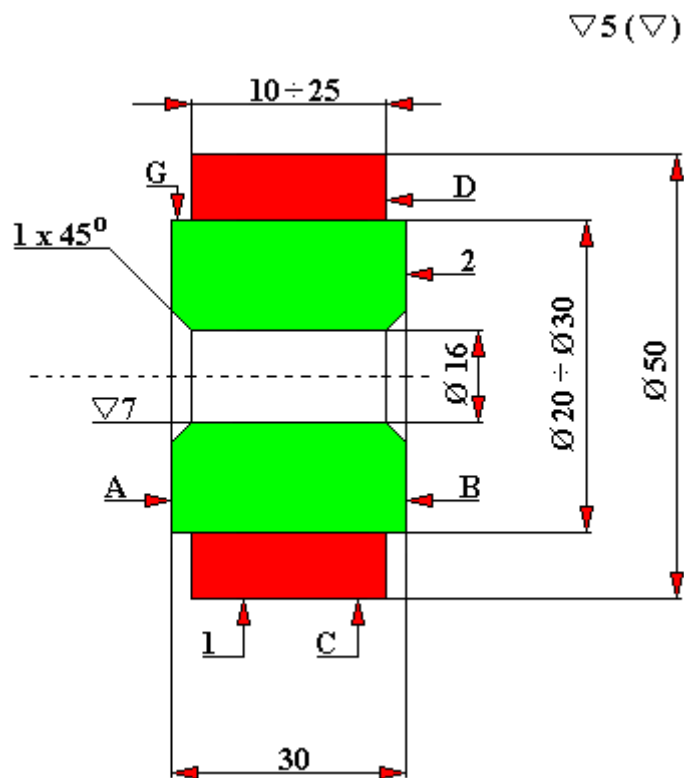
- do 250 kg siły;
- do 500 kg siły.

W tych dwóch przypadkach wymiary geometryczne zarówno wału 2 jak i współpracującej z nim tulei 1 są różne. Pary te również mogą pracować w kontrolowanych środkach smarowych lub też bez środków smarowych.



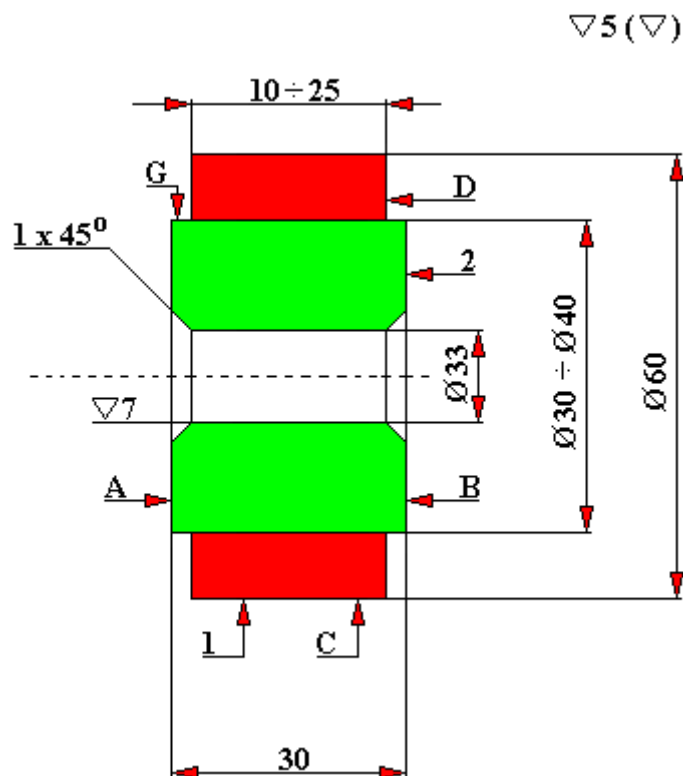
Rys. 4.22.20. Schemat współpracy węzła tarcia: tarcza-klocek. Styk herzowski.

1 – próbka (klocek), 2 – przeciwpółka (tarcza). Nierównoległość powierzchni A do powierzchni B maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie czołowe powierzchni A względem powierzchni G maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie promieniowe powierzchni C względem powierzchni G maksymalnie 0,03 [mm].



Rys. 4.22.21. Schemat współpracy węzła tarcia typu tuleja-wał. Obciążenie do 250 kg siły.

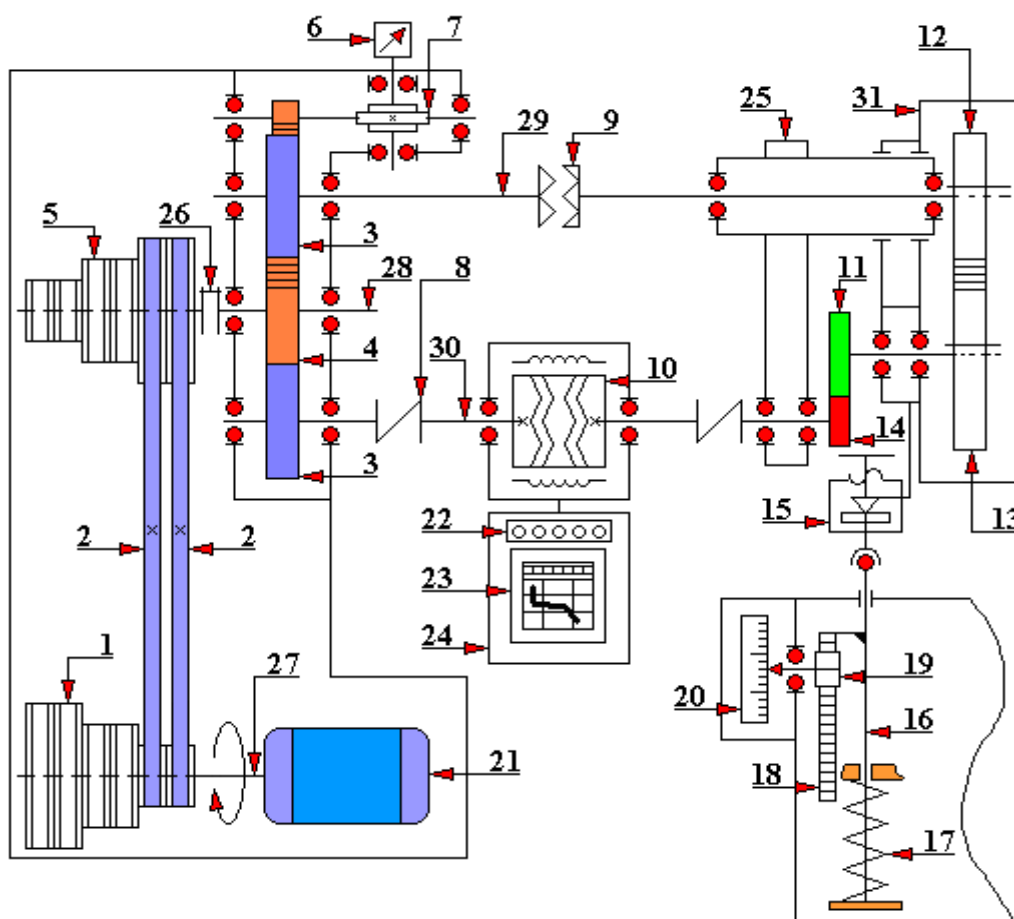
1 – tuleja, 2 – wał. Nierównoległość powierzchni A do powierzchni B oraz D maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie czołowe powierzchni A względem powierzchni B maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie promieniowe powierzchni A względem powierzchni G oraz C maksymalnie 0,03 [mm].



Rys. 4.22.22. Schemat współpracy węzła tarcia typu tuleja-wał zastosowany w tribotesterze SMC-2. Obciążenie do 500 kg siły.

1 – tuleja, 2 – wał. Nierównoległość powierzchni A do powierzchni B oraz D maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie czołowe powierzchni A względem powierzchni B maksymalnie 0,02 [mm]. Bicie promieniowe powierzchni A względem powierzchni G oraz C maksymalnie 0,03 [mm].

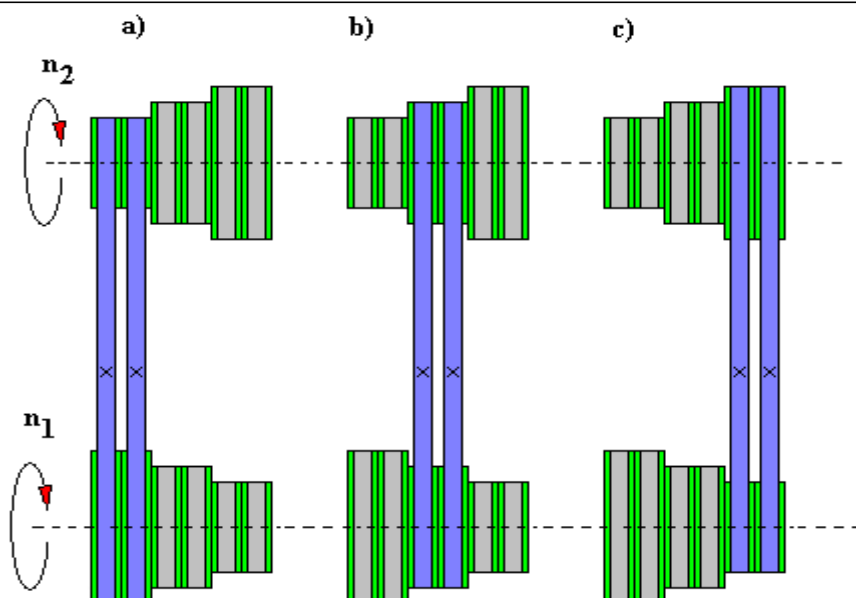
Na rys. 4.22.23 został przedstawiony schemat kinematyczny tribotesteru SMC-2. Napęd urządzenia stanowi silnik elektryczny 21 na wale którego osadzone są stopniowane koła pasowe 1. Koła te za pośrednictwem pasów klinowych 2 przekazują napęd na bierne koła pasowe 5, które z kolei poprzez sprzęgło 26 przekazują napęd do reduktora. W reduktorze oprócz zespołu kół 3,4 oraz ponownie 3, znajduje się obrotociemierz (tachometr) 6 oraz dwa wały wyjściowe 29 i 30. Wał 29 poprzez sprzęgło 9, wrzeciennik 25 dolnej próbki oraz karetkę 31 z wymiennymi kołami zmianowymi 12 i 13 napędza wałek dolnej próbki 11. Próbka ta współpracuje z próbką górną 14, która poprzez sprzęgło połączona jest z prawej strony z wałkiem skrętnym czujnika indukcyjnego 10. Natomiast druga strona wałka skrętnego czujnika indukcyjnego połączona jest również za pomocą sprzęgła z wałem 29. Czujnik indukcyjny otrzymując napęd wałka skrętnego z dwóch stron, określa wielkość momentu skręcającego (a tym samym momentu tarcia) występującego między współpracującymi próbkami 11 i 14. Wrzeciennik 25 dolnej próbki jest połączony z mechanizmem obciążenia. W ten sposób realizowany jest zarówno napęd kinematyczny tribotesteru jak również zadawanie siły obciążającej.



Rys. 4.22.23. Schemat kinematyczny pracy tribotestera CML-2 (SMC-2)

1 – koło pasowe czynne/napędowe ( $d_1 = \text{Ø}90 \text{ mm}$ ,  $d_2 = \text{Ø}133 \text{ mm}$ ,  $d_3 = \text{Ø}200 \text{ mm}$ ), 2 – pas klinowy (2 sztuki), 3 – koło zębate ( $z = 45$ ), 4 – koło zębate ( $z = 45$ ), 5 – koło pasowe bierne/napędzane ( $d_1 = \text{Ø}276 \text{ mm}$ ,  $d_2 = \text{Ø}245 \text{ mm}$ ,  $d_3 = \text{Ø}184 \text{ mm}$ ), 6 – obrotomierz (tachometr), 7 – reduktor, 8 – sprzęgło, 9 – sprzęgło przeciążeniowe, 10 – czujnik indukcyjny, 11 – próbka, 12 – koło zębate zmianowe karetki ( $z_1 = 54$ ,  $z_2 = 64$ ,  $z_3 = 62$ ,  $z_4 = 60$ ), 13 – koło zębate zmianowe karetki ( $z_1 = 54$ ,  $z_2 = 71$ ,  $z_3 = 73$ ,  $z_4 = 75$ ), 14 – przeciwpróbka, 15 – kabłąk/klamra mechanizmu obciążenia, 16 – sworzeń, 17 – sprężyna mechanizmu obciążenia, 18 – listwa zębata, 19 – koło zębate ( $z = 30$ ), 20 – skala bębnowa, 21 – silnik napędowy elektryczny (typ A-02-32/6 asynchroniczny, wirnik zwarty – klatkowy, 3-fazowy, 2,2 kW, 950 obr/min, 220/380 [V] zgodny z normą GOST 13859-68), 22 – licznik, 23 – potencjometr, 24 – pulpit sterowania, 25 – wrzeciennik dolnej próbki (przeciwpróbki), 26 – sprzęgło, 27 – wał I (silnika elektrycznego), 28 – wał II, 29 – wał III, 30 – wał IV, 31 – karetką.





Rys. 4.22.24. Schemat ustawienia pasów klinowych napędu wrzeciennika próbki (prędkość  $n_2$ ) dla następujących wartości:

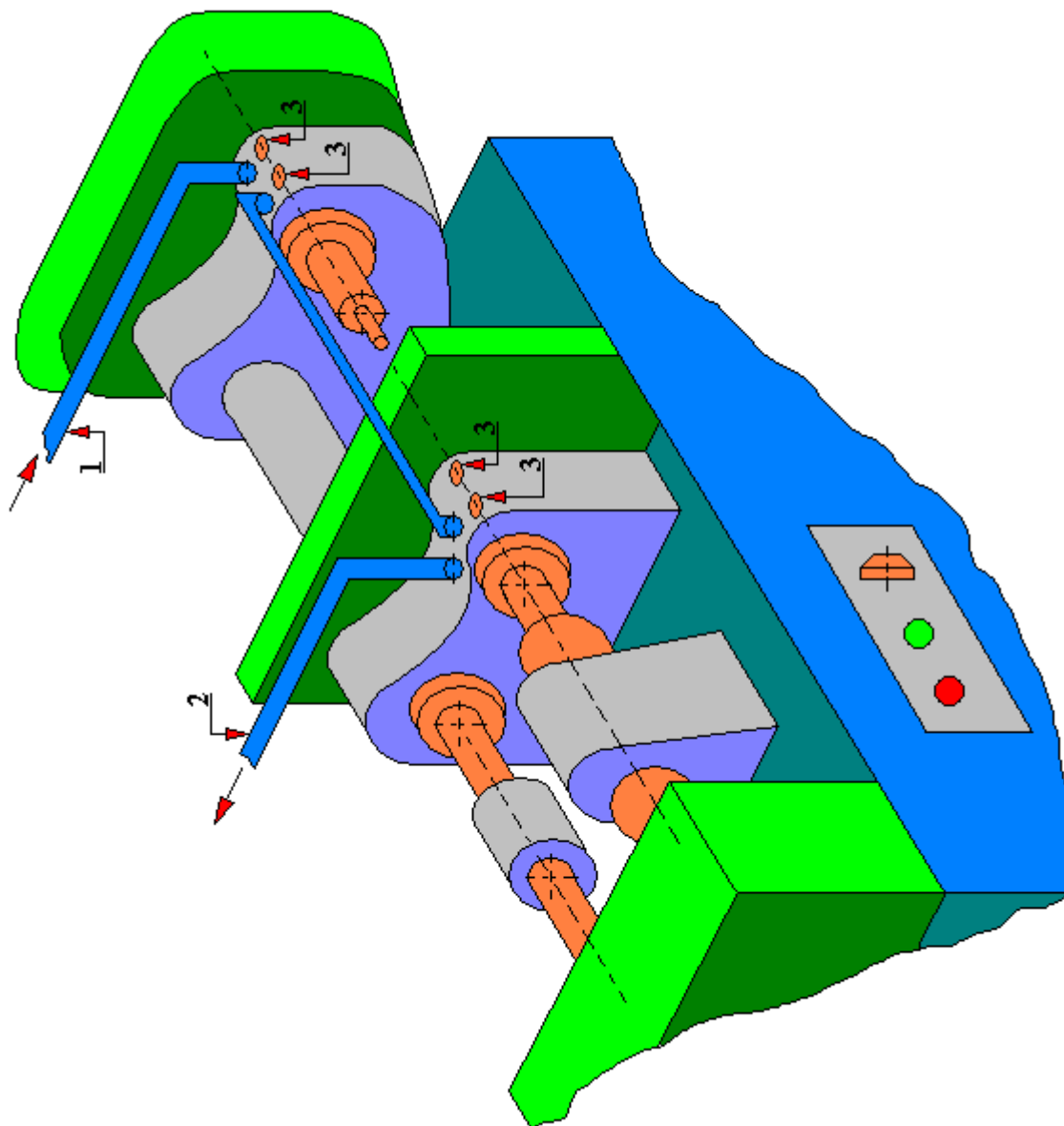
a)  $n_2 = 1000$  [obr/min], b)  $n_2 = 500$  [obr/min], c)  $n_2 = 300$  [obr/min]. Zastosowany do napędu silnik elektryczny ma następujące parametry:  $N = 2,2$  [kW],  $n_1 = 950$  [obr/min].

**Tabela 42.x. Zastosowanie kół zmianowych w zależności od rodzaju badanych próbek**

Rodzaj próbek	Rodzaj tarcia	Procentowa różnica ilości zębów kół zmianowych	Zastosowane zmianowe koła zębate
	Tarcie toczne	0%	$z_1 = 54, z_2 = 54$
	Tarcie toczne	10%	$z_1 = 64, z_2 = 71$
	Tarcie toczne	15%	$z_1 = 62, z_2 = 73$
	Tarcie toczne	20%	$z_1 = 60, z_2 = 75$
	Tarcie ślizgowe	100%	Kół zębatych można nie zmieniać przy warunku wyłączenia sprzęgła

Na rysunku 4.22.25 został przedstawiony system chłodzenia oraz miejsc smarowania zastosowany w tribotesterze SMC-2. System chłodzenia współpracujących par ciernych został zrealizowany w ten sposób, że do korpusu doprowadzona jest woda wodociągowa, natomiast jej odpływ połączony jest z kanalizacją. Obieg wody chłodzącej nie jest zamknięty. Ilość wody przepływającej przez korpus można regulować za pomocą zaworu zasilającego wodę.

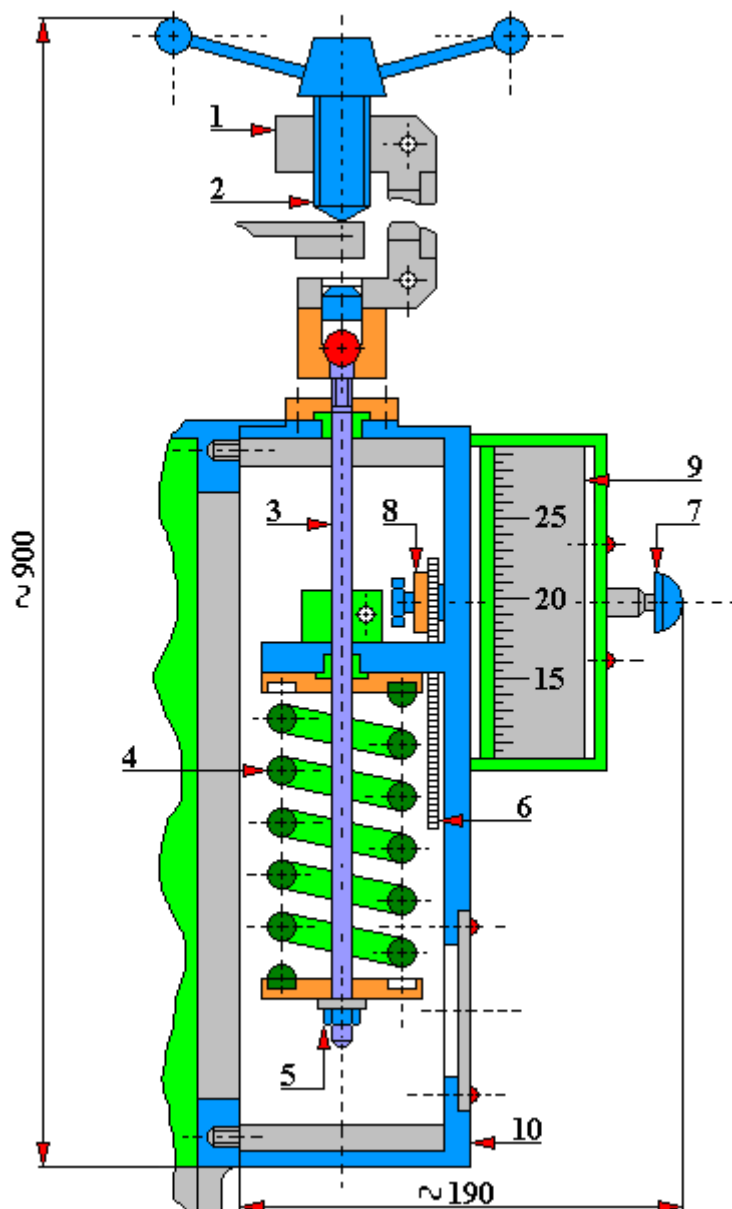
Smarowanie punktowe miejsc przedstawionych na w/w rysunku wykonuje się za pomocą ręcznych smarownic.



Rys. 4.22.25. Schemat głowicy tribotesteru CML-2 (SMC-2) ze wskazaniem punktów doprowadzenia systemu chłodzenia oraz miejsc smarowania

1 – doprowadzenie wody chłodzącej, 2 – odprowadzenie wody chłodzącej, 3 – punkty smarowania urządzenia (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

Na rysunku 4.22.26 został przedstawiony mechanizm obciążenia próbek. Zasada jego działania jest następująca. Ruch obrotowy pokrętki śruby 2 opierającej się swoim końcem o powierzchnię korpusu tribotesteru SMC-2 powoduje przemieszczenie w górę lub w dół (zależnie



Rys. 4.22.26. Mechanizm obciążenia zastosowany w tribotesterze CML-2 (SMC-2).

1 – kablak/klamra – 2 śruba, 3 – sworzeń, 4 – sprężyna śrubowa naciskowa, 5 – nakrętka M8 zgodna z normą GOST 5927-70, 6 – listwa zębata o zębach prostych, 7 – uchwyt, 8 – wałek, 9 – skala bębnowa, 10 – korpus (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

od kierunku obrotu pokrętła) jarzma (klamry) 1. W dolnej części jarzma 1 zamocowany jest sworzeń 3. Na sworzniu tym znajduje się sprężyna 4 zabezpieczona przed wysunięciem z gniazda za pomocą nakrętki 5. Przesuwający się sworzeń 3 powoduje ugięcie sprężyny 4. W zależności od wielkości obciążenia stosuje się dwa rodzaje sprężyn o różnych charakterystykach. Pierwszą sprężyną stosowaną jest dla zakresu obciążenia od 20 kg do 200 kg siły, natomiast druga – dla zakresu od 50 kg do 500 kg siły. Przesuwający się sworzeń 3 jest połączony sztywno z listwą zębatą 6, która przemieszcza się razem z nim. Listwa ta współpracuje z zębatką 8. Na wałku zębatki 8 zamocowany jest bęben skali obciążenia 9. Przesuwająca się listwa zębata 6 obraca zębatkę 8, a tym samym bęben skali obciążenia 9 wskazujący wartość siły obciążenia próbek. Wskazania skali zadanego obciążenia 9 zostały przedstawione zarówno w tabeli 4.22.3 jak i 4.22.2 oraz zbudowanych na ich podstawie wykresów graficznych przedstawionych na rysunkach odpowiednio 4.22.15 oraz 4.22.17. Wartościom skali bębnowej na

wykresach graficznych odpowiadają wartości siły zmierzonej za pomocą dynamometru znajdującego się na wyposażeniu tribotestera SMC-2. Tabele 4.22.3 oraz 4.22.2 przedstawiają wartości wskazań skali dla kilku wielkości zadanych sił (50, 100, 200, 300, 400 oraz 500 kg siły dla jednego zakresu oraz wartości 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 kg obciążenia dla drugiego zakresu siły). Użytkownik tribotestera może opracować własną tablicę wskazań skali mechanizmu obciążenia (mniej lub bardziej dokładną) w zależności od własnych potrzeb. Na podstawie danych zawartych w w/w tablicach zbudowano wykresy graficzne (rys. 4.22.15 oraz 4.22.17) ułatwiające odczytywanie na skali bębnowej mechanizmu obciążenia odpowiadającej jej wartości zadanego obciążenia. Należy pamiętać, że skala bębnowa 9 posiada umowną podziałkę. Ustawianie skali na „0” następuje za pomocą obrotu uchwytem 7, który uprzednio należy nacisnąć. Natomiast wstępne napięcie sprężyny obciążenia realizuje się za pomocą nakrętek 5.

W celu pomiaru momentu tarcia badanych próbek na niniejszym urządzeniu tribologicznym zastosowano bezkontaktowy/bezdotykowy czujnik indukcyjny przedstawiony na rys. 4.22.27. Czujnik ten zbudowany jest z dwóch głównych części:

- obrotowego rotora,
- nieruchomego statoru.

Główną częścią rotora jest drążek skrętny 6, który za pośrednictwem przełączalnych sprzęgieł (nie przedstawionych na rysunku) łączy się w węzeł siłowy tribotestera. Dzięki czemu możliwy jest pomiar momentu skrętnego pojawiającego się podczas badania próbek. Na roboczej długości drążka skrętnego 6 znajdują się trzy obręcze (wieńce), na których mocuje się przestawne pierścienie 7. Pierścienie te wykonane są z paramagnetyku. Na przestawnych pierścieniach 7 zamocowano pierścienie 8 wykonane z miękkiej magnetycznej stali. Boczne powierzchnie pierścieni 8 wykonano w kształcie zębów. Natomiast nieruchomy stator wykonano w kształcie cylindra składającego się z tulei 2 oraz pierścieni 3. Stator mocowany jest do korpusu czujnika indukcyjnego za pomocą śrub 1. W rowkach przewodów magnetycznych statora rozmieszczono cewki zasilające 4 oraz cewki pomiarowe 5. Przewody magnetyczne statora wykonano z miękkiej magnetycznej stali.

Czujnik indukcyjny posiada dwie charakterystyczne powietrzne szczeliny robocze:

- S1 – promieniowa szczelina powietrzna pomiędzy ruchomym rotorem i nieruchomym statorem; szczelina ta oddziela na całej długości rotor od statora i stanowi opór dla strumienia magnetycznego  $\Phi$ ; wielkość zmiany tej szczeliny roboczej w wyniku nieuniknionego bicia promieniowego rotora względem statora można zlekceważyć, ponieważ jest niewielka; jej wartość jest rzędu setnych części milimetra;
- S2 – szczelina w elementach rotora wynosząca początkowo 0,8 mm i mogąca się zmieniać z powodu skręcania drążka 6.

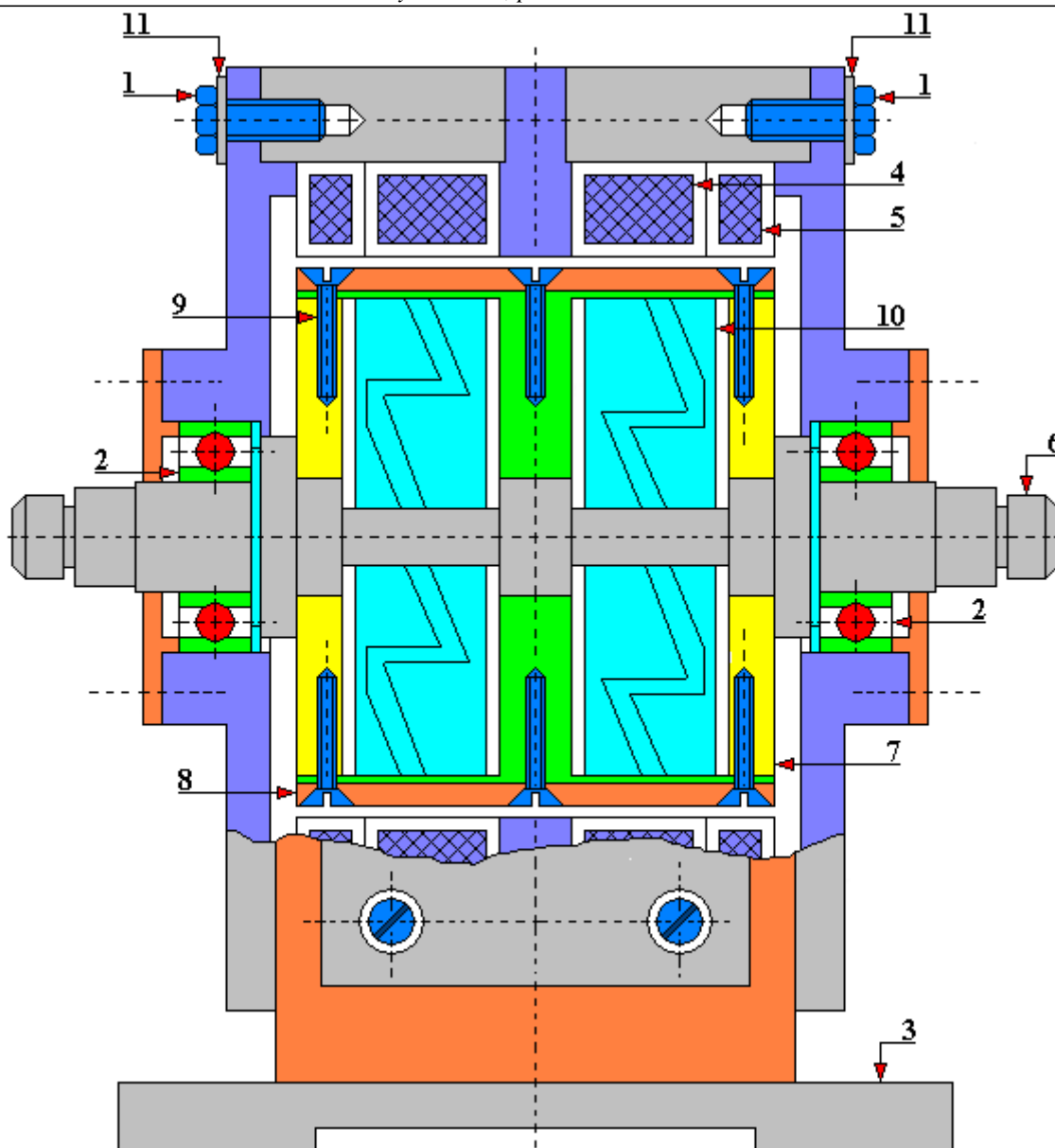
Magnetyczny strumień  $\Phi$  statora powstający dzięki cewkom zasilającym 5, rozdziela się w rotorze na dwie części i przechodzi przez następujące elementy:

stator → promieniowa szczelina S1 → środkowy pierścień 8 → robocze szczeliny S2 z prawej i lewej połowy rotora → krańcowe pierścienie 8 → promieniowa szczelina S1 → stator.

Podczas braku momentu skręcającego szczeliny robocze S2 z prawej i lewej części rotora są sobie równe i strumień magnetyczny  $\Phi$  rozdziela się w rotorze na dwie równe części. Ponieważ pomiarowe cewki 5 opływane są strumieniem magnetycznym o tej samej wielkości, to w nich pojawiają się równe co do wielkości siły elektrodynamiczne (SEM). W czasie badań pojawia się moment tarcia, który skręca wał dolnej próbki. Drugi koniec wału połączono z drążkiem skrętnym 6 czujnika indukcyjnego. Pod działaniem tego momentu drążek skrętny 6 skręca się, a skrajne pierścienie 8 rotora przesuwają się względem środkowego pierścienia 8 w różne strony na równe kąty. Dzięki temu zmieniają się robocze szczeliny S2 w lewej i prawej części rotora (z jednej strony rotora szczeliny się powiększają, natomiast z drugiej – zmniejszają). Powstały strumień magnetyczny  $\Phi$  w rotorze rozdziela się, przy czym większa jego część

przechodzi przez część (połówkę), gdzie szczeliny robocze S2 zmniejszyły się. Dlatego SEM w jednej cewce pomiarowej zwiększa się tak, jak zwiększył się strumień magnetyczny, przez który jest ona opływana. Natomiast w drugiej zmniejsza się tak, jak zmniejszył się ten strumień. W ten sposób zmiana wartości SEM w cewkach pomiarowych 5 przechodzi proporcjonalnie do zmian szczelin roboczych S2 (strumieni) lub proporcjonalnie do mierzonego momentu skręcającego. Elektryczne sygnały z cewek pomiarowych przekazywane są do modułu porównawczego, a następnie do elektronicznego potencjometru, który wyświetla i zapisuje wartość zmierzonego momentu tarcia występującego w procesie badania próbek dla danych warunków pracy pary tarciowej.

Zasilanie cewki pierwotnej 5 czujnika indukcyjnego następuje za pomocą stabilizowanego napięciem ferrezonansowego stabilizatora napięcia (nie przedstawionego na rysunku). Cewki pomiarowe (dwie pary cewek wtórnych 4) połączone są z rezystorami R3, R5 oraz potencjometrem elektronicznym EP znajdującymi się we wnętrzu pulpitu sterującego. Podczas braku momentu tarcia wartości napięć na cewkach pomiarowych czujnika indukcyjnego są sobie równe (są prawie identyczne). Wówczas wartość napięcia wskazywana przez potencjometr elektroniczny wynosi zero. W rzeczywistości w praktyce nie jest możliwe, aby obie cewki pomiarowe wskazywały absolutnie zero (z powodu m.in. nierównomierności szczelin w czujniku, niejednorodności materiału cewek, statora, rotora itp.). Dlatego też, przy braku momentu tarcia napięcia cewek pomiarowych lewej i prawej części czujnika nie są równe między sobą i potencjometr elektroniczny będzie wskazywać pewną niewielką wartość. Do balansowania pomiarowego obwodu służą rezystory R2 (dla regulacji zgrubnej) oraz R7 (dla regulacji dokładnej), przy pomocy których ustawia się położenie zerowe wyświetlacza potencjometru elektronicznego EP. Rezystory R2 i R7 również znajdują się we wnętrzu pulpitu sterującego. Pod działaniem mierzonego momentu tarcia zostaje naruszony punkt równowagi w zasilaniu pomiarowych cewek czujnika indukcyjnego. Obwód wychodzi z punktu równowagi, a sygnał rozbalansowania, proporcjonalny do wartości mierzonego momentu, podawany jest na wejście potencjometru elektronicznego EP, który rejestruje wartość zmierzonego momentu tarcia. Dokładny algorytm dotyczący tarowania niniejszego tribotestera zawarty jest w dokumentacji techniczno-ruchowej dołączonej do niniejszego tribotestera i dotyczy głównie personelu obsługi tego urządzenia. Warto jednak tu dodać, że wałek napędowy czujnika indukcyjnego jest połączony z wałkiem na którym osadzona jest badana próbka dolna.



Rys. 4.22.27. Czujnik indukcyjny zastosowany w triboteście CML-2 (SMC-2).

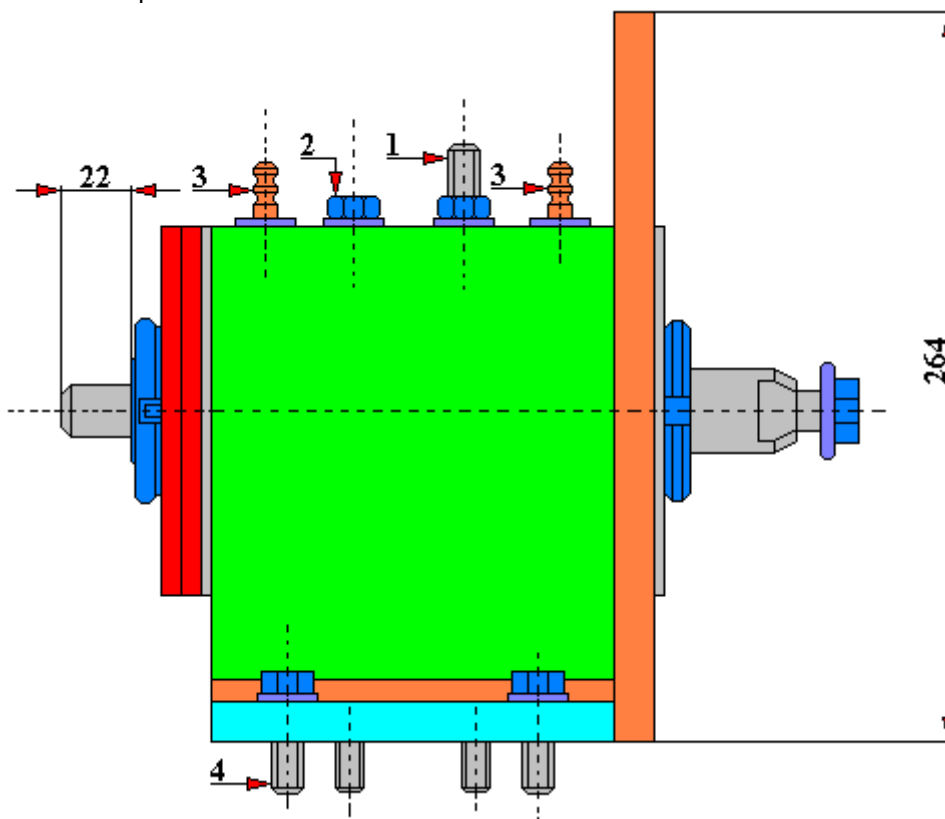
1 – śruba M6x16 zgodna z normą GOST 1491-72, 2 – łożysko, 3 – korpus, 4 – cewka uzwojenia wtórnego, 5 – cewka uzwojenia pierwotnego, 6 – wałek napędowy/drażek skrętny, 7 – pierścień, 8 – pierścień, 9 – śruba mocująca pierścień 8, 10 – magnes, 11 – podkładka (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

Na rysunkach 4.22.28 oraz 4.22.29 przedstawiono wrzeciennik dolnej próbki przeznaczony do mocowania próbek na wale 9 za pomocą specjalnej nakrętki 10. Wrzeciennik ten ma skomplikowaną budowę, która ma zapewnić sztywność i pewność mocowania badanych próbek. W skład jego budowy wchodzi wał 7 ułożony w łożyskach poprzecznych 6, które znajdują się w korpusie 5. Zastosowano labiryntowe uszczelnienie łożysk w celu zminimalizowania w nich tarcia, które mogłyby wnieść dodatkowy błąd podczas pomiaru wartości momentu tarcia badanych próbek. Smarowanie łożysk 6 realizowane jest za pomocą smarowniczkę 3. Łożyska chłodzone są wodą krążącą w układzie korpusu 5. Wał 9 przeznaczony jest do przeprowadzania badań z próbkami okrągłymi typu tarcza-tarcza oraz z próbkami typu tarcza-kłosek. W czasie przeprowadzania badań wał 9 wkręca się częścią gwintową w wał 7, który opiera się na nakrętce 11. Nakrętka ta zamocowana jest na śrubie 8.

Podczas przeprowadzania badań z próbkami typu wał-tuleja wał 9 zastępuje się wałami 11 – inny dla zakresu średnic od  $\varnothing 24 \div \varnothing 30$  mm, inny dla zakresu średnic od  $\varnothing 30 \div \varnothing 40$  mm.

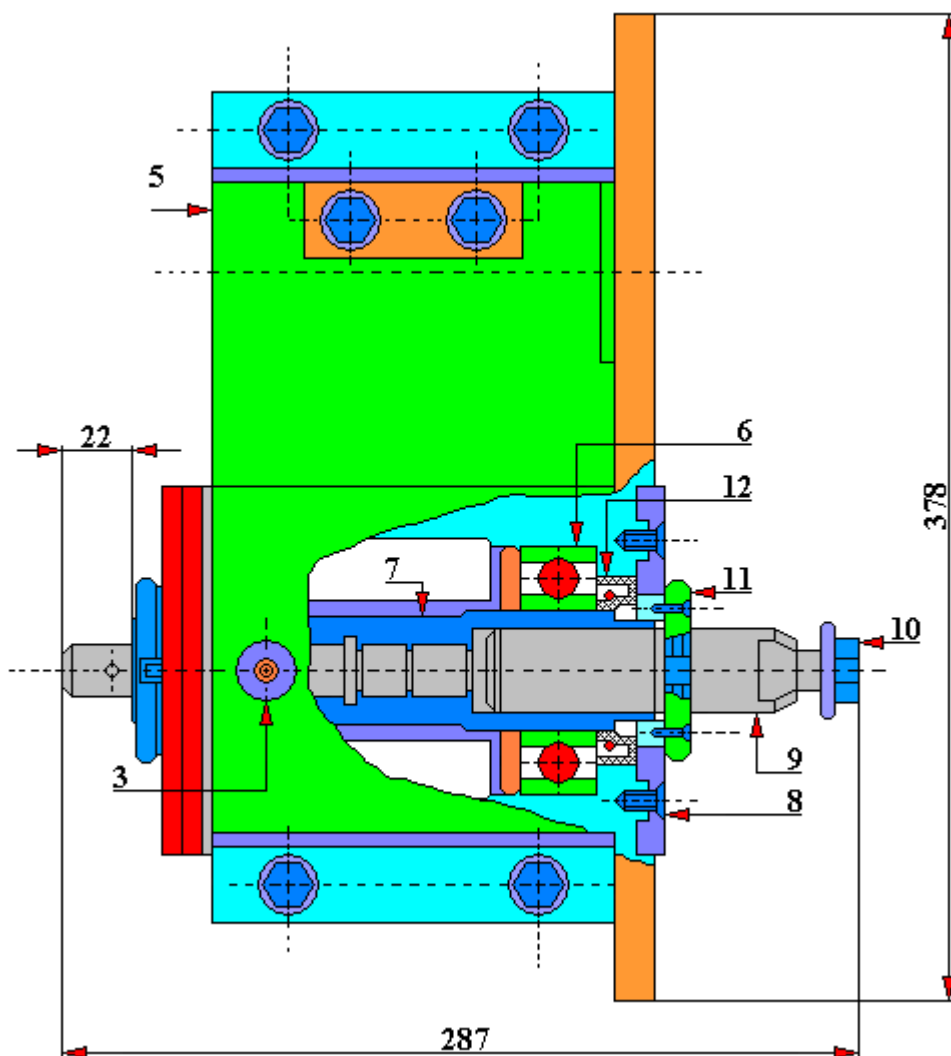
Karetki (wózek) mocowana jest we wrzecienniku dolnej próbki za pomocą szpilki 1 (śruba dwustronnie gwintowana), którą kontruje się za pomocą nakrętki 2. W celu ułatwienia zdjęcia karetki z korpusu wrzeciennika zastosowano śrubę 4.

Wrzeciennik dolnej próbki mocuje się na zewnętrznej płaszczyźnie kadłuba tribotestera śrubami i ustala trzpieniami.



Rys. 4.22.28. Widok ogólny (z boku) wrzeciennika dolnej próbki tribotestera CML-2 (SMC-2).

1 – śruba dwustronna (dwukońcówkowa) M16x80 zgodna z normą GOST 11765-66, 2 – nakrętka M16 zgodna z normą GOST 5927-70, 3 smarowniczką typ I-W zgodna z normą GOST 1303-56, 4 – śruba, 5 – korpus, 6 – łożysko П 210 zgodne z normą GOST 8338-57, 7 – wał, 8 – śruba M5x16 zgodna z normą GOST 17475-72, 9 – wał, 10 – nakrętka, 11 – nakrętka, 12 – pierścień uszczelniający (powyższy opis dotyczy rysunków 4.22.28 oraz 4.22.29; opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

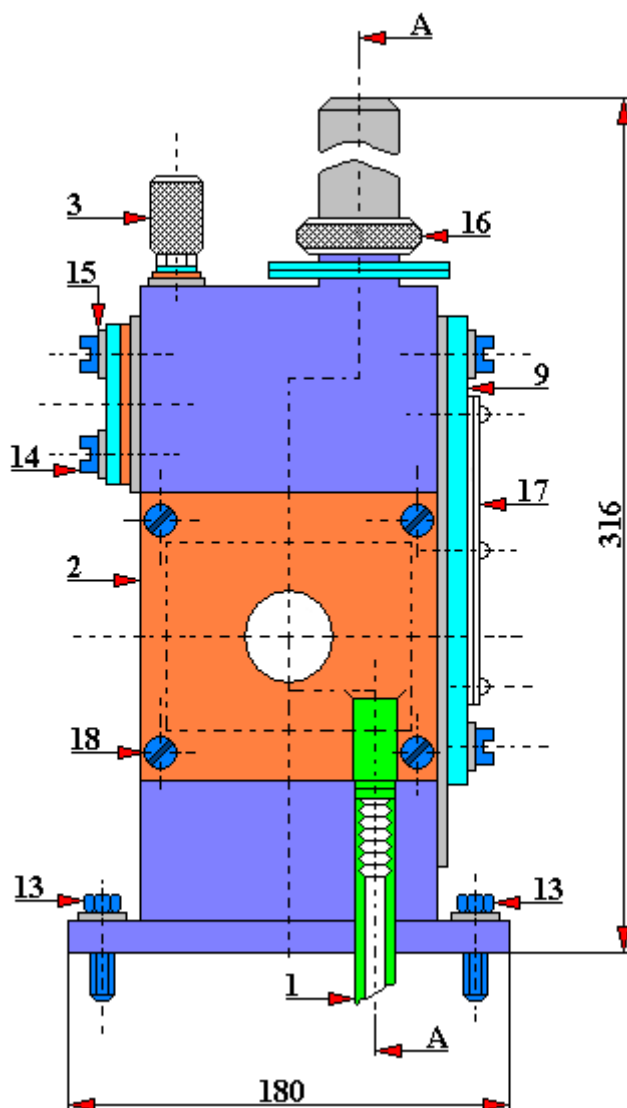


Rys. 4.22.29. Widok z góry wraz z przekrojem częściowym wrzeciennika dolnej próbki tribotestera CML-2 (SMC-2).

1 – śruba dwustronna (dwukońcówkowa) M16x80 zgodna z normą GOST 11765-66, 2 – nakrętka M16 zgodna z normą GOST 5927-70, 3 smarownicza typ I-W zgodna z normą GOST 1303-56, 4 – śruba, 5 – korpus, 6 – łożysko П 210 zgodne z normą GOST 8338-57, 7 – wał, 8 – śruba M5x16 zgodna z normą GOST 17475-72, 9 – wał, 10 – nakrętka, 11 – nakrętka, 12 – pierścień uszczelniający (powyższy opis dotyczy rysunków 4.22.28 oraz 4.22.29; opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

Na rysunkach 4.22.30 oraz 4.22.31 została przedstawiona komora do badań próbek okrągłych oraz typu tarcza-klocek. Korpus komory jest odlewany. Boczna ścianka komory od strony wału dolnej próbki jest zamykana pokrywką 2. W pokrywkę tę wkręcony jest króciec 1 przeznaczony do zlewu zużytego środka smarnego przepływającego przez dławik uszczelniający. Boczna ścianka komory od strony wału górnej próbki zamknięta jest pokrywką 6 oraz pokrywą 5, w której znajduje się uszczelnienie kołnierzowe. Dzięki możliwości przesuwania (w pewnych granicach) pokrywy 5, możliwe jest przyłożenie obciążenia do górnej próbki i zapewnieniu dzięki temu stałego kontaktu pomiędzy współpracującymi próbkami dolną oraz górną w miarę ich zużycia powstałego w procesie badawczym. Przednia część komory badawczej zamknięta jest pokrywą 9 z oknem przezroczystym, przez które można obserwować przebieg badanego procesu zużycia współpracujących próbek. Wewnętrzna powierzchnia komory jest podświetlona za dzięki

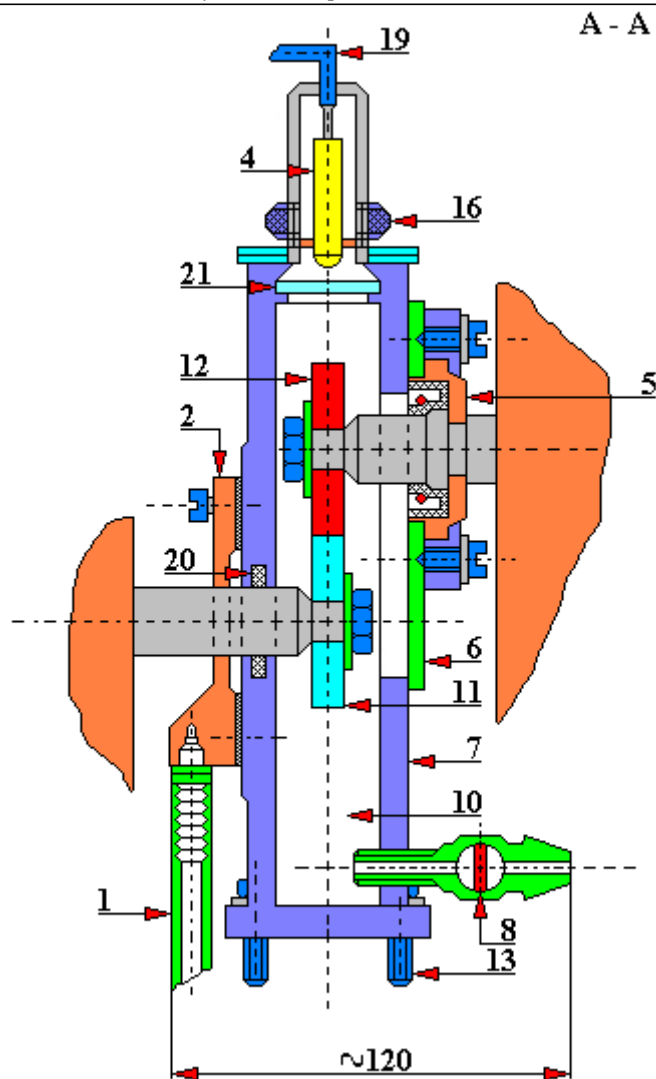




Rys. 4.22.30. Widok ogólny komory badawczej przeznaczonej do wykonywania testów tribologicznych dla próbek okrągłych oraz typu tarcza-kłoczek zastosowana w tribotesterze CML-2 (SMC-2).

1 – króciec, 2 – pokrywa, 3 – radełkowana złączka rurowa, 4 żarówka oświetleniowa typ MH 6,3 – 0,22 zgodna z norma GOST 2204-64, 5 – pokrywa, 6 – pokrywa, 7 – korpus, 8 – zawór spustowy środka smarnego, 9 – korpus, 10 - wnętrze komory badawczej przeznaczonej na środek smarny, 11 – badana próbka, 12 – przeciwpróbka, 13 – śruba mocująca korpus komory do korpusu tribotesteru, 14 – śruba mocująca pokrywę komory badawczej, 15 – podkładka, 16 – radełkowana nakrętka mocująca lampę oświetleniową wewnątrz komory badawczej, 17 – okienko z plexi, 18 – śruba mocująca pokrywę nr 2, 19 – elektryczny przewód zasilający żarówkę, 20 – pierścień uszczelniający, 21 – szklany klosz (przedstawiony opis dotyczy rysunków 4.22.30 oraz 4.22.31; opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

lampie 4. Podawanie środka smarnego do komory badawczej jest realizowane za pomocą króćca 3. Natomiast zlew zużytego środka smarnego z komory realizowany jest za pomocą kranu 8. Urządzeń do podawania środka smarnego (instalacji pompy ssąco-tłoczącej) niniejsze rozwiązanie konstrukcyjne komory badawczej nie posiada.

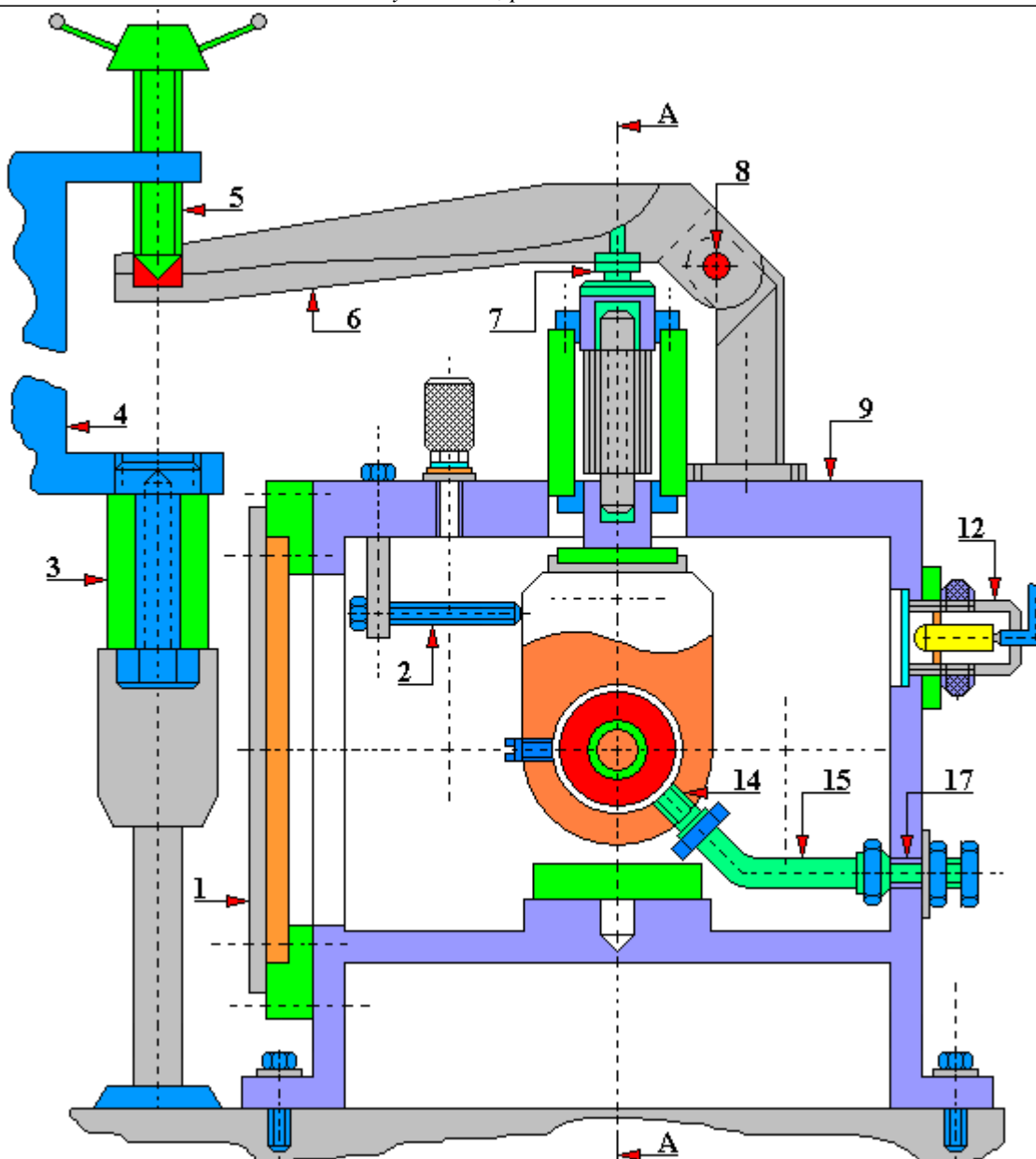


Rys. 4.22.31. Przekrój A-A komory badawczej przeznaczonej do wykonywania testów tribologicznych dla próbek okrągłych oraz typu tarcza-kłoczek zastosowana w tribotesterze CML-2 (SMC-2).

1 – króciec, 2 – pokrywa, 3 – radełkowa złączka rurowa, 4 żarówka oświetleniowa typ MH 6,3 – 0,22 zgodna z normą GOST 2204-64, 5 – pokrywa, 6 – pokrywa, 7 – korpus, 8 – zawór spustowy środka smarnego, 9 – korpus, 10 – wewnątrz komory badawczej przeznaczonej na środek smarny, 11 – badana próbka, 12 – przeciwpróbka, 13 – śruba mocująca korpus komory do korpusu tribotesteru, 14 – śruba mocująca pokrywę komory badawczej, 15 – podkładka, 16 – radełkowana nakrętka mocująca lampę oświetleniową wewnątrz komory badawczej, 17 – okienko z plexi, 18 – śruba mocująca pokrywę nr 2, 19 – elektryczny przewód zasilający żarówkę, 20 – pierścień uszczelniający, 21 – szklany klosz (przedstawiony opis dotyczy rysunków 4.22.30 oraz 4.22.31; opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

Komora badawcza jest montowana do korpusu tribotesteru SMC-2 za pomocą śrub.

Na rys. 4.22.32 przedstawiono komorę przeznaczoną do badań typu tuleja-wał. Korpus tej komory również jest wykonany jako odlew. Boczna ścianka tej komory od strony wału dolnej próbki jest zamknięta pokrywą 16. W pokrywę tę wkręca się króciec 18 przeznaczony do zlewu zużytego środka smarnego przepływającego przez uszczelnienie kołnierzowe. Z przeciwnej strony komora zamknięta jest pokrywą 21 z zamontowa -



Rys. 4.22.32. Widok ogólny komory badawczej tribotestera CML-2 (SMC-2) przeznaczonej do wykonywania testów tribologicznych dla próbek typu wał-tuleja.

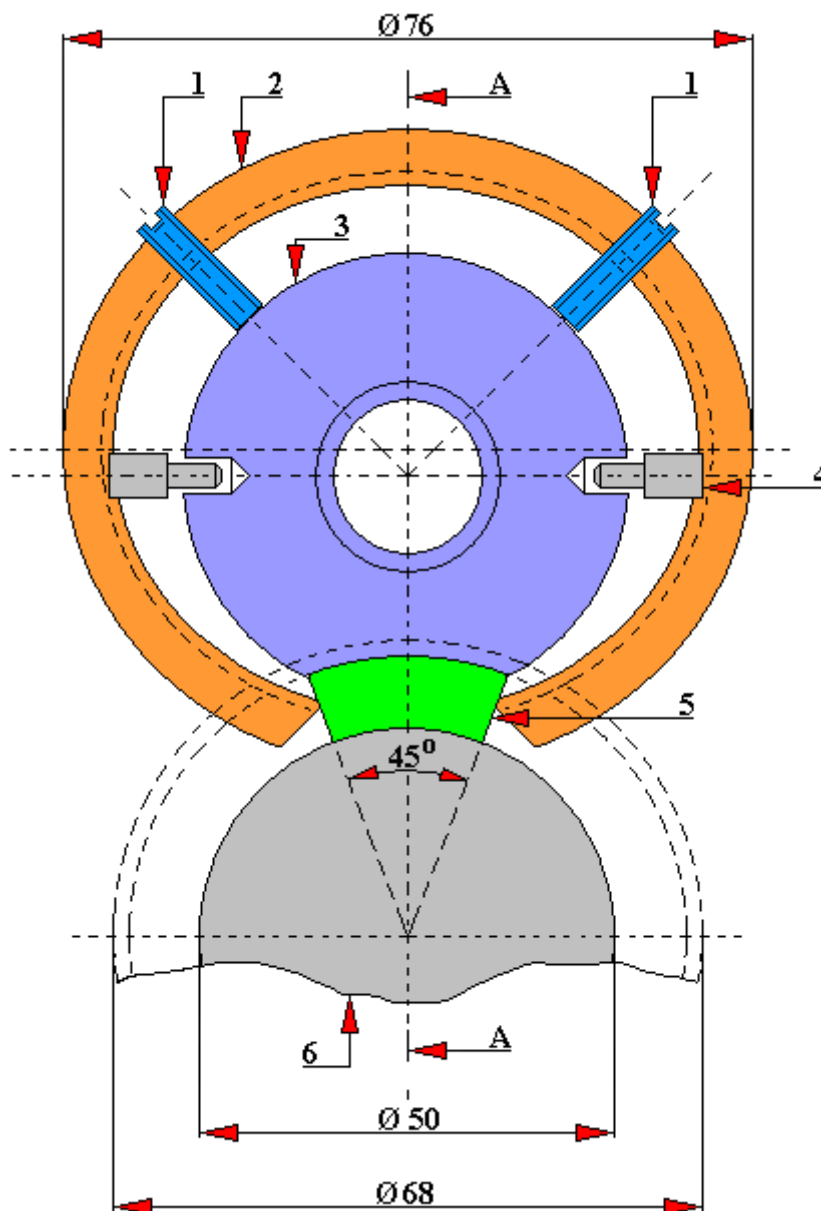
1 – pokrywa, 2 – śruba, 3 – przedłużacz, 4 – kabłąk/klamra, 5 – śruba, 6 – dźwignia, 7 – podpora, 8 – drążek, 9 – korpus, 10 - podpora, 11 – obejmajarżmo, 12 – lampa oświetleniowa typu MH 6.3-0,22 zgodna z normą GOST 2204-69, 13 – wał, 14 – króciec (złączka rurowa), 15 – rurka Б.230 – 6x0,3 typ МРТУ 6-05-919-63, 16 – pokrywa, 17 – króciec (złączka rurowa), 18 – króciec (złączka rurowa), 19 – zawór spustowy, 20 – łożysko typ 306 zgodne z normą GOST 8338-57, 21 – pokrywa, 22 - nakrętka (przedstawiony opis dotyczy całej komory badawczej)

nym w niej łożyskiem 20. Od strony mechanizmu obciążenia, poprzez przedłużacz klamry (kabłąka) 3, klamrę 4, śrubę 5, dźwignię 6, opór (podporę) 7, drążek 8 i opór z pryzmą 10 możliwe jest przyłożenie obciążenia do górnej próbki – tulei umocowanej w uchwycie (objejmie) dla próbek. Podczas przeprowadzania badań obejmaj 11 zabezpieczona jest przed obracaniem za pomocą specjalnej śruby 2. Drążek 8 swobodnie przemieszcza się w uchwytach kulowych.

Dolną próbkę mocuje się na wałe 13 za pomocą nakrętki 22. Wał 13 i pokrywa 21 w której na łożysku mocuje się jeden koniec wału wykonany jest w dwóch odmianach:

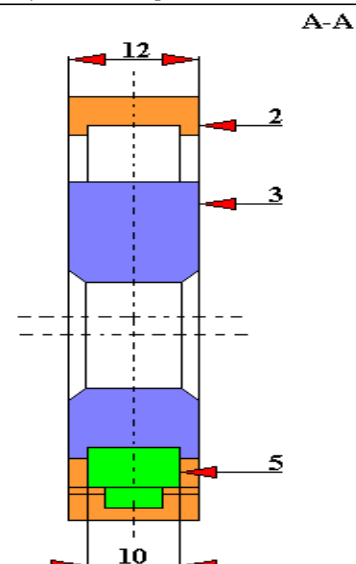
- dla pracy z próbkami o średnicy wału od  $\varnothing 24$  mm do  $\varnothing 30$  mm;
- dla pracy z próbkami o średnicy wału od  $\varnothing 30$  mm do  $\varnothing 40$  mm.

Wał 13 oraz pokrywa 19 są wymienne. Przednia ścianka komory jest zamknięta pokrywą 1 z oknem przezroczystym przeznaczonym do obserwacji procesu zużycia. Wnętrze komory jest oświetlone za pomocą lampy 12. Podawanie środka smarnego następuje bezpośrednio do strefy tarcia poprzez króciec 14, przewód rurowy 15 i króciec 17. Zlew zużytego środka smarnego z komory badawczej następuje za pośrednictwem zaworu/kranu 19. Komora ta jest mocowana do korpusu tribotestera za pomocą śrub.



Rys. 4.22.33. Uchwyt do próbek typu klocek zastosowany w tribotesterze CMLI-2 (SMC-2).

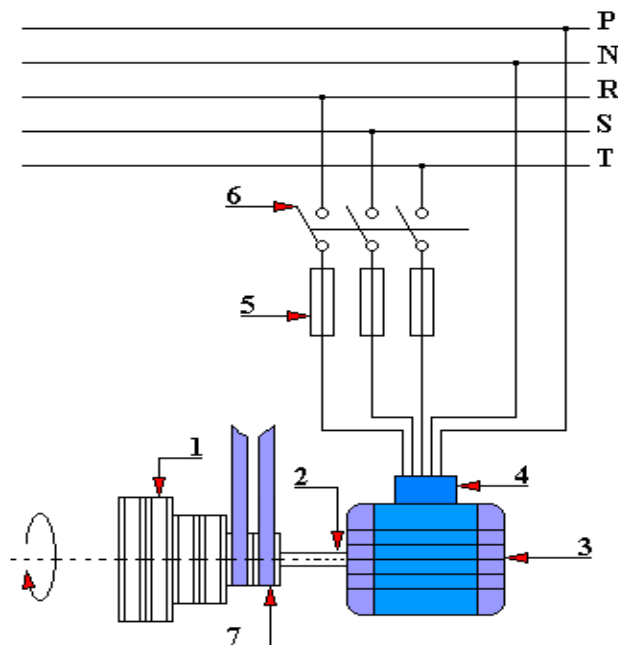
1 – śruba M5x20 zgodna z normą GOST 1477-64, 2 - jarzmo, 3 – pierścień, 4 – kołek, 5 – próbka typu klocek, 6 – przeciwpółka (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)



Rys. 4.22.34. Przekrój A-A uchwyty do próbek typu klocek zastosowany w triboteście CML-2 (SMC-2) zgodnie z rys. 4.22.33.

2 - jarzmo, 3 - pierścień, 5 - próbka typu klocek (opracowano na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej)

Na rys. 4.22.35 przedstawiono schemat elektryczny podłączenia głównego silnika napędowego tribotestera do sieci energetycznej. Do napędu tribotestera zastosowano silnik trójfazowy asynchroniczny zwarty klatkowy typu A-02-32/6 (zgodny z normą GOST) o mocy 2,2 [kW] i obrotach 950 [obr/min]. Silnik zabezpieczony jest przed zwarciami sieci bezpiecznikami topikowymi 16 [A]. Na wale silnika osadzone są stopniowane koła pasowe o następujących średnicach:  $\varnothing 90$  mm,  $\varnothing 133$  mm,  $\varnothing 200$  mm. Czynne koła pasowe współpracują z biernymi kołami pasowymi o średnicach:  $\varnothing 276$  mm,  $\varnothing 245$  mm,  $\varnothing 184$  mm. Na każdym stopniu przekładni pasowej zamontowane są dwa pasy klinowe.



Rys. 4.22.35. Schemat elektryczny podłączenia silnika napędowego tribotestera CML-2 (SMC-2)

1 - koło pasowe, 2 - wał silnika elektrycznego, 3 - silnik napędowy typ A-02-32/6 asynchroniczny, wirnik zwarty-klatkowy, 3-fazowy, 2,2 [kW], 950 [obr/min], 220/380 [V] zgodny z normą GOST 13859-68, 4 - puszka przyłączeniowa elektryczna, 5 - bezpiecznik topikowy 16 [A], 6 - wyłącznik główny, 7 - pas klinowy, P - przewód ochronny, N - przewód neutralny, R (L1), S (L2), T (L3) - przewody fazowe

## 5. PODSUMOWANIE

W minionym 2018 roku ukazała się publikacja „Maszyny tarciove. Budowa, przeznaczenie”, która stanowiła próbę spojrzenia całościowo na rozwiązania konstrukcyjne stosowanych maszyn tarciove, w szczególności niekomercyjnyh. Czytelnik z łatwością rozpoznał w niej rozwiązania starsze od nowszych. Te konstrukcje, które się sprawdziły były w dalszym ciągu modernizowane. Pozostałe odłożono do lamusa. Kilkadziesiąt przedstawionych w tej w/w publikacji rozwiązań tribotesterów to globalnie niewiele. Pojawiła się wówczas potrzeba dokończenia tej tak bardzo szerokiej tematyki dotyczącej budowy maszyn tarciove. Dlatego niniejsza publikacja stanowi kontynuację prac wcześniejszych związanych właśnie z rozwiązaniami konstrukcyjnymi różnych maszyn tarciove. Tribologia, a z nią konstrukcje maszyn tarciove rozwijają się bardzo dynamicznie, a czas który był poświęcony pisaniu tej publikacji, podobnie jak poprzedniej wynosił tylko rok, a to niewiele. Nie wyczerpuje to oczywiście bogactwa rozwiązań technicznych, materiałowych, koncepcyjnych, informatycznych, bo są również stanowiska/symulatory tribologiczne, związanych z budową maszyn tarciove. Tematyka konstrukcji przyrządów tribologicznych jest bardzo ciekawa i rozwijająca. Ufam, że dla wielu młodych ludzi książka ta będzie inspiracją do budowy nowych konstrukcji maszyn tarciove.

## LITERATURA

- Abbott E. J., Firestone F. A. 1993. Specyfing surface quality. [W:] Mechanical Engineering Nr 55, pp. 556÷572.
- Barrow G. Chemia fizyczna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1971.
- Barre F., Lopez J., Mathia T. G. 1997. New methods for characterising the anisotropy of engineering surfaces. [W:] Trans. 7<sup>th</sup> International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Gothenburg, Sweden, pp. 479÷486.
- Bartz W.J. 2012. Lubrication of industrial gears with synthetic gear oils. [W:] Symposium 2012 Tribologie und Mobilität, s. 37÷38. Wiener Neustadt, Austria.
- Bezjazyčný V. F. 2002. Wpływ jakości warstwy wierzchniej po obróbce mechanicznej na właściwości eksploatacyjne części maszyn. [W:] Zagadnienia Eksploatacji Maszyn z. Nr 2, s. 7÷27.
- Biszczad R., Cichosz P. 2002. Korelacja parametrów chropowatości z wybranymi modelami topografii powierzchni. Instytut Badań i Ekspertyz Naukowych, Gorzów Wlkp.
- Bielański A. Chemia ogólna i nieorganiczna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1973.
- Bielański A. Podstawy chemii nieorganicznej, cz. 1. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2007.
- Boryczko A. 1987. Przemieszczenie narzędzia i przedmiotu a zakłócenia struktury geometrycznej powierzchni toczonych. [W:] Mechanik nr 5, s. 211÷214.
- Burakowski T. 2004. Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.
- Burakowski T. 1998. Rozwój inżynierii powierzchni a rozwój inżynierii eksploatacji. [W:] Tribologia nr 5, s. 829÷843.
- Burakowski T. 2002. Znaczenie inżynierii powierzchni w tribologii. [W:] Tribologia nr 4, s. 1097÷1111.
- Burakowski T. 2013. Areologia. Podstawy teoretyczne. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji PIB. Radom.
- Burakowski T., Marczak R. 1995. Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badania. [W:] Zagadnienia Eksploatacji Maszyn z. 3, s. 327÷337.
- Burakowski T., Marczak R. 1999. Wybrane procesy konstituowania się eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. [W:] Tribologia nr 6, s. 757÷765.
- Burakowski T., Wierchoń T. 1995. Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa.
- Cichosz P., Kowalski M. 2004. Modelowanie matematyczne topografii powierzchni płaskowierzchołkowych typu „plateau”. [W:] Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego nr 36. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, s. 195÷202, Koszalin.
- Czarnecki H. 2005. Analiza teoretyczna wpływu stereometrii powierzchni na działanie pary tribologicznej. [W:] Tribologia nr 4, s. 19÷31.

- Daca J., Rudnicki Z., Warszyński M. 2003. Analiza wpływu topografii powierzchni na przebieg zjawisk tribologicznych. [W:] Materiały XXI Sympozjonu PKM, Bielsko-Biała, WNT tom 1, s. 213÷218, Warszawa.
- Dagnall H. 1986. Exploring surface texture. Rank Taylor Hobson, Leicester.
- De Chiffre L. 1999. Industrial survey on ISO surface texture parameters. [W:] Annals of the CIRP, 48/3, pp. 463÷466.
- DIN 4776. Kenngrößen Rk, Rpk, Rvk, Mr<sub>1</sub>, Mr<sub>2</sub> zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil. Messbegingungen und Auswertverfahren.
- DIN 4761. Oberflächencharakter. Geometrische Oberflächentextur Merkmale. Begriffe, Kurzzeichen.
- Dong W. P., Sullivan P. J., Stout K. J. 1994. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography. III. Parameters for characterising amplitude and some functional properties. [W:] Wear, Vol. 178, pp. 29÷43.
- Dong W. P., Sullivan P. J., Stout K. J. 1994. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography. IV. Parameters for characterising spatial and hybrid properties. [W:] Wear, Vol. 178, pp. 45÷60.
- Duś-Sitek M. 1999. Doświadczalne stwierdzenie istnienia strefy nadpowierzchniowej warstwy wierzchniej – modyfikacja modelu warstwy wierzchniej. [W:] Inżynieria Powierzchni nr 1, s. 29÷34.
- Feld M., Konczakowski A. 1988. Analiza widmowa struktury geometrycznej powierzchni szlifowanych. Materiały XI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, s. 109÷116, Łódź.
- Fleischer G. 1999. Studie zur Energie- und Verschleißverteilung zwischen den Festkörper während der Reibung. Universität Otto von Guericke. Magdeburg.
- Franek F., Badisch E., Kirchgassner M. 2009. *Advanced methods for characterisation of abrasion/erosion resistance of wear protection material*. Faculty of Mechanical Engineering, Transaction, 37(2), s. 61÷70.
- Garkunow D.N. 1987. Effect der Verschleißlosigkeit – eine neue Etappe bei der Verbesserung des Verschleißlosigkeit von Maschinenelementen. Schmierungstechnik, nr 3.
- Gee M. G., Gant A. J., Hutchings I. M., Bethke R., Schiffman K., Acker van K., Poulat S., Gachoń Y., Stebut von J.: *Progress towards standardisation of ball cratering*. Wear 2003; 255: 1÷13.
- Gładysz B. 1962. Tomografia – zastosowanie kliniczne. PZWL, Warszawa 1962.
- Godet M. 1984. The third body approach: A mechanical view of wear. [W:] Wear, Vol. 100, pp. 437÷452.
- Granat K. 1995. *Wpływ dodatków krzemu na odporność na zużycie ściernie odlewniczych stopów typu Fe-Cr-C*. Krzepnicie metali i stopów, 24.
- Górecka R., Polański Z. 1983. Metrologia warstwy wierzchniej. WNT, Warszawa.
- Handzel-Powierża Z. 1990. Warstwa wierzchnia i problemy jej identyfikacji. Wybrane problemy tribologii. PWN, s. 317÷326, Warszawa.
- Hebda M., Wachal A. 1980. Trybologia. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.



- Janecki J., Hebda M. 1969. Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn. WNT, Warszawa.
- Janecki J., Gołębek S. 1971. Zużycie części i zespołów pojazdów samochodowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Kaczmarek J., Klimczak T. 1986. Dwu- i trójwymiarowa charakterystyka mikronierówności powierzchni. [W:] Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 1, s. 39÷46.
- Kalandyk B., Glowina J. 2001. Ocena aparatu Millera do określania odporności na ścieranie staliwa konstrukcyjnego. Archiwum odlewnictwa, rocz. 1, 1(2/2).
- Kałdoński T. 1995. Tribologia i płyny eksploatacyjne, cz. II: Wybrane problemy tribologii. Wydawnictwo Wojskowe Akademii Technicznej, Warszawa.
- Kałdoński T.J., Kałdoński T., Ozimina D. 2008. Wpływ napięcia powierzchniowego, kąta zwilżania i adsorpcji substancji smarnych na ich właściwości smarnościowe. [W:] Tribologia nr 2, s. 235÷246.
- Kedziora H.–J., Parsons F., Tabenkin A. 2004. Industrial problems with proliferation and expansion of surface finish parameters. Proc. of XI Int. Coll. On Surfaces, pt. 1, pp. 93÷100, Chemnitz.
- Kęпка C. 2013. Tomografia komputerowa tętnic wieńcowych jako alternatywa dla koronarografii. Instytut Kardiologii w Warszawie.
- Kolman R. 1965. Mechaniczne wzmocnienie powierzchni części maszyn. WNT, Warszawa.
- Konczakowska A., Konczakowski A. 1978. Badania struktury geometrycznej powierzchni metodami korelacji i widmowymi. [W:] Mechanik nr 6, s. 294÷296.
- Kośla K., Cichomski M., Kozłowski W. 2012. Preparation and tribological characterization of the organosilanes on aluminium surface. III Krajowa Konferencja Nano- i Mikromechaniki, s. 141, Warszawa.
- Krause H., Schroelkamp Ch. 1981. Investigation into the reaction of metallic bodies in tribological system. Proc. of Eurotrib'81, pp. 324÷329, Warsaw.
- Krawiec S. 2011. Kompozycje smarów plastycznych i stałych w procesie tarcia stalowych węzłów maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Kruk A. 2012. Tomografia elektronowa i jej zastosowanie w obrazowaniu i metrologii mikrostruktury materiałów. Wydawnictwo AGH Kraków.
- Kulu P., Hussainova I., Veinthal R. 2005. *Solid particle erosion of thermal sprayed coatings*, Wear, 258(1÷4), s. 488÷496.
- Laber S. 2001. Preparaty eksploatacyjne. Wydział Mechaniczny Instytutu Budowy Maszyn i Pojazdów, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra.
- Laber S. 2003. Badania własności eksploatacyjnych i smarnych uszlachetniacza metalu Motor Life Professional. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra.
- Latoś H. 1999. Podstawy doboru kierunkowości i struktury powierzchni o określonych właściwościach tarciovych. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej nr 74, seria Konferencje nr 34, s. 117÷124, Wrocław.
- Lawrowski Z. 2009. Tribologia: tarcie, zużywanie i smarowanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

- Lass P. 1998. Tomografia emisyjna pojedynczego fotonu. Via Medica S.C. Gdańsk.
- Legutko S., Nosal S. 2004. Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN, Poznań.
- Lenik K., Pashechko M., Dziedzic K., Barszcz M., 2008. Modernizacja wężła tarcowego maszyny Amslera z przystosowaniem do badań powłok z materiałów eutektycznych w układzie trzpień-tarcza. Tribologia 3/2008.
- Leppert T., 2008. Badania wpływu sposobu chłodzenia i smarowania na siły skrawania podczas toczenia. Mat. Szkoły Obróbki Skrawaniem Obróbka Skrawaniem – Innowacje, Kraków, 368÷376.
- Leppert T., 2009. Zużycie ostrza w warunkach toczenia na sucho i z MQL. Obróbka skrawaniem, t. 3, red. H. Latoś, Wyd. Uczeln. UTP w Bydgoszczy, 163÷169.
- Li C. G., Dong S., Zhang G. X. 2000. Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography. [W:] Wear, Vol. 237, pp. 211÷216.
- Lubimow W., Oczos K. E. 1997. Wybrane zagadnienia kształtowania nierówności powierzchni w procesach obróbkowych. [W:] Mechanik nr 3, s. 81÷84.
- Lubimow W., Oczos K. E., Łabudzki R. 2000. Klasyfikacja struktur geometrycznych powierzchni (SGP) obrobionych ściernie. W: Oczos K. E. (redakcja) Obróbka ścierna. Podstawy i technika. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 206÷211, Rzeszów.
- Lugbauer M., Kröll A. 2009. Busadur kosteneffizienter Verschleisschutz mit Fe-Basis-System, ÖTG 2009, Austria
- Magiera B., Olszewski W., Ozimina D. 1981. Środki smarowe, konserwacyjne, paliwa silnikowe – metody oznaczania podstawowych właściwości. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Radomiu. Radom 1981.
- Marczak R. 1993. Postęp w badaniach zjawiska Garkunowa. Materiały konferencji „Problemy bezzużyciowego tarcia w maszynach.” Wydaw. WSI Radom.
- Marczak R. 1955. Istota, model i możliwości wykorzystania zjawiska Garkunowa w technice. Materiały Konferencyjne NT. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Łódź.
- Materiały informacyjne PUPH „MIND” Sp. z o.o., Łochowice, 86-005 Białe Błota.
- Materiały informacyjne Zakładu „PLASTMAL” Sp. z o.o., Warszawa.
- Mayer K. 1916. Radiologiczne rozpoznanie różniczkowe chorób serca i aorty. Gebethner i Wolf. Kraków.
- Mori M., Kumehara H. 1976. Replication of cutting edge roughness on the work surface. [W:] Bull. of Japan Soc. of Precision Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 171÷179.
- Mikołajczyk J. 2009. Zestawienie porównawcze dodatków depresujących do olejów. [W:] Zaawansowana tribologia, s. 92÷100. XXX Ogólnopolska Konferencja Tribologiczna. Nałęczów.
- Mikołajczyk J. 2009. Zestawienie porównawcze własności fizyko-chemicznych dodatków smarnych w oleju podstawowym SAE-30. VI Konferencja Naukowo-Techniczna TEROTECHNOLOGIA, s. 74÷79, Kielce.

- Mikołajczyk J., Matuszewski M. 2010. Konstrukcja i sterowanie stanowiska do badań tribologicznych. [W] CAX'2010, Komputerowe Wspomaganie Nauki i Techniki, VII Warsztaty Naukowe, s. 35÷40, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.
- Mikołajczyk J. 2011. System wizualizacji i archiwizacji danych stanowiska do badań tribologicznych, praca dyplomowa na Wydziale Elektrotechniki i Telekomunikacji Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.
- Mikołajczyk J. 2012. System rejestracji i wizualizacji warunków pracy stanowiska do badań tribologicznych. [W:] CAX'2011, Komputerowe Wspomaganie Nauki i Techniki, VIII Warsztaty Naukowe, s. 13÷18, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz.
- Mikołajczyk J. 2012. Badanie wpływu preparatu eksploatacyjnego Mind M na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. [W:] Inżynieria i Aparatura Chemiczna nr 5, s. 235÷236.
- Mikołajczyk J., Mikołajczyk T., Matuszewski M. 2015. Logistyczne aspekty zarządzania procesem naprawy. Logistyka 4/2015.
- Mikołajczyk J., Matuszewski M. 2015. Einfluss der ausgewählten Schmierstoffzusätze auf  $\Delta T$  und  $\Delta P$  mit Basisöl SN-150. Tribologie in Industrie und Forschung. Werkstoffe, Schmierstoffe und Technologie. Wiener Neustadt, A. 25.November 2015. Austria.
- Mikołajczyk J., Mikołajczyk T., Matuszewski M., Styp-Rekowski M. 2016. Wpływ warunków chłodzenia i smarowania podczas obróbki elementów maszyn na stopień izotropowości ich powierzchni. Tribologia 1/2016, pp. 57÷67.
- Mikołajczyk J. 2016. Vergleich charakteristischer Parameter des Abbott-Firestone-Diagramms für ein Kinematisches Paar mit Konformen Kontakt. Tribologie in Industrie und Forschung. Verschleisschutz, Instandhaltung und Anlagenzuverlässigkeit. Linz, A. 22./23. November 2016. Austria, pp. 105÷111.
- Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M., Matuszewski M., Musiał J. 2012. Einfluß der Kompositionen von Schmierzusätzen auf die Exploitations-Eigenschaften der Mischung mit Basisöl SN-150. Symposium 2012 Tribologie und Mobilität, s. 97÷104. Wiener Neustadt, Austria.
- Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M. 2012. The Influence of Mind M Preparation on the Lubricant Properties of Oil SN-150. [W] 53. Tribologie-Fachtagung, Band I, Vortrag 18. Göttingen, Niemcy.
- Mikołajczyk J. 2017, Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica w Pile.
- Mikołajczyk J., Grabowska M. 2017, Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w inżynierii materiałowej, s. 15÷27. [W] Postępy w inżynierii materiałowej 9(5) 2017, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.
- Mikołajczyk J. 2018, Maszyny tarciove. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica w Pile.
- Mikołajczyk J., Grabowska M., Basiak S. 2018, Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w nieniszczących badaniach teowych złączy spawanych, s. 31÷44. [W] Postępy w inżynierii materiałowej 11(6) 2018, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.

- Müller L. 1979, Przekładnie zębate. Projektowanie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Müller L. 1983, Przekładnie obiegowe. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Napiórkowski J. 1994, Wpływ rodzaju masy ścierniej na zużywanie tworzyw konstrukcyjnych w zależności od sytuacji doświadczalnej. VI Symposium im. Prof. Czesława Kanafojskiego, Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych, PW Płock, str. 109÷114.
- Napiórkowski J. 2005, Zużyciowe oddziaływanie gleby na elementy robocze narzędzi rolniczych, Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków 2005
- Napiórkowski J., Rychlik A., Szczyglak P., Kołakowski K., Ligier K., Mikołajczak P., Drożyner P. 2014, Badania i modelowanie procesów zużycia ściernego i zmęczenia, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2014
- Norma ČSN 01 5084 : Determination of metal material...
- Norma PN-EN 1071-6 : 2008 Techniczna ceramika zaawansowana. Metody badania powłok ceramicznych. Część 6: Oznaczanie odporności na ścieranie powłok metodą mikrościerania.
- Nosal S. 2012. Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużycia i smarowania. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Nowicki B. 1980. Badania mikrostruktury geometrycznej powierzchni obrobionych i metod jej oceny. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, [W:] Mechanika, z. 70, Warszawa.
- Nowicki B. 1985. Multiparameter representation of surface roughness. [W:] Wear, Vol. 102, pp. 161÷176.
- Nowicki B. 1991. Struktura geometryczna: chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa.
- Nowicki B. 1991. Wpływ struktury geometrycznej powierzchni na własności użytkowe części maszyn. [W:] Mechanik nr 4, s. 148÷149.
- Nyc R. 2000. Możliwości zastosowania profilometrii skaningowej do interpretacji zużycia elementów maszyn. [W:] Problemy Eksploatacji nr 3, s. 183÷191.
- Nyc R. 2001. Ocena zużycia współpracujących powierzchni elementów maszyn na podstawie krzywych nośności. [W:] Tribologia nr 3, s.349÷355.
- Oczóś K. E., Lubimow W. 1998. Analiza w układzie 3D struktury geometrycznej powierzchni szlifowanych. W: Dąbrowski L., Marciniak M., Nowicki B. (redakcja): Badania podstawowe i techniczne obróbki ścierniej, s. 116÷122. Warszawa.
- Oczóś K. E., Lubimow W. 1999. Klasyfikacja struktur geometrycznych powierzchni (SGP). [W:] Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej nr 74, s. 149÷154. Wrocław.
- Oczóś K. E., Lubimow W. 1998. Nowe aspekty trójwymiarowej (3D) analizy chropowatości powierzchni obrobionej. [W:] Mechanik nr 8/9, s. 471÷476.
- Oczóś K. E., Lubimow W. 2003. Struktura geometryczna powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- Oczóś K. E., Lubimow W. 2008. Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. [W:] Mechanik nr 3, s. 132÷137.

- Oczóś K. E., Lubimow W., Łabudzki R. 2001. Analiza porównawcza struktur geometrycznych powierzchni (SGP) po obróbce ścierniej. Zbiór prac XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, s. 249÷260. Łopuszna.
- Oczóś K. E., Lubimow W., Łabudzki R. 2001. Izotropowość i symetryczność SGP. Materiały VI Konferencji N–T „Kształtowanie materiałów niemetalowych”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 293÷302. Rzeszów.
- Oczóś K.E., Lubimow W. 2008. Rozważania nad istotnością parametrów struktury powierzchni w układzie 3D. [W:] Mechanik 6.
- Ozimina D. 2000. Metody oceny oddziaływań tribochemicznych dodatków przeciwzatarciowych. [W:] Metrologia i Systemy Pomiarowe nr 1, s. 73÷87.
- Ozimina D. (red.) 2013. Eksploatacja systemów tribologicznych, t. 2: Tarcie, zużycie, smarowanie wybranych węzłów tribologicznych. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, seria Monografie, studia, rozprawy, z. M49, Kielce.
- Panicz A. 2000. Chropowatość powierzchni – co nowego?. [W:] Pomiary Automatyka Kontrola nr 5, s. 39÷47.
- Patent RU 2163 013 C2 (z bazy patentowej Federacji Rosyjskiej Ruspatentu): Испытательная камера машины трения. Federacja Rosyjska, Tomsk. Twórcy: Буханченко С. Е. , Ларнонов С. А., Пушкаренко А. Б. Томский Политехнический Университет.
- Patent RU 2165 077 C2 (z bazy patentowej Federacji Rosyjskiej Ruspatentu): Автоматизированный комплекс для испытания трибосопряжений на трение и износ в статическом и динамическом режимах. Federacja Rosyjska, Tomsk. Twórcy: Буханченко С. Е. , Ларнонов С. А., Пушкаренко А. Б. Томский Политехнический Университет.
- Patent SU 1219962 A (z bazy patentowej ZSRR): Устройство для триботехнических испытаний материалов. Twórcy: Прокопенко А. К., Гаркунов Д. Н., Жигайло Б. Г., Быстров В. Н., Францев В. Н., Знаев В. А., Полянин Б. А., Панфилов Е. А.
- Patent SU 1670520 A1 (z bazy patentowej ZSRR): Устройство для испытания материалов. в присутствии масел на трение и износ. Twórcy: Ковальский Б. И., Тихонов В. И., Деревягина Л. Н. Государственный проектный, научно-исследовательский и конструкторский институт „Красноярский ПромстройНИИпроект”.
- Patent PL 223 986: Stanowisko do badania oporu toczenia krążków. Twórcy: Dariusz Woźniak, Lech Gładysiewicz, Monika Hardygóra, Damian Kaszuba, Waldemar Kisielewski, Ligota Wolczyńska.
- Pawlus P. 1999. Struktura geometryczna powierzchni cylindrów podczas eksploatacji silnika spalinowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- Pawlus P. 2006. Topografia powierzchni: pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- Pawlus P., Michalski J. 2008. Metodyka badania grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych. Tribologia 3/2008.
- Peters J. 2001. Contribution of CIRP to the development of metrology and surface quality evaluation during the last fifty years. [W:] Annals of the CIRP, 50/2, pp. 471÷488.

- Pohoda J. 2005. Destruktivni zkoušeni základních materiálů a svarových spojů. TDS Brno – SMS, Brno, s. 97
- Poradnik mechanika, Wydanie trzynaste, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972r.
- Piekoszewski W., Szczerek M., Wiśniewski M. 2000. Charakterystyki tribologiczne chropowatości powierzchni elementów maszyn. [W:] *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, z. 3, s. 43÷69.
- Pietruszewicz W. 1985. Parametry powierzchni i ich przydatność do określenia cech użytkowych przedmiotu. Materiały Konferencji N–T „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej”. Poznań – Gorzów Wlkp.
- Piątkowska A., Jagielski J. 2008. Opis tribologicznego stanowiska badawczego z rejestracją sygnałów emisji akustycznej. *Tribologia* 3/2008.
- Polakowski K. 2011. Tomograficzne obrazowanie lokalnych wartości parametrów przepływów produktów spalania w technice samochodowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- PN – EN ISO 1302: 2004. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Oznaczanie struktury geometrycznej powierzchni w dokumentacji technicznej wyrobu.
- PN – EN ISO 4287: 1999. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- PN – 87/M – 04250: Warstwa wierzchnia. Terminologia.
- Polański Z.: *Metody optymalizacji w technologii maszyn*. PWN, Warszawa 1977.
- Polański Z. 1984. *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa.
- Pondicherry K.S., Wolf F., Grenn G., 2015. *Tribologie in Industrie und Forschung. Werkstoffe, Schmierstoffe und Technologie*. Wiener Nuestadt, Austria.
- Płaza S., Margielewski L., Celichowski G. 2005. *Wstęp do tribologii i tribochemia*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Priest M., Taylor C.M.: *Automobile engine tribology – approaching the surfach*. *Wear* 2000, No. 241, pp. 193÷203.
- Rehbein W., Rigo J., Lange I. 2012. Prüfung des Stick-Slip-Verhaltens von Gleitbahnölen mittels Schwing-Reibverschleiss Tribometer (SRV). [W:] 53. *Tribologie-Fachtagung.Vortrag 31, Band I*. Göttingen. Niemcy.
- Rigney D. A., Gleaser W. A. 1978. The significance of near surface microstructure in the wear process. [W:] *Wear*, Vol. 46, pp. 241÷250.
- Rostami J., Gharahbagh E.A., Palomino A.M., Mosleh M. 2012: Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, pp. 245÷256
- Rutkowski A. 1986. *Części maszyn*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa.
- Sadowski J. 2006. *Nowa interpretacja i ocena zużycia tribologicznego*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.
- Sadowski J. 1997. *Termodynamiczne aspekty procesów tribologicznych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.

- Sadowski J. 2003. The thermodynamic theory of friction and wear . Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.
- Sikora J. 2007. Wpływ asymetrii cyklu obciążenia i rodzaju oleju na wytrzymałość zmęczeniową stopu łożyskowego. Tribologia 1/2007.
- Stachowiak G. W., Batchelor A. W. 2001. Engineering tribology. Butterworth-Heinemann.
- Starczewski L. 2002. Wodorowe zużywanie ciernych elementów maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
- Stout K. J., Davis E. J., Sullivan P. J. 1990. Atlas of machined surfaces. Chapman and Hall, London.
- Stout K. J., Dong W. P., Mainsah E. 1993. A proposal for standardisation of assessment of three-dimensional micro-topography – Part I. Surface digitisation and parametric characterisation. University of Birmingham.
- Stout K. J., Sullivan P. J., Dong W. P., Mainsah E., Luo N., Mathia T., Zahouani H. 1993. The development of methods for the characterisation of roughness in three-dimensions. Commission of the European Communities.
- Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J. 2009. Smarowanie w eksploatacji maszyn. Seminarium pt. Twórczość Inżynierska dla Współczesnej Europy, s. 53÷58. Bydgoszcz-Białe Błota.
- Styp-Rekowski M., Świerk K., Mikołajczyk J. 2010. Modyfikowanie cech środka smarującego za pomocą dodatków i komputerowe wspomaganie ich doboru. [W:] CAX'2009, Komputerowe Wspomaganie Nauki i Techniki, VI Warsztaty Naukowe, s. 15÷19, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz.
- Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J. 2012. Wpływ dodatku na własności smarowe oleju bazowego SN-150. [W:] Tribologia nr 4, s. 227÷232.
- Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J. 2012. Zmiana temperatury na drodze tarcia dla kompozycji olej bazowy SN-150-preparat eksploatacyjny Mind M. III Krajowa Konferencja Nano- i Mikromechaniki Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, s. 145÷146. Warszawa.
- Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J., Matuszewski M. 2014. Wybrane zagadnienia stosowania płynów obróbkowych w obróbce skrawaniem, s. 11÷16 [W] Obróbka metalu 3/2014.
- Szczerek M. 1997. Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
- Szczerek M., Wiśniewski M. (redakcja) 2000. Tribologia i tribotechnika. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
- Szulc L. 1965. Struktura i własności fizyko-mechaniczne obrobionych powierzchni metali. Zeszyt specjalny Politechniki Warszawskiej. Warszawa.
- Szumniak J. 2001. Warstwa wierzchnia elementów trących. Budowa, własności i ich identyfikacja, wpływ na tarcie. Poradnik tribologii i tribotechniki (4–5), s. 11÷18.
- Terry A.J., Broun C.A. 1997. A comparison of topographic characterisation parameters in grinding. [W:] Annals of the CIRP, 46/1, pp. 497÷500.

- Tripp J. H., Ioannides E. 1990. Effects of surface roughness on rolling bearing life. Proceedings of the Japan International Conference. Japanese Society of Tribologists Nagoya, Vol. 2, pp. 797÷804.
- Tsukada T., Kanad T. 1986. Evaluation of two- and three-dimensional surface roughness. [W:] Wear, Vol. 109, pp. 1÷4.
- Vorburger T.V. at all. 1997. Characterisation of surface topography. [W:] Annals of the CIRP, 46/2, pp. 597÷615.
- Walicka A. 2002. Reodynamika przepływu płynów nienewtonowskich w kanałach prostych i zakrzywionych. Wydawnictwo Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra.
- Walicki E., Walicka A. 1998. Reologia wybranych płynów smarujących. Materiały Zebrania SPE KBM PAN, s. 137÷144, Zielona Góra.
- Warta B. 2006. Stanowisko do badania trwałości zazębienia obiegowej przekładni cykloidalnej. Tribologia 6/2006.
- Whitehouse D.J. 1978. Surfaces – a link between manufacture and function. Proc. Inst. Mech. Engrs., 192, pp. 179÷188.
- Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J. 1996. Charakterystyka chropowatości powierzchni. Politechnika Poznańska, Poznań.
- Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J. 2003. Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko. Politechnika Poznańska, Poznań.
- Williams J. 2005. Engineering tribology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Willis E. 1986. Surface finish in relation to cylinder liners. [W:] Wear, Vol. 109, pp. 351÷366.
- Wiśniewski M. 2001. Parametry chropowatości powierzchni. Poradnik tribologii i tribotechniki (2), s. 5÷6.
- Włodarski J. K. 1982. Tłokowe silniki spalinowe – procesy trybologiczne. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Wolf H. 1969. Analyse des Istprofils hinsichtlich der Verteilung der Riefen und Rillenamplituden zum Erkennen der einzelnen Bestandteile des Istprofils am Profilschnitt. VDI-Bericht Nr 133, s. 325÷331. Düsseldorf. Niemcy.
- Zeliaś A. 2000. Metody statystyczne. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa.
- Zgłoszenie patentowe nr 396512 do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Twórcy przedstawionego w zgłoszeniu urządzenia: Dudarew A., Dąbrowski J. R., Kulesza E., Sidun J. Tytuł zgłoszenia: Tribometr do badań frettingu typu trzpień-tarcza.
- Zwierzycki W. 1990, Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych wżerach maszyn. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa-Poznań 1990.