



Materialoznawstwo elektrotechniczne - Inżynieria materiałowa

Materiałoznawstwo
elektrotechniczne - Inżynieria
materiałowa

ANDRZEJ ŁASICA

Skrypt przeznaczony jest dla studentów Politechniki Warszawskiej studiujących na kierunku Elektrotechnika i Elektromobilność.

Na zajęciach studenci zapoznają się z podstawowymi zjawiskami materiałowymi o dużym znaczeniu praktycznym.

Laboratorium oparte jest na treści wykładu i umożliwia praktyczne utrwalenie zdobytej wiedzy. Treści przekazywane w ramach laboratorium pozwolą na poznanie różnych materiałów stosowanych w elektrotechnice, ich cech charakterystycznych, parametrów i zastosowań.

Niniejszy skrypt zawiera podstawy teoretyczne oraz instrukcje niezbędne do ćwiczeń wykonywanych w ramach laboratorium. Informacje zawarte w tej książce są wystarczające do zaliczenia testów rozpoczynających każde ćwiczenie laboratoryjne. Przed przystąpieniem do laboratorium należy zapoznać się z regulaminem bezpieczeństwa oraz regulaminem przedmiotu.

Niniejszy e-skrypt powstał na bazie instrukcji napisanych przez pracowników PW na przestrzeni wielu lat wykładania tego przedmiotu. Wydanie elektroniczne zawiera uaktualnienia uwzględniające modyfikacje układów laboratoryjnych i wynikające z tego zmiany w programie badań.

Przepisy zachowania się przy pracy w laboratorium

1. Laboratoria są przeznaczone do pracy dydaktycznej i naukowej. Zabronione jest wykorzystywanie sprzętu oraz aparatury pomiarowej w innych celach.
2. Celowe niszczenie wyposażenia i mienia laboratorium będzie skutkowało pociągnięciem do odpowiedzialności finansowej i dyscyplinarnej.
3. Studenci ponoszą pełną odpowiedzialność cywilną i karną za popełnione czyny i ich konsekwencje.
4. W pracowni należy zachować ostrożność, pamiętając o niebezpieczeństwie grożącym życiu. Wszelkie ruchy powinny być opanowane, a uwaga skupiona na wykonywanym zadaniu.
5. W czasie wykonywania ćwiczeń studenci są zobowiązani przebywać w otoczeniu swojego stanowiska.
6. W laboratoriach obowiązuje zakaz spożywania posiłków i napojów.
7. Przed załączeniem napięcia należy bezwarunkowo sprawdzić stan przewodów uziemiających, przewodów łączących poszczególne elementy układu oraz blokad drzwiowych i krańcowych.
8. W laboratorium występują następujące zagrożenia:
 - Termiczne – Posługujemy się urządzeniami wytwarzającymi wysoką temperaturę oraz otwartym płomieniem. Pracujemy ostrożnie, nie chwytamy rękoma za przedmioty bez uprzedniego sprawdzenia czy nie są gorące (wierzchem dłoni). Płomienia używamy tylko do wyznaczonego celu. Niedopuszczalne jest podpalanie i przypalanie jakichkolwiek przedmiotów poza próbkami.
 - Mechaniczne – Należy zachować ostrożność, nie wkładać

żadnych przedmiotów ani rąk w części maszyn będące w ruchu. Przed pracą spiąć długie włosy oraz luźne rękawy.

- Elektryczne nN – Zachować rozważę. Wszelkie uszkodzenia sznurów i osprzętu natychmiast zgłaszać prowadzącemu. Nie wolno eksploatować uszkodzonych urządzeń elektrycznych. W razie porażenia odłączyć napięcie poprzez wyłączenie bezpieczników lub użycie przycisku awaryjnego. Niezwłocznie powiadomić prowadzącego.
- Elektryczne WN – Zachować szczególną ostrożność. Ćwiczenie wysokonapięciowe może wykonywać zespół minimum dwuosobowy.

W polu probierczym i na pulpicie sterowniczym nie mogą znajdować się zbędne przedmioty, gdyż mogą one stać się pośrednio przyczyną porażenia. Odzież wierzchnią należy pozostawić w szatni, a plecaki i teczki na miejscu do tego przeznaczonym.

Należy przestrzegać, aby odstępki izolacyjne zapewniały niewystępowanie wylądowań między obwodami wysokiego napięcia, a częściami uziemionymi lub obwodami niskiego napięcia.

Przyjmuje się, że odstępki izolacyjne wyrażone w centymetrach, powinny być nie mniejsze niż napięcie spodziewane na danym odstępku wyrażone w kilowoltach.

Zabrania się włączania wysokiego napięcia jeżeli ktokolwiek znajduje się w polu probierczym.

Przy załączonym wysokim napięciu należy stać obiema nogami na podstawie izolacyjnej.

Zaleca się następujący podział pracy w grupie ćwiczącej:

osoba pierwsza – kierowanie pracą: włączanie i wyłączanie napięcia oraz obsługa urządzeń regulacyjnych;

osoba druga – uziemianie biegunów wysokiego napięcia, manipulacje w polu probierczym;

osoba trzecia, czwarta (piąta) – odczyt przyrządów i prowadzenie protokołu.

Obowiązkiem kierującego pracą jest:

ostrzec współcwiczących o zamiarze włączenia wysokiego napięcia,

po załączeniu wysokiego napięcia pozostać w gotowości do natychmiastowego wyłączenia napięcia,

dopilnować przestrzegania środków ostrożności przez współcwiczących.

Osoba manipulująca przyrządami wysokiego napięcia jest obowiązana:

przed wejściem na pole probiercze sprawdzić, czy wszystkie wyłączniki załączające wysokie napięcie są otwarte,

wchodząc na pole probiercze zakładać drążki uziemiające i zdejmować je wychodząc z pola (osoba manipulująca wchodzi na pole pierwsza, a wychodzi ostatnia).

W chwili przeskoku należy natychmiast wyłączyć napięcie za pomocą wyłącznika (nie wolno zmieniać położenia regulatora w chwili wyładowania zupełnego).

9. Załączenie napięcia i rozpoczęcie prac pomiarowych może nastąpić po uprzednim zgłoszeniu gotowości prowadzącemu zajęcia i sprawdzeniu poprawności połączeń oraz uzyskaniu dodatkowych informacji lub poleceń dotyczących wykonywania ćwiczenia.
10. O ile prowadzący nie zaleci inaczej, wyłączenie zasilania stanowiska pomiarowego po zakończeniu pomiarów, wykonują samodzielnie studenci.
11. Po wykonaniu ćwiczenia, przed opuszczeniem laboratorium, studenci zobowiązani są do pozostawienia stanowiska z uziemionymi biegunami wysokiego napięcia, w stanie uporządkowanym (również krzesła).
12. W razie nieszczęśliwego wypadku należy natychmiast odłączyć

napiecie i zastosować ratowanie stosownie do *Instrukcji postępowania w przypadku porażenia prądem elektrycznym*, umieszczonej przy wejściu do laboratorium oraz natychmiast zawiadomić pracownika prowadzącego ćwiczenia.

13. W przypadku stwierdzenia uchybień dotyczących bezpieczeństwa pracy ćwiczenie zostanie przerwane. Dopuszczenie do ponownego odrabiania ćwiczenia (w dodatkowym terminie) może nastąpić po uprzednim zdaniu sprawdzianu ze znajomości powyższych przepisów.
14. Studenci przed przystąpieniem do ćwiczeń w laboratorium podpisują oświadczenia, że znane są im niniejsze przepisy.

1. Wprowadzenie

Materiały stykowe są specyficznym rodzajem materiałów przewodzących, oprócz dobrych własności elektrycznych muszą także wykazywać dobre własności mechaniczne i termiczne. W materiałach tych przewodnictwo ma charakter czysto elektronowy i wyraża się zależnością:

$$\gamma = n \cdot e \cdot k \left[\frac{S}{m} \right] = \left[\frac{1}{\Omega m} \right], \quad (1)$$

gdzie:

n – koncentracja elektronów w materiale [m^{-3}],

e – ładunek elektronów [C],

k – ruchliwość elektronów w materiale $\left[\frac{m^2}{Vs} \right]$.

Do materiałów przewodzących należą metale i ich stopy. Wartość przewodności tych materiałów jest uzależniona od kilku czynników, a mianowicie:

- a) rodzaju materiału i jego budowy,
- b) czystości materiału, czyli zawartości obcych domieszek,
- c) obróbki mechanicznej na zimno,
- d) temperatury.

We wzorze (1) zależnie od rodzaju materiału (przyczyna a), i w pewnym stopniu na skutek obecności domieszek (przyczyna b) zmienia się koncentracja elektronów (n), zarówno domieszki (przyczyna b), obróbka mechaniczna na zimno (przyczyna c) i wzrost temperatury (przyczyna d) wpływają na zmniejszenie ruchliwości elektronów (k), czyli na uzyskiwaną skierowaną prędkość przemieszczania się elektronów, przypadającą na 1 kV przyłożonego napięcia. W sumie obecność domieszek, obróbka na zimno i wzrost temperatury powodują pogorszenie konduktywności materiału.

2. Podział i charakterystyka ogólna

Złączem stykowym albo zestykiem nazywa się dowolne połączenie w torze prądowym dwóch przewodników. Zestyk składa się, więc ze ściśniętych ze sobą styków wykonanych z różnych lub z tego samego materiału. Rozróżniamy trzy rodzaje zestyków:

1. Badanie materiałów stykowych, wyznaczanie rezystancji przejścia zestyków | 7

- nierozłączne nieruchome,
- nierozłączne ruchome,
- rozłączne.

Pierwsze z nich stanowią dwa przewodniki ściśnięte ze sobą w sposób nie sprężysty, wykonywane są na ogół ze zwykłych materiałów przewodowych, stosowanych na tory prądowe. Zestyki nierozłączne ruchome, zwane też ślizgowymi, są na ogół dwumateriałowe, w których siła docisku leży w zakresie naprężeń sprężystych. Zadaniem tych zestyków jest zapewnienie nieprzerwanego przepływu prądu między poruszającymi się częściami toru prądowego.

Zadaniem zestyków rozłącznych jest dokonywanie łączeń w obwodach elektrycznych. Siły docisku są tu stosunkowo niewielkie, niepowodujące naprężeń większych niż sprężyste. W zależności od tego czy łączeń dokonujemy w stanie bezprądowym czy przy obciążeniu prądem dzielimy zestyki ruchome na bezłukowe i łukowe. Zestyki łukowe podlegają najcięższym warunkom pracy, powinny być więc odporne na erozję łukową i nie ulegać zespawaniu podczas procesu łączenia. Najważniejszymi wymaganiami dla zestyków jest mała rezystancja przejścia zestyku i jej niezmiennosc w czasie długotrwałej pracy w różnych warunkach.

Rezystancja przejścia zestyku wyraża się zależnością:

$$R_p = \frac{\varepsilon}{(0,1F)^m} [\Omega],$$

gdzie:

F – siła docisku styków [N],

ε – współczynnik zależny od materiału i stanu powierzchni zestyków [$\Omega \times N^m$].

materiał styków	e [$\Omega \times N^m$]
Cu-Cu	$0,08-0,14 \times 10^{-3}$
Ag-Ag	$0,06 \times 10^{-3}$
Al-Al	$0,13 \times 10^{-3}$
mosiądz-mosiądz	$0,67 \times 10^{-3}$
stal-stal	$7,6 \times 10^{-3}$

m – wykładnik zależny od rodzaju zestyku:

m = 1 – dla zestyku powierzchniowego,

m = 0,7 – dla zestyku liniowego,

m = 0,5 – dla zestyku punktowego.

Wymagania, jakie należy postawić materiałom stykowym muszą dotyczyć następujących własności:

a) mechanicznych:

- wysoka twardość materiału,
- wytrzymałość na rozierwanie,
- wysoki moduł sprężystości,

b) termo-elektrycznych:

- mała skłonność do nadtopiania się styków,
- mała skłonność do przenoszenia materiału ze styku na styk,
- mała skłonność do zespawania się zestyków,
- odpowiednio dużej temperatury topnienia i parowania,
- dużej wartości konduktywności,

c) chemicznych:

- małej skłonności do tworzenia warstwy nalotu,

d) technologicznych:

- łatwość obróbki mechanicznej,

- łatwość odlewania.

Zestyki wykonuje się z jednorodnych metali, ze stopów oraz ze spieków różnych metali. Do materiałów jednorodnych, używanych do produkcji zestyków należą:

- miedź,
- srebro,
- złoto,
- nikiel,
- platyna,
- wolfram,
- molibden.

Do stopów stykowych zalicza się:

- Ag-Cu,
- Ag-Ni,
- Ag-Cd,
- Ag-Pd,
- Cu-Zn-Sn-P,
- Cu-Be.

Do zestyków spiekowych metali najczęściej używa się:

- Cu-W,
- Cu-Mo,
- Ag-W.

Styki z materiałów jednorodnych oraz ze spieków wytwarza się drogą odlewania, prasowania i obróbki wiórowej. Styki spiekane wytwarza się w procesie technologicznym. W skład tego procesu wchodzi mieszanie proszków, sprasowanie w specjalnej formie, a później ich wypiekanie w temperaturze nieco niższej od temperatury topnienia. W niektórych przypadkach, gdy łączymy metale o różnych temperaturach topnienia postępuje się inaczej.

Przy wykonaniu styków Ag-W najpierw wytwarza się spiek wolframowy w postaci porowatego czerepu, a następnie nasycy się go roztopionym srebrem.

Dobierając materiały na styki należy zwracać uwagę, aby nie łączyć materiałów o znacznej różnicy potencjałów elektrochemicznych. Gdy połączymy takie dwa materiały zachodzi silne elektrolityczne przenoszenie się materiału z jednego zestyku na drugi, co nosi nazwę korozji elektrochemicznej, np. Cu-Al. W tablicy poniżej przedstawiono potencjały elektrochemiczne kilku materiałów w odniesieniu do wodoru.

Materiał	Ag	Cu	H	Sn	Ni	Cd	Fe	Zn	Al
Potencjał elektrochemiczny [V]	+0,8	+0,52	0	-0,14	-0,22	-0,4	-0,43	-0,76	-1,34

Dla uniknięcia silnego utleniania się styków i korozji stosuje się na ich powierzchni powłoki antykorozyjne z Ag, Sn, Cd, Zn. Przykładowo styki nierozłączne miedziane pokrywa się cyną lub srebrem, styki aluminiowe miedziuje się, styki stalowe pokrywa kadmem lub cynkiem.

Złoto, platyna srebro stosuje się na styki pracujące bez obciążenia lub przy niewielkim obciążeniu, złącza teleinformatyczne, nity przekaźników itp. Mosiądz i brąz (szczególnie brąz srebrny) stosuje się na styki ślizgowe oraz w urządzeniach niskonapięciowych (oświetlenie), materiały te używane są również na sprężyny styków bimetalicznych, pokrywanych w miejscu styczności cienką warstwą metali szlachetnych. Miedź stosuje się na styki urządzeń o dużym obciążeniu prądowym takich jak wyłączniki główne niskiego i wysokiego napięcia, przy tym styki te są pokrywane srebrem. Wolfram, molibden i ich spieki z miedzią i srebrem stosuje się w wyłącznikach na styki opalinowe.

3. Wyznaczanie rezystancji przejścia zestyków

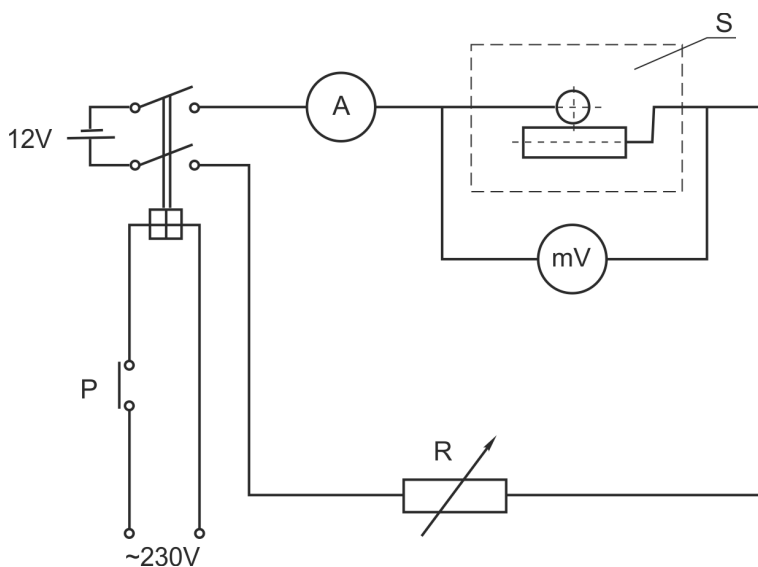
Wyznaczenie rezystancji przejścia zestyków dokonuje się metodą techniczną, przepuszczając przez zestyk prąd stały o określonej wartości i mierząc za pomocą miliwoltomierza spadek napięcia na

zestyku. W ćwiczeniu mierzymy natężenie prądu I [A], spadek napięcia na zestyku ΔU [V], siłę docisku F [N]. Następnie korzystając z prawa Ohma obliczymy rezystancję przejścia zestyku R_p [mΩ].

Badany układ zestyków tworzą dwa walce ustawione do siebie pod kątem prostym, tak, że zestyk jest w przybliżeniu punktowy. Walce wykonane są z badanych materiałów stykowych, umieszczone w uchwycie zapewniającym określoną siłę docisku, uzyskiwana przez dźwignię z obciążnikiem. Do układu doprowadzone jest napięcie stałe z zasilacza stabilizowanego. Pomiaru dokonuj się miliwoltomierzem cyfrowym i amperomierzem prądu stałego. Załączenie prądu następuje za pomocą przekaźnika, który zapewnia jednoczesne i pewne załączenie dużego prądu pomiarowego. Schemat układu pomiarowego przedstawiono poniżej. W ćwiczeniu bada się pary zestyków walcowych wykonanych z miedzi, mosiądzu i stali wolframowej. Możliwe są różne warianty badań. Na przykład wyznaczenie charakterystyki rezystancji zestyków: czystych (wypolerowanych), utlenionych i po erozji łukiem elektrycznym, wykonanych z tego samego materiału, w funkcji siły docisku. W innym wariantcie porównujemy R_p dla zestyków czystych, utlenionych lub zerodowanych wykonanych z różnych materiałów.

Pomiar rozpoczynamy od umieszczenia styków w układzie probierczym i ustalenia siły docisku F . Następnie naciskając przycisk P powodujemy załączenie prądu w obwodzie i regulując opornikiem R ustalamy wartość prądu w przedziale 10–20 A. Przy tej wartości prądu mierzymy spadek napięcia na zestyku. Pomiar należy wykonywać sprawnie, aby nie dochodziło do nagrzewania się zestyków. Wyniki pomiarów należy zanotować w tabelach.

Schemat pomiarowy i przykładowe tabele przedstawiono poniżej.



Schemat układu do badania rezystancji przejścia zestyków

- P – przycisk załączający
- R – rezystor regulacyjny
- A – amperomierz prądu stałego
- mV – miliwoltomierz prądu stałego
- S – układ styków

4. Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów należy wykreślić w jednym układzie współrzędnych charakterystyki $R = f(F)$ dla wszystkich zbadanych par zestyków. Uzyskane wyniki omówić i podać wnioski.

Tabela pomiarowa /1/

Materiał:												
Lp.	Styki polerowane				Styki utlenione				Styki po erozji elektrycznej			
	F	I	ΔU	R_p	F	I	ΔU	R_p	F	I	ΔU	R_p
	[N]	[A]	[mV]	[Ω]	[N]	[A]	[mV]	[Ω]	[N]	[A]	[mV]	[Ω]

Przykładowa tabela pomiarowa 1

Tabela pomiarowa /2/

Lp.	Miedź polerowana				Mosiądz polerowany				Stal wolframowa			
	F	I	ΔU	R_p	F	I	ΔU	R_p	F	I	ΔU	R_p
	[N]	[A]	[mV]	[Ω]	[N]	[A]	[mV]	[Ω]	[N]	[A]	[mV]	[Ω]

Przykładowa tabela pomiarowa 2

2. Wyznaczanie konduktywności materiałów przewodowych

1. Wprowadzenie

Materiały stykowe są specyficznym rodzajem materiałów przewodzących, oprócz dobrych własności elektrycznych muszą także wykazywać dobre własności mechaniczne i termiczne. W materiałach tych przewodnictwo ma charakter czysto elektronowy i wyraża się zależnością:

$$\gamma = n \cdot e \cdot k \cdot \left[\frac{S}{m} \right] = \left[\frac{1}{\Omega \cdot m} \right], \quad (1)$$

gdzie:

n – koncentracja elektronów w materiale [m^{-3}],

e – ładunek elektronów [C],

k – ruchliwość elektronów w materiale $\left[\frac{m^2}{Vs} \right]$.

Do materiałów przewodzących należą metale i ich stopy. Wartość przewodności tych materiałów jest uzależniona od kilku czynników, a mianowicie:

- a) rodzaju materiału i jego budowy,
- b) czystości materiału, czyli zawartości obcych domieszek,
- c) obróbki mechanicznej na zimno,
- d) temperatury.

We wzorze (1) zależnie od rodzaju materiału (przyczyna a), i w pewnym stopniu na skutek obecności domieszek (przyczyna b) zmienia się koncentracja elektronów (n), zarówno domieszki (przyczyna b), obróbka mechaniczna na zimno (przyczyna c) i wzrost temperatury (przyczyna d) wpływają na zmniejszenie ruchliwości elektronów (k), czyli na uzyskiwaną skierowaną prędkość

przemieszczania się elektronów, przypadającą na 1 kV przyłożonego napięcia. W sumie obecność domieszek, obróbka na zimno i wzrost temperatury powodują pogorszenie konduktywności materiału.

2. Podział i charakterystyka ogólna

Materiały przewodzące można podzielić z punktu widzenia zastosowania na:

- przewodowe,
- oporowe,
- stykowe.

Ze względu na różne własności tych 3 grup materiałów przewodzących, wymagają one oddzielnego omówienia.

2.1. Charakterystyka ogólna materiałów przewodowych

Podstawowe wymagania dla materiałów przewodowych to:

- wysoka wartość przewodnictwa elektrycznego, co pozwala na uzyskiwanie, przy danym przekroju przewodów, możliwie małych spadków napięcia i strat energii w czasie długotrwałego przepływu przez przewód prądu elektrycznego,
- wysoka wartość wytrzymałości mechanicznej, szczególnie na rozciąganie i zginanie, dla sprostania warunkom występującym w eksploatacji (np. naciąg przewodów napowietrznych, oddziaływanie sił elektrodynamicznych między szynami w rozdzielni itp.),
- niezmienność w czasie własności elektrycznych i mechanicznych pod wpływem warunków środowiskowych (np. utlenianie, zmiany temperatury, niszczące działanie siarki itp.),
- możliwe niska cena materiałów przewodowych ze względu na ich masowe zastosowanie w elektrotechnice.

Wymagania te spełniają przede wszystkim dwa czyste metale: miedź i aluminium oraz niektóre stopy miedzi i aluminium z innymi metalami jak: mosiądze, brązy, aldrej, silumin oraz duraluminium.

Wymienione wyżej wymagania spełniają częściowo również srebro i żelazo.

3. Własności, technologia i zastosowania materiałów przewodzących

Kilka podstawowych własności niektórych materiałów przewodowych zestawiono w tabelcy /1/. Dalej omówiono ich zastosowanie, a dla najważniejszych z tych materiałów podano w skrócie technologię wytwarzania wyrobów elektrotechnicznych.

Tabela /1/

Własność Materiał	Stopień czystości	Koncentracja elektronów	Ruchliwość elektronów	Konduktyw- ność	Temperaturowy współczynnik przewodności materiału	Wytrzymałość na rozciąganie	Ciepota właściwa
		n	k	γ	α	R_t	T_{21}
–	%	cm^{-3}	$\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$	$\frac{\text{MS}}{\text{m}}$	$\frac{1}{\text{deg}}$	$\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{N}}{\text{m}^3}$
Ag (czyste)	99,99	$5,9 \cdot 10^{22}$	66	62,50	0,0040	~180	$105,0 \cdot 10^3$
Ca (czyste)	99,99	$8,5 \cdot 10^{22}$	43	59,77	0,0041	200-290	–
Cu (miękkie)	99,95	–	–	57,00	0,0041	>265	$88,9 \cdot 10^3$
Al (czyste)	99,99	$8,3 \cdot 10^{22}$	27	38,20	0,0040	120-180	–
Al (twardy)	99,50	–	–	34,80	0,0040	>176	$27,0 \cdot 10^3$
Miedź (czista)	–	–	–	15,38	0,0015	–	$84,7 \cdot 10^3$
Fe (czyste)	–	–	–	10,30	0,0059	–	–
Stal węglowa	do 1,75%C	–	–	7,00	0,0059	>580	$78,0 \cdot 10^3$

Podstawowe własności niektórych materiałów przewodowych

SREBRO: Wymienione na początku tabeli srebro, mimo najwyższej wartości konduktywności, nie nadaje się, ze względu na cenę i ograniczone zasoby do masowego stosowania jako materiał przewodowy. Znajduje ono zastosowanie jedynie jako materiał na druciki topikowe w bezpiecznikach wysokiego napięcia, oraz służy do pokrywania powierzchniowego niektórych elementów miedzianych.

MIEDŹ: Najpowszechniejszym ze stosowanych materiałów przewodowych jest niewątpliwie miedź. Odnacza się dużą

konduktywnością, dobrą wytrzymałością mechaniczną, a dzięki wielkiej ciągliwości znakomicie nadaje się do obróbki plastycznej. Ponadto przewody miedziane dają się łatwo łączyć na drodze lutowania. Miedź wykazuje na ogół dobrą odporność na warunki atmosferyczne. Natomiast do wad miedzi należą, trudność obróbki skrawaniem, złe własności odlewnicze, skłonność do korozji w obecności siarki i jej związków oraz stosunkowo wysoka cena. Przy zastosowaniu stopów miedzi z innymi pierwiastkami uzyskujemy, kosztem zmniejszenia przewodności elektrycznej, inne cechy takie jak:

- podatność na obróbkę skrawaniem, na tłoczenie lub odlewanie gdy miedź łączymy z cynkiem (mosiądz) lub z innymi metalami (brąz telurowy lub aluminiowy),
- odporność na ścieranie (brąz kadmowy),
- dużą twardość i wytrzymałość mechaniczną (brąz berylowy),
- dużą sprężystość (brąz krzemowy),
- mały współczynnik tarcia (brąz fosforowy).

Surowce służące do wytwarzania wyrobów miedzianych to miedź elektrolityczna (99,9% Cu) otrzymywana przez elektrolizę miedzi hutniczej lub też lepiej tzw. miedź beztlenowa (99,95% Cu), otrzymywana drogą specjalnego przetopu miedzi elektrolitycznej. Dla uzyskaniażądanego kształtu wyrobu stosuje się obróbkę plastyczną na gorąco (np. walcowanie blach miedzianych), a przede wszystkim obróbkę plastyczną na zimno (np. walcowanie na zimno, przeciąganie przez kalibrowane otwory, wytłaczanie). Otrzymuje się w ten sposób druty, pręty, folie, blachy płaskowniki itp. Ze względu na utwardzenie produktu przez zgniot przy obróbce plastycznej stosuje się, w zależności od potrzeby, wyżarzanie, otrzymując materiał półtwardy lub miękki. Z miedzi wykonuje się przede wszystkim druty nawojowe do silników, generatorów, dławików i cewek elektromagnesów. Ponadto z miedzi wykonuje się przewody instalacyjne giętkie (linki) do odbiorników przenośnych oraz przewody sztywne (druty) do instalacji niskiego napięcia. W postaci

blach, płaskowników i prętów wykonuje się elementy aparatów elektrycznych i rozdzielnic. Mosiądze i brązy używa się na części przewodzące urządzeń i aparatów elektrycznych wysokiego napięcia, wymagających specjalnych własności, których nie może zapewnić czysta miedź.

ALUMINIUM: Drugim po miedzi, powszechnie stosowanym materiałem przewodowym jest aluminium. Ma ono wprawdzie około 1,5-raza mniejszą konduktywność w odniesieniu do miedzi, co zmusza do stosowania większych przekrojów dla przepuszczenia tej samej wartości prądu, jednakże dzięki około 3 razy mniejszemu ciężarowi właściwemu aluminium w stosunku do miedzi, uzyskuje się i tak mniejszy ciężar przewodów. Pod względem wytrzymałości mechanicznej w normalnych warunkach aluminium jest około 2-krotnie słabsze od miedzi, przy tym – ze względu na stosunkowo niską temperaturę topnienia (675°C) wytrzymałość ta jest wyraźnie zależna od temperatury pracy. Aluminium jest metalem plastycznym i ciągliwym, w związku z tym pod wpływem niezbyt dużych, ale długotrwałych obciążeń wykazuje niekorzystne zjawisko „płynięcia”. Wobec szybkiego pokrywania się ścisłą i nieprzewodzącą warstwą tlenku glinu Al_2O_3 jest to metal bardzo odporny na korozję pod wpływem wielu związków chemicznych (również siarki). W odniesieniu do czystej postaci stopy aluminium, podobnie jak miedzi, odznaczają się lepszymi właściwościami mechanicznymi i technologicznymi przy nieco gorszych własnościach elektrycznych. Stop aluminium z magnezem i krzemem (ALDREY) ma około 2,5-raza wyższą wytrzymałość na rozciąganie od aluminium i nadaje się bardzo dobrze na przewody napowietrzne. Stop Aluminium z krzemem (SILUMIN) jest wykorzystywany do odlewania niektórych elementów aparatów elektrycznych. Do wykonywania wyrobów z aluminium stosuje się aluminium hutnicze. Technologia produkcji tych wyrobów jest podobna do technologii wyrobów miedzianych, z tym że stosuje się tu prawie wyłącznie obróbkę plastyczną na zimno, ponieważ aluminium jest znacznie bardziej ciągliwe i daje się walcować na folie aż do grubości 5mm. Można tu też zastosować technologię odlewania, jednakże wówczas należy liczyć się z

pogorszeniem własności elektrycznych. Podstawowym przedmiotem zastosowania aluminium są przewody linii napowietrznych, gdzie w zależności od wymaganej wytrzymałości mechanicznej używa się linek z aldreju, lub linek aluminio-stalowych, gdzie linka stalowa stanowi rdzeń, opleciony drutami z aluminium. Powszechnie z aluminium wyrabia się żyły kabli ziemnych, połączenia szynowe w rozdzielniach, a w postaci folii, okładziny kondensatorów, a także uzwojenia klatkowe silników asynchronicznych. Zaniechano stosowania aluminium na przewody instalacji domowych ze względu na ich dużą awaryjność.

STAL: Jak widać z tablicy 1, najgorszą konduktywność z wymienionych metali posiada stal. Jednakże stal może być stosowana w przypadku przepływu bardzo małych prądów długotrwałych lub dużych prądów krótkotrwałych. W każdym przypadku stal wymaga ochrony antykorozyjnej poprzez nałożenie odpowiednich powłok. Stal stosowana w elektrotechnice na części przewodzące jest zwykłą stalą hutniczą, zabezpieczoną przed korozją poprzez ocynkowanie na gorąco. Stal znajduje zastosowanie na przewody odgromowe, uziomy, rdzenie przewodów stalowo-aluminiowych, noże uziemników, przewody jezdne stalowo-aluminiowe.

4. Program badań

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie konduktywności materiałów przewodowych.

Konduktywnością γ nazywamy wielkość służącą do oceny własności przewodników. Jest to przewodność odcinka przewodnika o przekroju jednostkowym s i długości jednostkowej l .

$$\gamma = \frac{l}{R \cdot s} \left[\frac{S}{m} \right] = \left[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \right]$$

$$[S] = \left[\frac{1}{\Omega} \right] - \text{Siemens}$$

Z pojęcia konduktywności korzysta się przy charakteryzowaniu materiałów przewodowych, do określenia własności materiałów

oporowych i elektroizolacyjnych wygodniej jest używać pojęcia rezystywności ρ .

$$\rho = \frac{l}{\gamma} [\Omega \cdot m] = \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$$

Drugim parametrem charakteryzującym dielektryki, materiały oporowe i przewodniki jest temperaturowy współczynnik rezystancji α . Jest to względna zmiana rezystancji przy zmianie temperatury o 1°.

5. Opis badań

5.1. Wyznaczenie konduktywności materiałów przewodowych

Dla wyznaczenia konduktywności próbkę żyły przewodu należy zamocować w uchwycie zaopatrzonym w zaciski napięciowe i prądowe. Za pomocą mostka Thomsona mierzy się czteroprzewodowo opór metrowego odcinka żyły pomiędzy zaciskami napięciowymi.

Wyznaczanymi wielkościami są:

- średnica znamionowa żyły – d [m],
- długość odcinka pomiarowego (pomiędzy zaciskami napięciowymi) – l [m],
- masa odcinka w powietrzu – m [kg],
- gęstość materiału z którego wykonana jest żyła – ρ_{pr} [kg/m³],
- opór elektryczny odcinka pomiarowego zmierzony w temperaturze t – R_t [Ω].

Wielkościami obliczanymi są:

- przekrój poprzeczny próbki – s [m²]

$$s = \frac{m}{\rho_{pr} \cdot l}$$

- opór elektryczny odcinka l w temperaturze 20°C – R_{20} [Ω]

$$R_{20} = \frac{R_t}{1 + \alpha(t - 20)}$$

α – temperaturowy współczynnik rezystancji [1/°C]

- konduktywność γ [S/m]

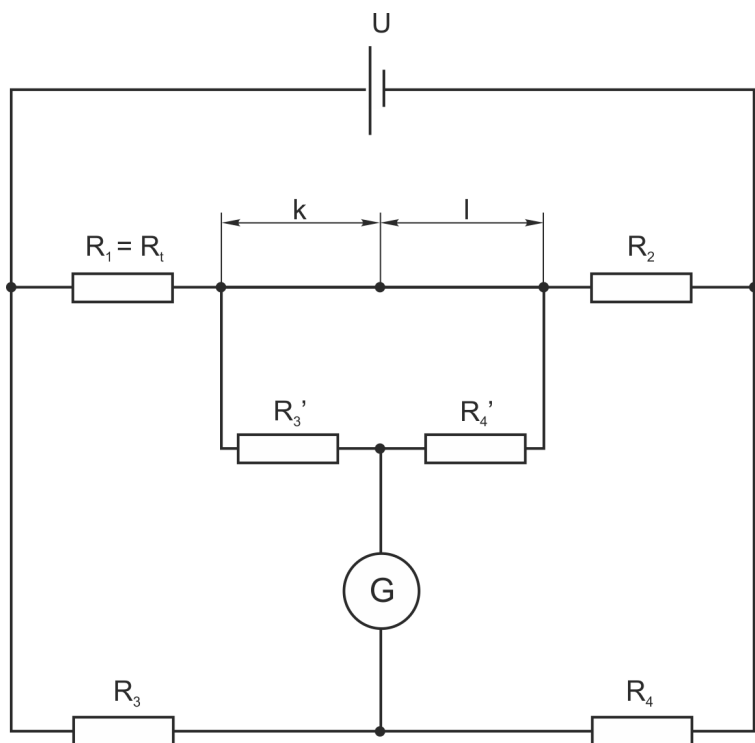
$$\gamma = \frac{l}{R_{20} \cdot s}$$

5.2 Aparatura

Do wykonania pomiarów potrzebne są następujące przyrządy:

- uchwyt pomiarowy do zamocowania próbki,
- cyfrowy mostek do pomiaru rezystancji,
- waga laboratoryjna,
- termometr.

Pomiar oporu odcinka żyły wykonuje się przy użyciu cyfrowego mostka do pomiaru rezystancji firmy HIOKI. Przyrząd ten wykorzystuje metodę czteroprzewodową pomiaru rezystancji bazującą na układzie mostka Thomsona.



Schemat mostka Thomsona; k , l – rezystancja przewodów łączeniowych

W stanie równowagi mostka:

$$\frac{R_t + k}{R_3} = \frac{R_2 + l}{R_4}$$

czyli

$$\frac{R_t}{R_3} + \frac{k}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} + \frac{l}{R_4}$$

Jeżeli w równaniu tym wyeliminuje się wyrazy $\frac{k}{R_3}$ i $\frac{l}{R_4}$ poprzez doprowadzenie do równowagi mostka, za pomocą nastawnych oporników R_3 i R_4 oraz R_3' i R_4' to wtedy:

$$R_t = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4},$$

a rezystancja przewodów łączeniowych przestaje wpływać na wyniki pomiarów. W dokładniejszych mostkach laboratoryjnych opornik R_2 jest zwykle stałym opornikiem wzorcowym, a nastawia się wartości rezystancji oporników R_3 , R_3' , R_4 i R_4' . Natomiast w przypadku użycia technicznego mostka Thomsona uzyskujemy sprawniejszy pomiar przez płynną zmianę R_2 przy odpowiednio dobranym stosunku R_3 do R_4 oraz R_3' i R_4' .

5.3 Przygotowanie próbek

Pomiar wykonuje się na wyprostowanej próbce żyły przewodu (bez izolacji) o długości co najmniej 1,2 m. Próbkę należy wyprostować nie zginając jej, gdyż wielokrotne zginanie prowadzi do utwardzania próbki, oraz uważając aby nie zmienić jej przekroju. Powierzchnia próbki powinna być gładka i nie posiadać widocznych gołym okiem uszkodzeń.

5.4 Opis pomiaru

Przed przystąpieniem do pomiaru oporności należy wyznaczyć przekrój próbki znając jej masę (po zważeniu) i gęstość (z tabeli). Następnie lekko rozciągniętą próbkę należy zamocować w zaciskach prądowych ławy pomiarowej i **delikatnie** opuścić zaciski napięciowe. Długość odcinka pomiarowego pomiędzy zaciskami napięciowymi wynosi 1 m. Zaciski prądowe i napięciowe łączymy z zaciskami mostka, zgodnie z oznaczeniami na mierniku. Uruchamiamy pomiar. Po ustaleniu wskazania wynik notujemy. Pomiaru temperatury dokonujemy termometrem cyfrowym w pobliżu badanej próbki z dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

5.5 Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów należy obliczyć konduktywność każdego z materiałów. Gdy pomiar odbywa się w temperaturze różnej od 20°C należy przeliczyć R_t na R_{20} . W sprawozdaniu należy załączyć jedno przykładowe obliczenie. Wartości zmierzone oraz obliczone należy umieścić w tabeli. Wyniki omówić i podać wnioski.

Tabela pomiarowa

Rodzaj materiału	d	l	m	R _t	t	s	R ₂₀	γ
	[m]	[m]	[kg]	[Ω]	[°C]	[m ²]	[Ω]	$[\frac{MS}{m}]$
Miedź								
Miedź								
Miedź								
Aluminium								
Stal								
Mosiądz								

3. Badanie własności materiałów ferromagnetycznych

1. Wprowadzenie

W każdym atomie znanych nam materiałów występują elektrony krążące po eliptycznych orbitach. Można więc powiedzieć, że następuje przemieszczanie ładunku $q=e$ w czasie obiegu elektronu wokół jądra atomowego. Dodatkowo każdy elektron obraca się wokół własnej osi, co nosi nazwę spinu. Oba te zjawiska powodują pojawienie się magnetycznych momentów orbitalnego i spinowego. Momenty te sumują się wektorowo i ostatecznie każdy atom posiada moment magnetyczny. Może on być różny od zera lub równy zeru. Zewnętrzne pole magnetyczne zakłóca ruch elektronów i pojawia się indukowany moment magnetyczny skierowany zawsze przeciwnie do wektora natężenia pola magnetycznego. Zjawisko powyższe nosi nazwę efektu diamagnetycznego i występuje we wszystkich ośrodkach materialnych i nie zależy od temperatury. Ponieważ wartość momentu indukowanego jest niewielka ujawnia się on tylko w materiałach, dla których wypadkowy moment magnetyczny jest bliski zera materiały spełniające ten warunek są **diamagnetykami**.

Jeżeli zaczniemy analizować materiały, których wypadkowy moment magnetyczny jest różny od zera to zaobserwujemy, że ich zachowanie jest zależne od odległości między atomami i rozłożenia elektronów na poszczególnych orbitach. Cechą charakterystyczną

jest stosunek $\frac{a}{r}$

a – odległość atomów,

r – promień orbity niecałkowicie zajętej elektronami.

Jeżeli stosunek ten $> 6,2$ to wzajemne ustawienie momentów

magnetycznych jest chaotyczne, za co odpowiadają ruchy cieplne, a ciało jest praktycznie obojętne na działające pole magnetyczne.

Ciała wykazujące $\frac{a}{r} > 6,2$ nazywamy **paramagnetykami**.

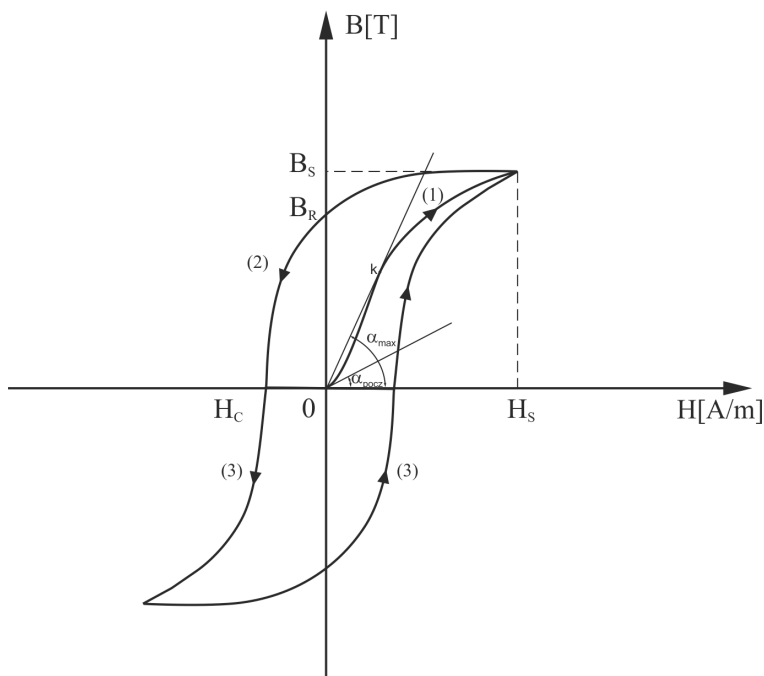
Dla materiałów w których $3,2 \leq \frac{a}{r} \leq 6,2$ na skutek oddziaływań międzyatomowych powstają siły wymiany porządkujące ustawienie się sąsiednich dipoli magnetycznych. Gdy do takiego materiału przyłożymy zewnętrzne pole magnetyczne to wszystkie dipole ustawiają się równolegle do linii pola zewnętrznego. Efekt ten nazywamy ferromagnetycznym, a materiały takie **ferromagnetykami**.

Wartość stosunku $\frac{a}{r}$ jest zależna nie tylko od budowy atomowej danego materiału, ale również od temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury wzrastają bowiem odległości pomiędzy atomami i w pewnej temperaturze efekt ferromagnetyczny przestaje występować. Temperatura ta jest charakterystyczna i różna dla każdego materiału i nosi nazwę – temperatury Curie.

2. Ferromagnetyki i pętla histerezy

Gdy nie ma zewnętrznego pola magnetycznego dipole magnetyczne ustawiają się w jednym kierunku w ramach makroskopowych domen magnetycznych, których wzajemne ustawienie jest chaotyczne. Pod wpływem pola magnetycznego obszary te ustawiają się wzdłuż linii sił pola magnetycznego i dalsze zwiększanie natężenia pola nie powoduje już zmian ich położenia.

Materiały ferromagnetyczne charakteryzują się zjawiskiem histerezy, które obrazuje nieodwracalne zmiany indukcji magnetycznej w następstwie zmian natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. Ich graficznym obrazem jest pętla histerezy obrazująca zmiany $B=f(H)$.



Na rysunku obrazującym pętlę histerezy możemy wyróżnić następujące cykle magnesowania:

1. Charakterystyka pierwotnego magnesowania;
2. Krzywa odmagiesowania;
3. Pełna pętla histerezy magnetycznej.

Charakterystyka pierwotnego magnesowania jest to krzywa powstająca przy pierwszym magnesowaniu danego materiału biegnąca od punktu (0;0) do punktu ($H_s; B_s$).

B_s – indukcja nasycenia, jest największą możliwą do uzyskania w materiale indukcją. Dalsze zwiększanie natężenia pola H nie zwiększa indukcji.

H_s – natężenie nasycenia jest natężeniem pola magnetycznego, dla którego występuje indukcja nasycenia.

Krzywa odmagiesowania jest to krzywa powstająca przy zaniku zewnętrznego pola magnetycznego biegnąca od punktu ($H_s; B_s$), aż do punktu ($H_C; 0$) poprzez punkt ($0; B_R$).

H_C – natężenie koercji (natężenie powściągające) jest natężeniem pola magnetycznego przy którym indukcja jest równa zero.

B_R – remanencja (pozostałość magnetyczna) jest indukcją szczątkową materiału namagnesowanego do stanu nasycenia, a następnie odmagiesowanego poprzez zmniejszenie pola zewnętrznego.

Pełna pętla histerezy magnetycznej przedstawia pełny cykl przemagnesowania magnetyka i nosi nazwę granicznej pętli histerezy magnetycznej.

Procesowi przemagnesowywania towarzyszą ustalone straty energii wydzielające się w postaci ciepła. Straty powyższe, zwane stratami na histerezę są proporcjonalne do pola powierzchni odpowiedniej pętli histerezy oraz do częstotliwości prądu magnesującego. Straty energii powodowane są również przez prądy wirowe indukowane w rdzeniu przez okresowo zmienny strumień magnetyczny. Sumę jednostkowych strat mocy zużywanej na histerezę i prądy wirowe nazywamy stratnością magnetyczną.

3. Przenikalność magnetyczna μ

Każdy materiał możemy scharakteryzować pod względem jego oddziaływania z zewnętrznym polem magnetycznym. Jak wspomniano we wprowadzeniu, własności magnetyczne są wynikiem zjawisk kwantowo mechanicznych. Jednak do opisu materiałów w świecie makroskopowym wygodniej jest używać pojęcia przenikalności magnetycznej.

μ – przenikalność magnetyczna materiału informuje nas o ile razy zmieni się pole magnetyczne po przejściu przez materiał.

$$\mu = \mu_r \mu_0 \left[\frac{H}{m} \right]$$

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni określona jest na poziomie $4 \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right]$

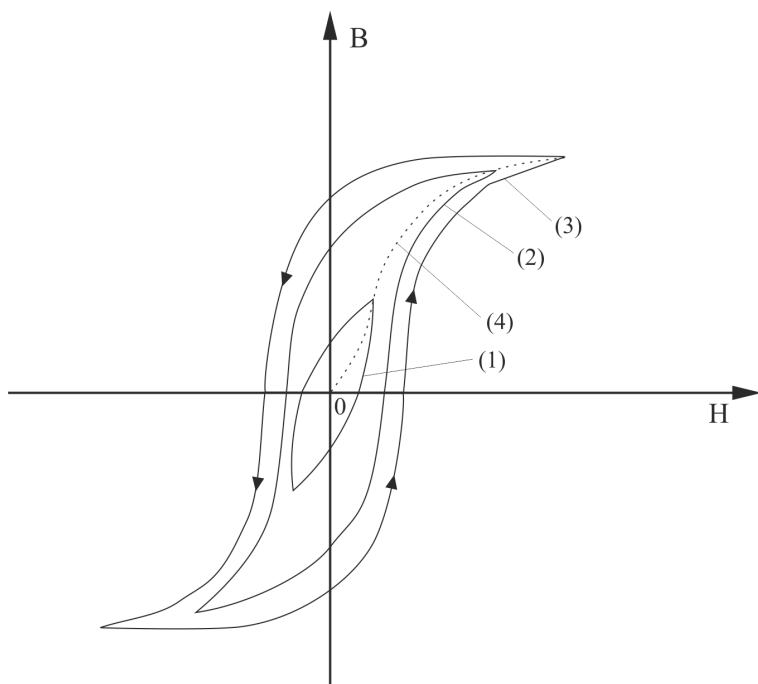
μ_r – przenikalność względna materiału informuje ile razy przenikalność materiału jest większa od przenikalności magnetycznej próżni.

Dla materiałów para- i diamagnetycznych indukcja pola magnetycznego i natężenie tego pola są związane zależnością $B = \mu \cdot H$. W materiałach ferromagnetycznych zależność pomiędzy B i H jest nieliniowa i określona krzywą magnesowania. Jedynie w konkretnym punkcie możemy powiedzieć, że zależność $B = \mu \cdot H$, jest nadal spełniona.

W odniesieniu do ferromagnetyków najczęściej jest używane pojęcie przenikalności magnetycznej normalnej związanej z pierwotną krzywą magnesowania. Ponieważ przenikalność magnetyczna normalna wyraża się zależnością $\mu = B/H$ jest więc proporcjonalna do tangensa kąta a zawartego pomiędzy osią odciętych i prostą przechodzącą przez dany punkt krzywej pierwotnego magnesowania czyli $\mu = B/H = k \tan \alpha$. Wynika stąd, że przenikalność wzrasta od pewnej wartości początkowej μ_{pocz} (odpowiadającej kątowi α_{pocz}), do pewnej wartości maksymalnej μ_{max} (odpowiadającej kątowi α_{max} w punkcie k krzywej), po czym znowu maleje.

4. Krzywa pierwotnego magnesowania (krzywa komutacyjna)

Krzywą pierwotnego magnesowania możemy otrzymać poprzez powolne namagnesowanie próbki polem stałym lub wolnozmiennym. Wygodniej jednak, ze względów pomiarowych, jest posłużyć się krzywą komutacyjną. Otrzymujemy ją łącząc wierzchołki pętli histerezy dla kolejnych wartości prądu magnesującego aż do osiągnięcia stanu nasycenia.



1,2,3 – kolejne pętle histerezy,
4 – krzywa komutacyjna

4. Podstawowe parametry materiałów magnetycznych

Materiały magnetyczne dzielą się na dwie zasadnicze grupy:

- materiały magnetycznie miękkie,
- materiały magnetycznie twarde.

Cechą wyróżniającą obydwie grupy materiałów jest szerokość granicznej pętli histerezy.

Materiały magnetycznie miękkie odznaczają się bardzo wąską graniczną pętlą histerezy. Natężenie powściągające H_c nie przekracza w tym przypadku wartości 200 A/m, a może być nawet mniejsze od 1 A/m. Materiały magnetycznie miękkie łatwo się

magnesują i łatwo się odmagnesowują. Histereza powoduje tu minimalne straty energii. Z tych powodów materiały te są stosowane na rdzenie elektromagnesów prądu stałego oraz wszelkie obwody magnetyczne pracujące przy okresowo zmiennych strumieniach magnetycznych (maszyny elektryczne, transformatory, elektromagnesy prądu zmiennego, dławiki itp.). Do materiałów magnetycznie miękkich należą: żelazo, stopy żelaza z krzemem (stale krzemowe), stopy żelaza z niklem (permaloje), żelaza z kobaltem (permedury), żelaza z aluminium oraz ferryty (spieki tlenków metali). Cechą charakterystyczną ferrytów jest bardzo wysoka rezystywność. W celu skutecznego ograniczenia strat na prądy wirowe w urządzeniach wielkiej częstotliwości są stosowane tzw. rdzenie proszkowe, wykonane z drobno sproszkowanego magnetyka spojonego utwardzoną żywicą.

Materiały magnetycznie twarde mają bardzo szeroką graniczną pętlą histerezy. Wartość H_c jest w tym przypadku nie mniejsza od 4000 A/m, a niekiedy jest większa nawet od 200 000 A/m. Materiały magnetycznie twarde po namagnesowaniu do nasycenia zachowują w sposób trwały uzyskane własności magnetyczne. Z tego względu są one używane do wytwarzania wszelkiego rodzaju magnesów trwałych. Do materiałów magnetycznie twardych należą stale węglowe i stopowe zawierające chrom, wolfram, kobalt, molibden, stopy żelazo-aluminium-nikiel (Alni), stopy żelazo-aluminium-nikiel-kobalt (Alnico)

Własności materiałów magnetycznych charakteryzują wspomniane wyżej parametry, a w szczególności:

- Komutacyjna krzywa magnesowania, tzn. krzywa przechodząca przez wierzchołki kolejnych pętli histerezy. Jest ona zbliżona do krzywej pierwotnego magnesowania,
- Remanencja B_R [T],
- Koercja $H_C \left[\frac{A}{m} \right]$,

- Przenikalność magnetyczna początkowa $\mu_{\text{pocz}} \left[\frac{H}{m} \right]$ oraz maksymalna $\mu_{\text{max}} \left[\frac{H}{m} \right]$,
- Indukcja nasycenia $\mathbf{B}_S$ [T],
- Maksymalne natężenie pola magnetycznego $\mathbf{H}_S \left[\frac{A}{m} \right]$,
- Maksymalna wartość iloczynu $\mathbf{B}_S \cdot \mathbf{H}_S$, co jest miarą energii zgromadzonej w magnesie $\mathbf{B} \mathbf{H}_{\text{max}} \left[\frac{W}{m^3} \right]$.

5. Metody badań materiałów magnetycznych

Badania materiałów magnetycznych możemy przeprowadzać przy polach stałych jako statyczne oraz przy polach zmiennych jako dynamiczne, co ostatecznie powoduje podział metod badawczych na:

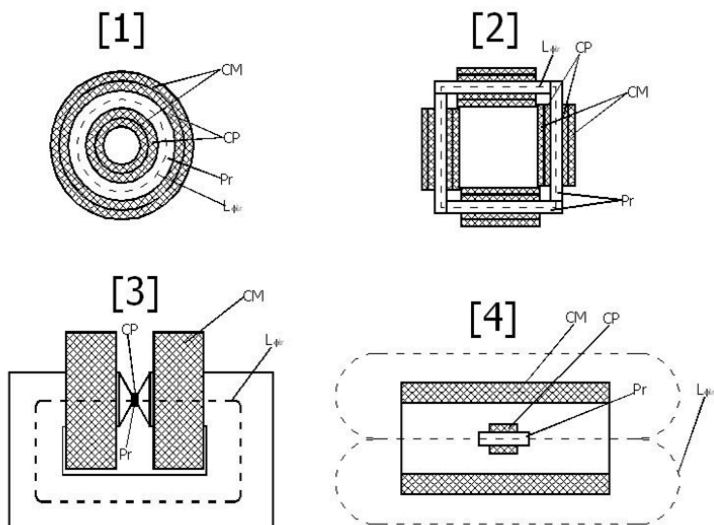
- badanie materiałów magnetycznie miękkich w stałych polach magnetycznych,
- badanie materiałów magnetycznie miękkich w przemiennych polach magnetycznych,
- badanie materiałów magnetycznie twardych.

Próbka magnetyczna tworzy część lub całość obwodu magnetycznego. Pole magnetyczne jest uzyskiwane za pomocą cewek z prądem. W zależności od kształtu próbki i obwodu magnetycznego wyróżniamy:

- Układy do badania próbek zamkniętych pierścieniowych [1] i ramowych [2]. Obwód magnetyczny jest tu pierścieniem zwiniętym z blachy z nawiniętymi uzwojeniami lub pakietem blach, który wsuwa się do zestawu stałych cewek. Jest to tzw. aparat Epsteina.

- Układy do badania próbek w zamkniętych obwodach, gdzie próbka stanowi tylko część obwodu magnetycznego tzw. permeatry jarzmowe [3]. Próbka zamyka obwód magnetyczny jarzma, na którym nawinięte są stałe uzwojenia magnesujące i pomiarowe.
- Układy do badania próbek otwartych [4] gdzie prostą próbkę wkładamy do długiej cewki magnesującej.

Wadą układów otwartych jest mniejsza dokładność rekompensowana prostotą układu (stałe cewki magnesujące) oraz szybkością pomiaru i możliwością wykonywania pomiarów seryjnych. Badanie próbek pierścieniowych jest bardziej dokładne jednak przez konieczność wykonania uzwojeń na zamkniętym obwodzie magnetycznym jest długotrwałe. Pomiar indukcji magnetycznej B jest możliwy za pomocą pomiaru indukcji w szczeliny pośrednio (z prądu magnesującego cewki po odpowiednim przekształceniu) lub bezpośrednio np. za pomocą czujników hallotronowych. Pomiar natężenia pola H jest możliwy za pomocą pomiaru prądu magnesującego. Poniżej przedstawiono przykładowe układy próbek do badań.



7. Układ pomiarowy i opis metody pomiarowej

Do wyznaczenia pętli histerezy oraz krzywej komutacyjnej posłużymy się próbkami pierścieniowymi wyposażonymi w uzwojenia oraz kilka prostych elementów dyskretnych. Układ zasilany jest z układu autotransformatora oraz transformatora obniżającego napięcie do 48 V. Na ekranie oscyloskopu otrzymujemy obraz pętli histerezy. Znając wartości elementów dyskretnych możemy przeliczyć wartości napięć w odpowiednich punktach obrazu na wartości B lub H. Zasada pomiaru jest następująca: w obwodzie pierwotnym (N_1) pod wpływem napięcia płynie zmienny prąd I_1 wytwarzając w rdzeniu ferromagnetycznym zmienne pole magnetyczne o natężeniu proporcjonalnym do tego prądu. Na oporniku R_1 powstaje spadek napięcia U_{R1} proporcjonalny do prądu I_1 , który podawany jest na płytki odchyłania poziomego X oscyloskopu (pełni rolę tzw. podstawy czasu dla oscyloskopu). Z

prawa Ampere wiemy, że $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i$, całka z wektora

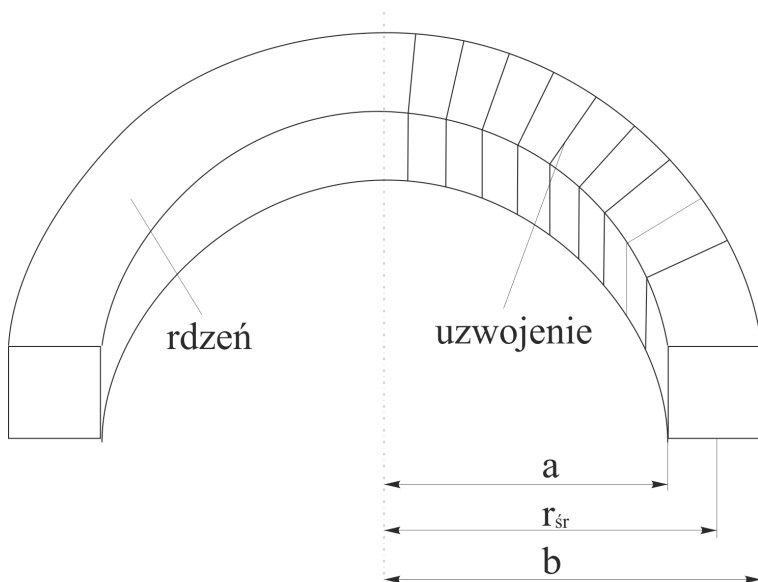
natężenia pola magnetycznego po obwodzie zamkniętym jest równa sumie prądów przepływających przez kontur całkowania $\vec{H} \cdot d\vec{l} = Hdl$. Jeżeli konturem całkowania jest okrąg o promieniu r leżący wewnątrz próbki to

$\oint Hdl = 2\pi rH = N_1 \cdot I_1$, a zatem dla cewki toroidalnej

przyjmujemy wartość $r = r_{sr}$, gdzie $r_{sr} = \frac{b+a}{2}$.

W efekcie końcowym otrzymujemy wyrażenie wiążące napięcie na oporniku R_1 z natężeniem pola magnetycznego H .

$$H = \frac{N_1}{2\pi r_{sr}} I_1 = \frac{N_1}{2\pi r_{sr}} \cdot \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{N_1}{2R_1 \pi r_{sr}} U_{R1}$$



Rysunek przedstawia geometrię próbki i usytuowanie $\mathbf{r}_{sr}$.

Zmienny strumień magnetyczny wytwarza w uzwojeniu wtórnym (N_2) SEM indukcji. Ta siła elektromotoryczna jest zgodnie z prawem indukcji równa $E = -N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$.

Oznaczamy przez $\frac{\vec{dn}}{dn}$ jednostkowy wektor normalny do powierzchni S obejmowanej przez zwój cewki otrzymujemy $\varphi = \vec{B} \cdot \frac{\vec{dn}}{dn} \cdot S$. Ponieważ w przypadku cewki toroidalnej wektory $\vec{B}$ oraz $\frac{\vec{dn}}{dn}$ są równoległe to otrzymujemy $E = -N_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt}$. Napięcie na uzwojeniu wtórnym (N_2) jest proporcjonalne do pochodnej indukcji. Jeżeli chcemy obejrzyć i zmierzyć pętlę histerezy to na płytce odchyłania oscyloskopu

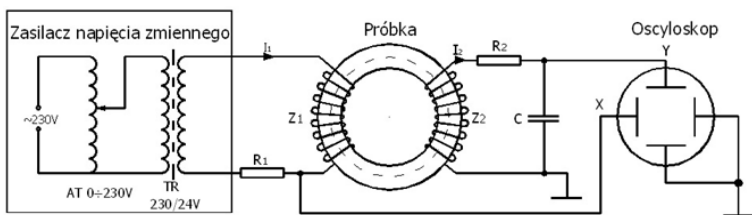
musimy podać napięcie proporcjonalne do B . Aby tego dokonać zastosujemy prosty układ całkujący RC gdzie:

$$U_C = \frac{1}{RC} \int E dt = -\frac{1}{RC} \cdot N_2 \cdot S \cdot B,$$

co po przekształceniu pozwala otrzymać zależność pomiędzy B a napięciem U_C doprowadzonym do płytek odchylania pionowego Y .

$$B = \frac{R_2 \cdot C}{N_2 \cdot S} \cdot U_C$$

Wartości napięć U_{R1} oraz U_C są wartościami maksymalnymi i odczytujemy je bezpośrednio z oscyloskopu.



Schemat układu pomiarowego

8. Sposób przeprowadzenia pomiarów i opracowanie wyników

Wymiary Próbki, jej przekrój, oraz wartości R_1 , R_2 , C są podane na tabliczce przy każdym rdzeniu ferromagnetycznym. Układ należy podłączyć do zasilania oraz podłączyć oscyloskop do odpowiednich gniazd pomiarowych typu BNC. Ustawić oscyloskop w tryb pracy XY. Regulując autotransformatorem zwiększać napięcie zasilające i obserwować pętle histerezy. Notować kolejne punkty konieczne do wyznaczenia krzywej komutacyjnej. Po osiągnięciu maksymalnej pętli histerezy przenieść jej obraz do protokołu. Otrzymane napięcia posłużą do obliczenia B i H . Otrzymane wyniki zanotować w tabeli, przeprowadzić obliczenia i wyciągnąć wnioski.

Przykładowe tabele pomiarowe

Pomiar B_s i H_s

Lp.	$U_{R1} [V]$	$H_S \left[\frac{A}{m} \right]$	$U_C [V]$	$B_{\{S\}} [T]$
1				
2				

Pomiar B_r i H_c

Lp.	$U_{R1} [V]$	$H_c \left[\frac{A}{m} \right]$	$U_C [V]$	$B_{\{r\}} [T]$
1				
2				

Parametry materiałów magnetycznie miękkich

Materiał	Zawartość składników [%] (reszta żelazo)	μ_r pocz	μ_r max	H_c [A/m]	B_s [T]
Żelazo przetopione w wodrze	0,005 C; 0,001 O ₂	20 000	340 000	2,4	2,15
Żelazo elektrolityczne	0,02 C; 0,01 O ₂	3 300	21 500	6,4	2,17
Stal niskowęglowa	0,02 C; 0,035 O ₂		2 000	144,0	2,10
Stal krzemowa izotropowa	4,05 Si; 0,015 C		7 000	40,0	1,97
Stal krzemowa izotropowa	3,0 Si		30 000	12,0	2,00
Monokrystaliczny stop	3 Si		3 800 000		
Hyperm 50 (permaloj)	50 Ni	3 350	28 000	4,8	1,50
Permaloj C	78 Ni	25 000	120 000	2,4	0,80
Supermalloy	79 Ni; 5,0 Mo; 0,3 Mn		800 000	0,2	0,80
Finmet	1 Cu; 3 Nb; 13,5 Si; 9 B		100 000	< 1,0	1,25
Alsifer (rdzenie proszkowe)	5,6 Al; 9,5 Si	35 000	120 000	1,6	
Ferryt Fe ₂ O ₃ +ZnO+NiO		250	1000	110	

Parametry materiałów magnetycznie twardych

Materiał	Zawartość składników [%] (reszta żelazo)	B_r [T]	H_c [A/m]	BH_{max} [J/m³]
Stal węglowa (zahartowana)	1 C; 1 Mn	0,86	4 800	2 000
Stal wolframowa W6	6 W; 0,3 Mn; 0,7 C	1,00	4 950	2 300
Alni 110	13 Al; 25 Ni; 3 Cu	0,54	45 000	10 000
Alnico VI	8 Al; 15 Ni; 24 Co; 3 Cu; 1 Ti	1,00	60 000	35 000
Alnico XII	6 Al; 18 Ni; 35 Co; 8 Ti	0,58	76 000	15 000
Platyno-kobalt	77 Pt; 23 Co	0,45	208 000	38 000
Ferryt kobaltowy	30 Fe ₂ O ₃ ; 44 Fe ₃ O ₄ ; 26 Co ₂ O ₃	0,16	86 000	5 000
Ferryt barowy	BaO × 6Fe ₂ O ₃	0,20	120 000	4 000
Stop Nd ₂ Fe ₁₄ B (neodymowy)		1,30	do 1 000 000 000	do 300 000

4. Badanie wytrzymałości elektrycznej dielektryków

1. Wprowadzenie

Materiałami elektroizolacyjnymi, czyli dielektrykami są materiały praktycznie nie zawierające swobodnych ładunków. Brak swobodnych ładunków powoduje, że stawiają one bardzo wysoki opór przepływowi prądu elektrycznego. Z pośród tej grupy materiałów największe zastosowanie mają dielektryki stałe.

Na zachowanie się dielektryka w polu elektrycznym wpływają trzy główne czynniki:

- polaryzacja,
- przewodność,
- jonizacja.

W rzeczywistości żaden dielektryk nie jest pozbawiony jakichkolwiek ładunków, gdyż występują w nim jony pochodzące z zanieczyszczeń i defektów budowy oraz oddziaływania wody, związków chemicznych, promieniowania UV i promieniowania γ . Wobec istnienia takich ładunków po umieszczeniu dielektryka w polu elektrycznym ustala się w nim uporządkowany ruch ładunków noszący nazwę prądu upływu. Przy podnoszeniu napięcia przyłożonego do dielektryka, gdy przekroczymy pewną krytyczną wartość następuje zjawisko przebicia dielektryka. Mechanizm tego zjawiska ma swoją przyczynę w jonizacji zderzeniowej, która przy osiągnięciu przez ładunki pewnej granicznej energii ma charakter lawinowy. Następuje gwałtowny wzrost prądu przepływającego przez dielektryk i dochodzi do przebicia. W miejscu przebicia występuje miejscowe zwęglenie.

Wytrzymałość dielektryczna jest wielkością określającą odporność dielektryka na przebicie. Jest to więc krytyczne

natężenie pola elektrycznego, przy którym występuje przebicie dielektryka.

$$K_p = \frac{U_{kr}}{d} \left[\frac{kV}{mm} \right],$$

U_{kr} – napięcie przebicia,

d – grubość materiału.

Wytrzymałość dielektryczna zależy od:

- rodzaju i struktury dielektryka,
- temperatury,
- grubości dielektryka,
- rodzaju napięcia,
- kształtu elektrod.

Najwyższą wytrzymałość wykazują materiały o gęstej strukturze, nie zabrudzone i nie zawilgocone.

Wyniki badania wytrzymałości dielektrycznej zależą od:

- sposobu podwyższania napięcia,
- rodzaju napięcia,
- rodzaju elektrod,
- rodzaju próbek,
- otaczającego środowiska.

W zależności od sposobu podwyższania napięcia wyróżnia się wytrzymałość dielektryczną doraźną i wytrzymałość dielektryczną stopniowaną.

Wytrzymałość dielektryczna doraźna określana jest przy równomiernym podnoszeniu napięcia od zera, aż do przebicia w czasie 10-20 s.

Wytrzymałość dielektryczna stopniowana określana jest przy podnoszeniu napięcia od wartości początkowej do napięcia przebicia stopniowo, co 20 s lub 1 minutę. Wartość początkowa wynosi 50% doraźnego napięcia przebicia.

Oprócz badania wytrzymałości wykonuje się próbę napięciową

danego materiału. Polega ona na sprawdzeniu czy dana próbka materiału wytrzyma w ciągu określonego czasu, bez przebicia określone napięcie probiercze. W badaniach tych stosuje się napięcie stałe, przemienne lub udarowe. Układy pomiarowe do badania wytrzymałości dielektrycznej napięciem przemiennym o częstotliwości 50 Hz mają jako źródło zasilania transformatory probiercze w układzie symetrycznym (z uziemionym środkiem uzwojenia WN) lub niesymetrycznym. Przy pomiarach napięciem stałym stosuje się prostowniki wysokonapięciowe z kondensatorami wygładzającymi. Źródłem napięć udarowych jest generator udarów, umożliwiający regulację amplitudy napięcia oraz kształtu udaru i jego biegunowości.

2. Program badań

Celem badań jest:

a) wyznaczenie wytrzymałości dielektrycznej doraźnej następujących materiałów:

- papieru kablowego suchego,
- bibułki kondensatorowej nasączonej olejem,

b) wyznaczenie wytrzymałości dielektrycznej stopniowanej 20 s i 1 minutowej dla jednego z powyższych materiałów,

Wyznaczenie wytrzymałości dielektrycznej polegać będzie na umieszczeniu próbki pomiędzy elektrodami i przyłożeniu do nich narastającego napięcia sinusoidalnego $f = 50$ Hz aż do przebicia elektrycznego.

Wielkościami mierzonymi są:

- grubość próbki d [mm],
- napięcie przebicia U_p [kV].

Badania wykonuje się w wysokonapięciowym polu probierczym, osłoniętym siatką i dostępnym tylko przy wyłączonym napięciu. Autotransformator regulacyjny, przełączniki oraz przyrządy

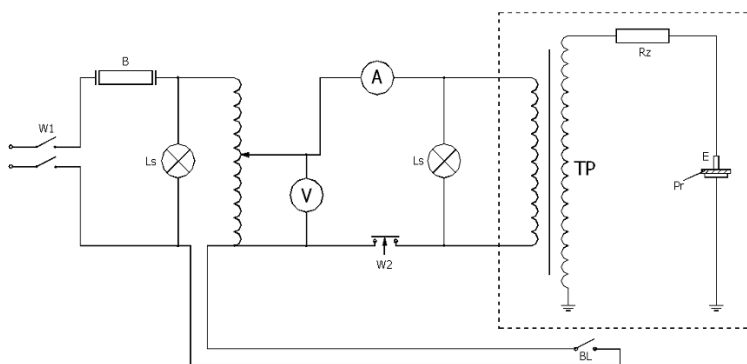
pomiarowe umieszczone są poza polem probierczym i znajdują się na poziomie napięcia 230 V.

Transformator probierczy TP60 wytwarza wysokie napięcie przyłożone do próbki. Regulacja tego napięcia odbywa się poprzez regulację napięcia pierwotnego TP60 przez autotransformator AT w zakresie 0-230 V. Moc transformatora TP60 jest tak dobrana, aby po przebicium prąd ograniczony rezystorem R_z był na poziomie 40 mA. Pomiaru napięcia dokonujemy za pomocą woltomierza włączonego po stronie pierwotnej transformatora. Napięcie przebicia obliczamy mnożąc napięcie odczytane z woltomierza przez przekładnię transformatora.

Do badania cienkich papierów, zamiast transformatora TP60 używa się także transformatora o napięciu wtórnym 10 kV.

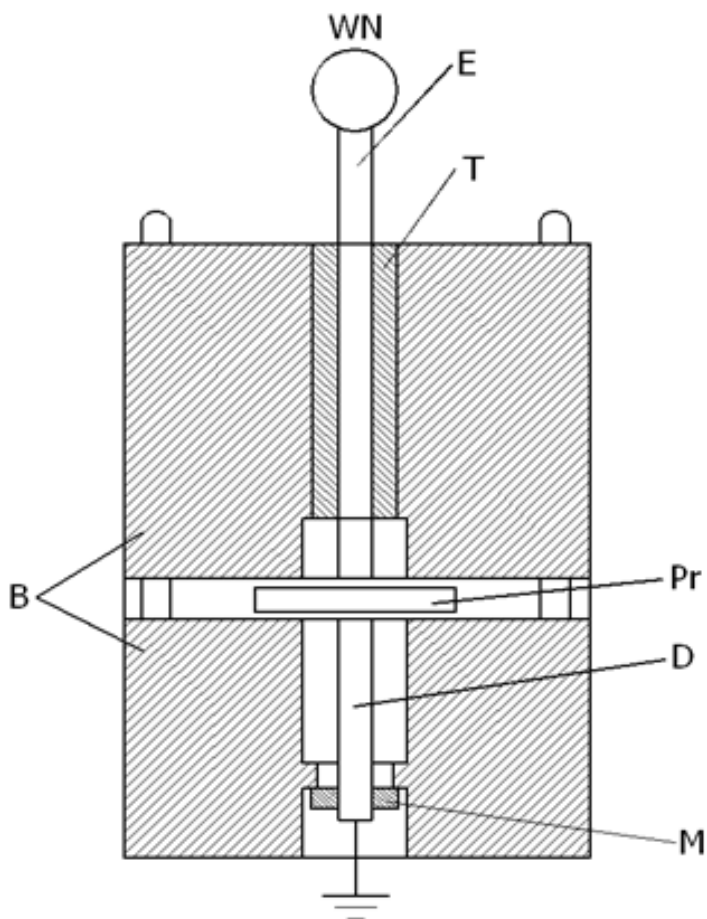
Pulpit sterowniczy jest zabezpieczony przed przeciążeniami wyłącznikiem ograniczającym prąd po wystąpieniu przebicia, jednak ze względów bezpieczeństwa należy być gotowym do wyłączenia napięcia wyłącznikiem W2.

Próbki umieszcza się u układzie elektrod przedstawionym na rysunku. Elektrody wykonane z mosiądzu osadzone są w bloku izolacyjnym. Schemat układu do badań wytrzymałości dielektrycznej przedstawiono na rysunku poniżej.



W1 – wyłącznik główny, B – bezpiecznik, Ls – lampka sygnalizacyjna, W2 – wyłącznik napięcia, TP – transformator probierczy, Rz – rezystor ograniczający, Pr – próbka badana, E – elektroda napięciowa, BL – blokada wejściowa, - - - - - pole wysokonapięciowe

W celu dokonania pomiarów przy takim samym docisku i naciągu próbki wykorzystujemy układ pięciu elektrod rozmieszczonych liniowo. Powierzchnie elektrod muszą być gładkie, wypolerowane i oczyszczone z osadów po poprzednich wyładowaniach. Dolne elektrody są uziemione, a do górnych doprowadzamy napięcie probiercze. Przekrój poprzeczny przez układ elektrod do badania pasków dielektryków przedstawia rysunek poniżej.



B – blok izolacyjny, M – taśma mosiężna, D – elektroda dolna (uziemia), Pr – próbka badana, T – tuleja prowadząca, mosiężna, E – elektroda górna (napięciowa)

Próbkami są taśmy o wymiarach (300×25) mm. Na początku należy zmierzyć grubość próbki za pomocą mikrometru w trzech różnych miejscach. Następnie umieścić próbkę w układzie elektrod, zamknąć drzwi pola WN, sprawdzić działanie blokady i rozpocząć pomiary

zwiększając napięcie aż do przebicia. Po wystąpieniu przebicia należy wyłączyć wysokie napięcie.

Każdorazowo przy wejściu na pole WN należy zawiesić drążek uziemiający na szynie wysokiego napięcia!

Przy pomiarze wytrzymałości doraźnej napięcie zwiększamy ze stałą szybkością od zera do wartości przebicia. Przebicie powinno być osiągnięte w czasie maksimum 30 s. Po wykonaniu pięciu pomiarów próbkę należy obejrzeć i odrzucić te wyniki, w których przebicie nastąpiło po powierzchni dielektryka. Przy pomiarze wytrzymałości 1 minutowej napięcie podnosi w ciągu 10 sekund od zera do wartości początkowej wybranej z szeregu napięć znormalizowanych. Jako napięcie początkowe wybieramy z szeregu napięcie najbliższe 50% napięcia wytrzymałości doraźnej. Następnie zwiększamy napięcie do następnej wartości z szeregu i utrzymujemy przez 1 minutę. Podnoszenie napięcia powtarzamy aż do przebicia próbki. Szereg napięć znormalizowanych znajduje się przy pulpicie sterowniczym.

3. Opracowanie wyników

Wyniki pomiarów należy umieścić w tabeli pomiarowej przedstawionej poniżej. Jako grubość d przyjmujemy wartość średnią z trzech pomiarów. Wytrzymałość dielektryczną określamy jako średnią arytmetyczną z pięciu pomiarów.

$$K = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{U_{pi}}{d} \left[\frac{kV}{mm} \right],$$

U_{pi} – kolejne wartości napięcia przebicia,

d – średnia grubość próbki.

Lp.	Nazwa materiału	d _i [mm]			d _{sr} [mm]	U _{pi} [kV]					K [kV/ mm]
		1	2	3		1	2	3	4	5	
1											
2											
3											

5. Wyznaczanie rezystywności materiałów elektroizolacyjnych

1. Zachowanie dielektryka w polu elektrycznym

Materiałami elektroizolacyjnymi, czyli dielektrykami są materiały praktycznie nie zawierające swobodnych ładunków. Brak swobodnych ładunków powoduje, że stawiają one bardzo wysoki opór przepływowi prądu elektrycznego. Z pośród tej grupy materiałów największe zastosowanie mają dielektryki stałe.

Na zachowanie się dielektryka w polu elektrycznym wpływają trzy główne czynniki:

- polaryzacja,
- przewodność,
- jonizacja.

Polaryzacja jest to zjawisko zależne od budowy dielektryka. Rozróżniamy budowę polarną (dipolową) i niepolarną. Polaryzacja dielektryka jest wypadkową polaryzacji poszczególnych elementów struktury dielektryka takich jak atomy, jony, cząsteczki. Dla dielektryków niepolarnych ich polaryzacja polega na powstaniu nietrwałych, indukowanych dipoli z poszczególnych atomów. Po usunięciu pola elektrycznego następuje szybki zanik polaryzacji. Dielektryki polarne charakteryzują się posiadaniem trwałych dipoli, które istnieją niezależnie od dipoli indukowanych polem. Pod wpływem pola elektrycznego następuje uporządkowanie przestrzenne dipoli trwałych i trwa dłużej po usunięciu pola. Polaryzacja powoduje, więc większe straty energii na skutek utrzymywania się uporządkowania dipoli.

Przenikalność elektryczna względna ϵ jest miarą polaryzacji

dielektryka i zdefiniowana jest jako stosunek pojemności kondensatora o określonych wymiarach z danym dielektrykiem, do pojemności kondensatora o identycznych wymiarach ale wypełnionego próżnią.

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_0}$$

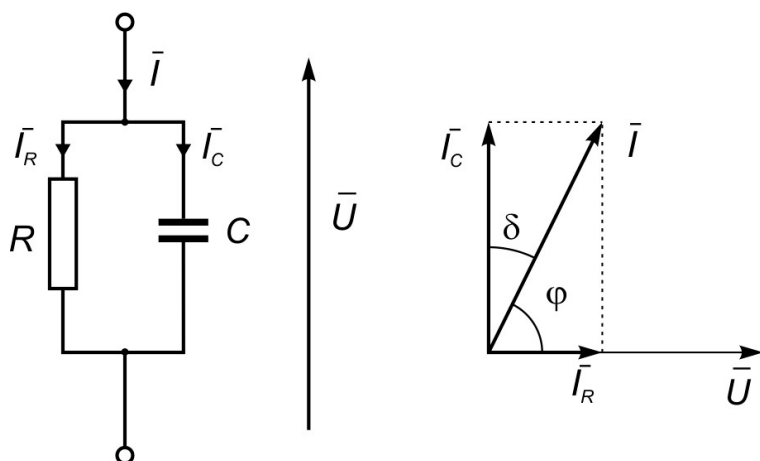
C_d – pojemność kondensatora wypełnionego danym dielektrykiem,

C_0 – pojemność kondensatora wypełnionego próżnią.

Zjawisku polaryzacji towarzyszą straty energii, związane z pokonywaniem oporów przy zmianie położenia dipoli. W przypadku dielektryków niepolarnych straty mają znaczenie przy wyższych częstotliwościach. Dla dielektryków polarnych straty te mogą osiągnąć znaczne wartości już przy częstotliwościach sieciowych.

Kąt δ jest miarą strat mocy w dielektryku przy napięciu sinusoidalnie zmiennym. Stąd często nazywa się go kątem stratności. Na wykresie wektorowym prądu płynącego w dielektryku kąt ten jest zawarty pomiędzy wektorem prądu i jego składową bierną. W praktyce posługujemy się **$\tan \delta$** jako współczynnikiem stratności dielektrycznej. Jest on zależny od temperatury, częstotliwości oraz napięcia przyłożonego, gdy jego wartość zbliżona jest do napięcia jonizacji. Rysunek 1 przedstawia schemat zastępczy dielektryka rzeczywistego oraz wykres wektorowy prądów w takim dielektryku.

W rzeczywistości żaden dielektryk nie jest pozbawiony jakichkolwiek ładunków gdyż występują w nim jony pochodzące z zanieczyszczeń i defektów budowy oraz oddziaływania wody, związków chemicznych, promieniowania UV i promieniowania γ . Wobec istnienia takich ładunków po umieszczeniu dielektryka w polu elektrycznym ustala się w nim uporządkowany ruch ładunków noszący nazwę prądu upływu. Dla dielektryków stałych składa się on z prądu skrośnego płynącego przez dielektryk oraz prądu powierzchniowego płynącego po cienkiej warstwie powierzchni dielektryka.



Schemat zastępczy dielektryka rzeczywistego i jego wykres wektorowy

2. Rezystywność skośna i powierzchniowa

W związku ze zjawiskami prądu upływu i jego podziału na powierzchniowy i skośny możemy zdefiniować dwa parametry określające stan dielektryka i jego przydatność do celów technicznych.

Rezystywność skośna ρ_v – jest to stosunek napięcia stałego przyłożonego do elektrod, do wartości ustalonej natężenia prądu płynącego między elektrodami na skroś próbki, z wyłączeniem tej części prądu, która płynie po powierzchni próbki, odniesiony do 1 m² powierzchni elektrody pomiarowej i 1 m grubości próbki. Wyraża się w jednostkach

$$\left[\frac{\Omega \cdot m^2}{m} \right] \text{ lub } [\Omega]$$

Rezystywność powierzchniowa ρ_s – jest to stosunek napięcia stałego przyłożonego do elektrod, do wartości ustalonej natężenia prądu płynącego przez warstwę zaadsorbowanej na powierzchni próbki wilgoci, zanieczyszczeń i sadzy, odniesiony do 1 m długości

elektrod i do 1 m odległości między elektrodami. Wyraża się w jednostkach

$$\left[\frac{\Omega \cdot m}{m} \right] \text{ lub } [\Omega \cdot m]$$

Dla dielektryków gazowych i ciekłych określa się tylko rezystancję skrośną!

Rezystywność skrośna zależy głównie od rodzaju cząsteczek wchodzących w skład dielektryka, ilości jego defektów struktury oraz zanieczyszczeń. Najwyższe wartości rezystywności skrośnej wykazują dielektryki niepolarne. Ze wzrostem temperatury rezystywność skrośna maleje.

Rezystywność powierzchniowa zależy głównie od stanu powierzchni dielektryka i obecnych na niej zanieczyszczeń, a zwłaszcza wilgoci. Największe wartości rezystywności skrośnej wykazują dielektryki niepolarne o własnościach hydrofobowych.

Cechy niektórych dielektryków podano w tabeli poniżej.

Materiał	Gęstość [g/cm³]	
Mika krystaliczna	2,6-3,5	
Mikanity	1,2-2,6	
Mikoleksy	2,6-3,9	
Samika	1,2-2,5	
Porcelana	2,3-2,5	
Stestyt	2,6-2,9	
Ceramika alundowa	3,6-3,9	
Szkło wapniowo – sodowe	2,45	
Szkło borowo – krzemianowe	2,2-2,3	
Szkło kwarcowe	2,18	
Polietylen	0,92-0,96	
Polipropylen	0,90-0,91	
Polistyren	1,0-1,1	
PCV	1,25-1,40	
Teflon	2,1-2,3	

Kauczuk naturalny	0,9-1,2	
Kauczuk syntetyczny	0,9-1,2	
Żywica fenolo-formaldehydowa	1,25-1,40	
Żywica epoksydowa	1,1-1,9	
Żywica poliuretanowa	1,15-1,22	
Żywica Silikonowa	1,6-2,0	
Papier kablowy	0,8-1,1	
Asfalt ponaftowy	1,0-1,5	

3. Pomiar rezystywności skrośnej i powierzchniowej

W celu wyznaczenia rezystywności dielektryka, próbkę umieszcza się w odpowiednim układzie elektrod i przykładając napięcie stałe o określonej wartości. Mierzy się cały prąd lub jego składowe: powierzchniową i skrośną. Mierzymy więc rezystancję skrośną lub powierzchniową, a potem przeliczamy ją na wartości rezystywności.

Wielkościami mierzonymi są:

- grubość próbki d [mm],
- średnica elektrody pomiarowej D [mm],
- odstęp pomiędzy elektrodą ochronną i pomiarową t [mm],
- natężenie prądu I [A],
- napięcie przyłożone do elektrod U [V],

Zamiast wielkości U i I można mierzyć bezpośrednio R_r [Ω].

Wielkościami obliczanymi są:

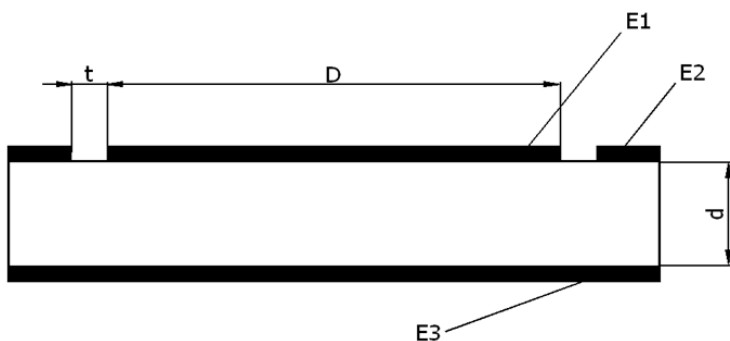
- rezystywność skrośna ρ_v [$\Omega \cdot m$]

$$\rho_v = \frac{\pi \cdot (D + t)^2}{4d} \cdot R_V,$$

- rezystywność powierzchniowa ρ_s [Ω]

$$\rho_s = \frac{\pi \cdot (D + t)}{t} \cdot R_S.$$

Do pomiarów wykorzystujemy teraomierz umożliwiający pomiar rezystancji w zakresie 10^8 - 10^{18} [Ω]. Pomiary wykonujemy dla napięć 250 V lub 500 V. Do zacisków teraomierza przyłącza się układ elektrod z próbką w środku, zgodnie z rysunkiem. Przy pomiarze rezystancji skośnej elektroda ochronna eliminuje wpływ rezystancji powierzchniowej, a przy pomiarze rezystancji powierzchniowej wpływ rezystancji skośnej. Dodatkowo spełnia ona rolę ekranu dla elektrody pomiarowej od pól obcych. Rysunek przedstawia układ elektrod do pomiaru rezystancji próbek.



Układ do pomiaru rezystancji skośnej:

E1 – elektroda pomiarowa (krążek),
E2 – elektroda ochronna (pierścień),
E3 – elektroda napięciowa (krążek).

Układ do pomiaru rezystancji powierzchniowej:

E1 – elektroda pomiarowa (krążek),
E2 – elektroda napięciowa (pierścień),
E3 – elektroda ochronna (krążek).

Wymiary elektrod muszą spełniać następujące wymagania:

- Średnica **D** musi być wartością z szeregu (10, 25, 50, 100) mm przy warunku **$D > 4d$** ,
- Szerokość szczeliny **t** zawiera się w granicach **$0,2 \text{ mm} < t < 2d$** ,
- Szerokość elektrody ochronnej powinna wynosić co najmniej 10 mm,
- Szerokość elektrody napięciowej nie może być mniejsza od zewnętrznej średnicy elektrody ochronnej.

Zasadniczo elektrody wykonuje się metodą nanoszenia warstwy metalu lub przez naklejanie folii na powierzchnię próbki. Do takich elektrod doprowadza się napięcie za pomocą elektrod mosiężnych. Elektrody mosiężne można stosować bezpośrednio tylko dla próbek w postaci arkuszy elastycznych. W naszym ćwiczeniu korzystamy z elektrod mosiężnych. Dodatkowo dla próbek laminatów stosuje się elektrody kołkowe, które wciska się w otwory wywiercone w próbce. Ze względu na ramy czasowe ćwiczenia ograniczamy się do badań za pomocą elektrod sztywnych wykonanych z mosiądzu, zamkniętych w metalowej obudowie ochronnej. Obudowa ta jest uziemiona i wyposażona w automatyczną blokadę napięcia oraz automatyczny uziemiacz. Oba te przyrządy są sprzężone mechanicznie z wiekiem obudowy. Otwarcie powoduje odłączenie napięcia pomiarowego oraz uziemienie zacisku napięciowego.

4. Próbki

W laboratorium przeprowadzamy pomiar porównawczy rezystancji danego materiału i dlatego badamy po jednej próbce każdego materiału. Próbki mają kształt okrągły lub kwadratowy o wymiarach (średnica lub długość boku) 50 mm, 150 mm i grubości poniżej 10 mm. Próbki są umieszczone w specjalnym segregatorze według numerów i związanych z nimi nazw własnych. Ponadto bada się dwie próbki nieznane celem ustalenia rodzaju materiału, z jakiego je wykonano.

5. Wykonanie pomiarów

Po wyjściu próbki z segregatora należy zmierzyć jej grubość za

pomocą mikrometru. Następnie umieścić w układzie elektrod, zamknąć metalową obudowę układu pomiarowego i załączyć teraomierz. Podać napięcie pomiarowe i uruchomić pomiar. Dokładny sposób posługiwania się teraomierzem wyjaśnia prowadzący w zależności od typu przyrządu użytego do badań. Po dokonaniu pomiaru należy wyłączyć napięcie pomiarowe i otworzyć metalową obudowę. Dokonać zmiany próbki na inną. Po dokonaniu serii pomiarów dla rezystancji skrośnej należy zmienić układ elektrod i przystąpić do pomiaru rezystancji powierzchniowej. Pomiary wykonujemy dla wszystkich próbek z segregatora Po zakończeniu pomiarów należy przy pomocy suwmiarki zmierzyć wszystkie elektrody. Wyniki pomiarów umieszczamy w tabeli.

Tabela pomiarowa przy wykonywaniu bezpośredniego pomiaru rezystancji próbek

Lp.	Nazwa materiału	R _V [Ω]	R _S [Ω]	D [mm]	d [mm]	t [mm]	ρ _v [Ω·m]	ρ _s [Ω]
1.								
2.								
3.								

Tabela pomiarowa przy wykonywaniu pośredniego pomiaru rezystancji próbek

Lp.	Nazwa materiału	U _V [V]	I _V [A]	U _S [V]	I _S [A]	D [mm]	d [mm]	t [mm]	ρ _v [Ω·m]	ρ _s [Ω]
1.										
2.										
3.										

6. Badanie twardości metali

1. Twardość jako cecha metali

Do budowy urządzeń i aparatów elektrycznych najczęściej używanym materiałem są metale, od ich parametrów zależne są więc cechy konstrukcyjne i użytkowe całego urządzenia. Jedną z podstawowych cech mechanicznych metali jest, oprócz wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie, twardość. Twardość informuje nas o odporności materiału na odkształcenie trwałe pod wpływem sił skupionych działających na małą powierzchnię materiału. W zależności od budowy krystalicznej materiału, składu chemicznego i ilości zanieczyszczeń materiały mają różną odporność na odkształcanie. Od momentu, gdy upowszechniła się produkcja przemysłowa usiłowano znaleźć związek pomiędzy składem chemicznym metali, a ich własnościami fizycznymi i elektrycznymi.

- **Bottone w 1873** roku wnioskuje, że twardość ciał prostych jest odwrotnie proporcjonalna do objętości atomowej,
- **Barus w 1879** roku wnioskuje, że opór elektryczny stali wzrasta wraz z ich twardością,
- **Benedicks w 1901** roku ustala ścisły związek między budową stopów, a ich twardością. Związek ten jest natury ogólnej i mówi, że twardość czystych metali wzrasta przy rozpuszczaniu w nich nawet niewielkich ilości innych pierwiastków. Im bardziej nasycony roztwór tym większa twardość.
- **Kurnakow w 1908** roku wnioskuje, że roztwory stałe powiększają twardość stopów i podnoszą opór elektryczny materiału.

Metody badania twardości możemy podzielić ze względu na sposób działania obciążenia na statyczne i dynamiczne. W metodach statycznych obciążenie wzrasta powoli od zera do wartości ustalonej, a w metodach dynamicznych jest wywoływane energią

kinetyczną wgłębnika – następuje jego uderzenie w badany materiał. W ćwiczeniu będziemy badali twardość metali metodą statyczną.

Pomiar twardości opiera się na fakcie, że materiały twardsze pod wpływem siły pozostawiają odcisk w materiałach bardziej miękkich. Na zasadzie tej oparto prawie wszystkie używane do tej pory skale określania twardości. Próba twardości materiału jest próbą bardzo rozpowszechnioną z kilku przyczyn:

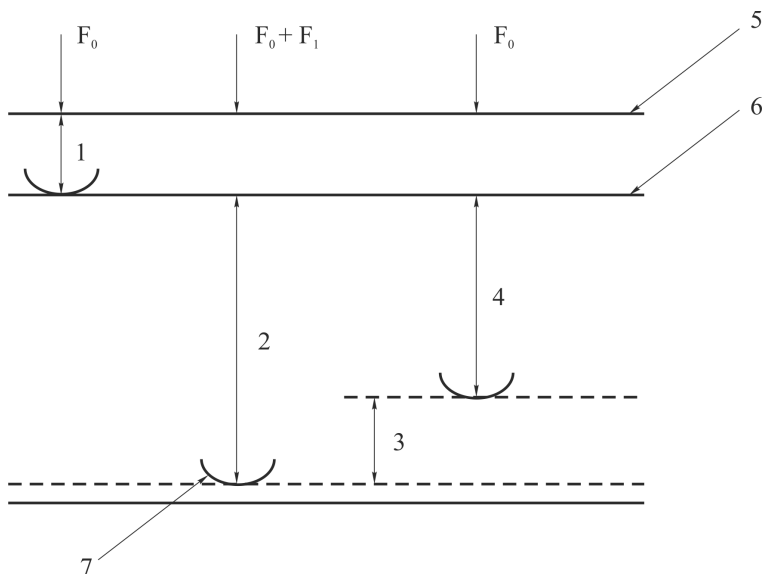
- łatwo określić związek między twardością, a cechami użytkowymi materiału,
- pomiar jest szybki i odbywa się na niewielkiej przestrzeni materiału,
- nie występuje niszczenie materiału podczas badania,
- można oznaczać nawet cienkie warstwy materiału,
- przyrządy do badania twardości można łatwo przemieszczać.

Pomiary twardości zdefiniowano w normie PN-EN ISO 6508-1, która jest odpowiednikiem normy ISO 6508-1:1999. Określa zasady, metody i skale do pomiaru twardości. Należy zwrócić uwagę, że stosowanie jako wgłębnika stożka diamentowego zapewnia dokonanie pomiaru przy bardzo dużej twardości materiału. Diament jako odmiana węgla ma na skutek swojej struktury krystalicznej największą znaną nam twardość. Dodatkowo dla materiałów miękkich w metodzie Rockwella przewidziano zastosowanie jako wgłębnika kulki stalowej o średnicy 1,5875 mm. Przy pomiarze za pomocą kulki pracujemy na skali HRB, a przy pomiarze za pomocą stożka diamentowego na skali HRC. Kwestie zastosowania poszczególnych wgłębników i skal twardości przedstawiono w dalszej części instrukcji za pomocą tabeli.

2. Twardość wg metody Rockwella

W naszym ćwiczeniu do określania twardości różnych metali będziemy posługiwać się metodą Rockwella. Zasada pomiaru twardości metodą Rockwella opiera się na wciskaniu wgłębnika w powierzchnię próbki dwustopniowo. Najpierw siłą wstępną F_0 , która usuwa naprężenia sprężyste z mocowania wgłębnika oraz

samej próbki, a potem siłą zasadniczą F_0+F_1 powodującą trwałe odkształcenie w próbce. Mierzymy trwały przyrost głębokości h pod wpływem określonej siły. Na rysunku przedstawiono schematycznie zasadę pomiaru twardości tą metodą.



1 – Głębokość odcisku pod wpływem siły obciążającej F_0 ,

2 – Głębokość odcisku pod wpływem siły obciążającej $F_0 + F_1$,

3 – Sprężysty powrót po usunięciu głównej siły obciążającej F_1 ,

4 – Trwały przyrost głębokości odcisku h ,

5 – Powierzchnia próbki,

6 – Płaszczyzna odniesienia,

7 – Powierzchnia wgłębnika.

Do badania twardości metodą Rockwella stosujemy przyrząd zwany twardościomierzem Rockwella, który zapewnia otrzymanie odpowiednich sił w odpowiednim czasie, zgodnych z wymogami normy oraz wgłębnika diamentowego o kącie rozwarcia 120° i promieniu krzywizny 0,2 mm, lub wgłębnika kulowego wykonanego ze stali lub węglików spiekanych o średnicy 1,5875 mm

lub 3,175 mm. W tabeli zestawiono używane symbole twardości, wgłębniki i siły wymagane przez normę przy badaniu twardości metali. Przy badaniu twardości materiałów cienkich i twardości powierzchniowych stosujemy inne przyrządy i skale przewidziane w normie. Twardość oznaczamy symbolem H (ang. – Hard) oraz literą R (od metody Rockwella) i trzecią literą identyfikującą zastosowaną skalę A–K.

Skala	Symbol	Rodzaj wgłębnika	Siła obciążenia wstępnego F_0 [N]	Siła obciążenia głównego F_1 [N]	Siła obciążenia całkowitego F [N]	Zakres stosowności
A	HRA	Stożek diamentowy	98,07	490,3	588,4	20HRA – 88HRA
B	HRB	Kulka 1,5875 mm		882,6	980,7	20HRB – 100HRB
C	HRC	Stożek diamentowy		1373	1471	20HRC – 70HRC
D	HRD	Stożek diamentowy		882,6	980,7	40HRD – 77HRD
E	HRE	Kulka 3,175 mm		882,6	980,7	70HRE – 100HRE
F	HRF	Kulka 1,5875 mm		490,3	588,4	60HRF – 100HRE
G	HRG	Kulka 1,5875 mm		1373	1471	30HRG – 94HRG
H	HRH	Kulka 3,175 mm		490,3	588,4	80HRH – 100HRH
K	HRK	Kulka 3,175 mm		1373	1471	40HRK – 100HRK

Określenie twardości następuje przez co najmniej pięciokrotny pomiar danej próbki oraz dodanie poprawek ze względu na promień badanej próbki.

3. Przygotowanie próbki

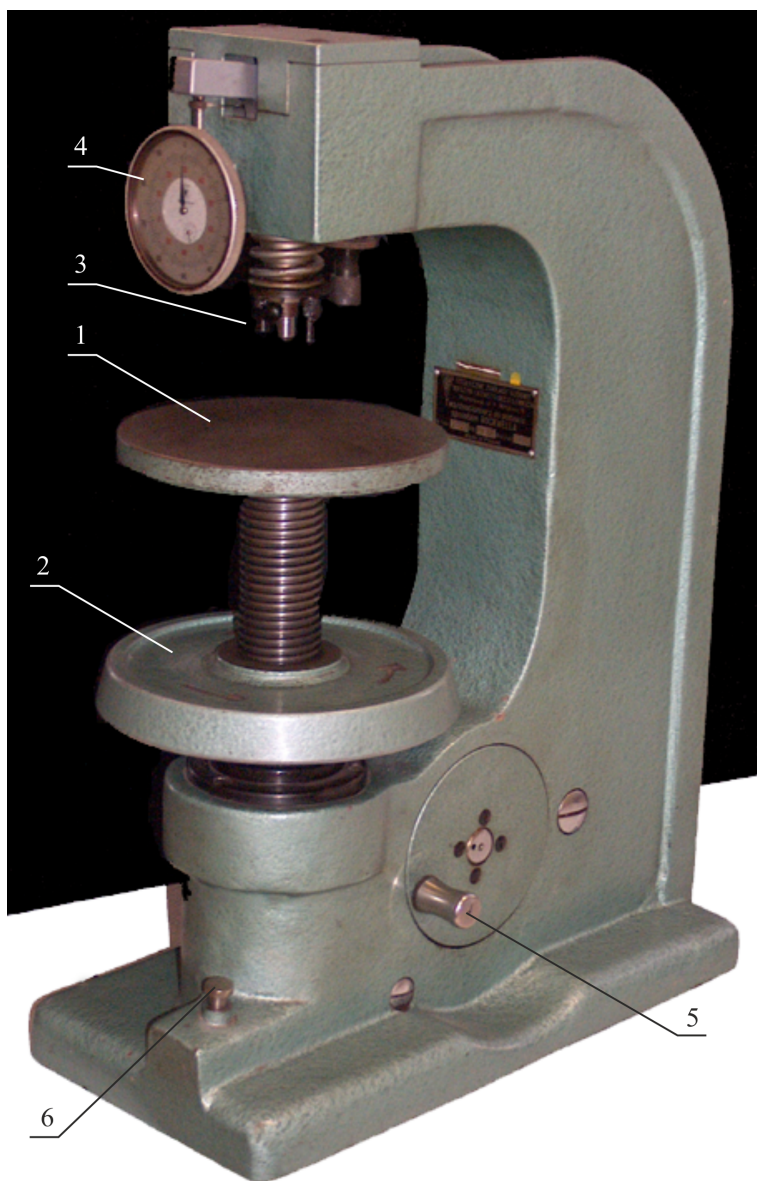
Badane próbki powinny spełniać następujące warunki:

- być gładkie pozbawione warstwy tlenków farb i bez śladów po

spawaniu,

- być wybrane z materiału bez zmian twardości powierzchniowej od obróbki na zimno i nagrzewania,
- być płaskie i gładkie, aby zminimalizować wpływ nierówności na pomiar,
- być grube na tyle, aby odcisk nie był widoczny na przeciwnej stronie próbki,
- minimalna grubość próbki musi być 10x większa od trwałego przyrostu głębokości h dla wgłębnika stożkowego i 15x większa niż h dla wgłębnika kulowego,
- do pomiaru próbek o powierzchni sferycznej lub cylindrycznej należy stosować poprawki według tabeli,
- pomiary wykonujemy w temperaturze $10 \div 35^{\circ}\text{C}$,
- próbka musi być umieszczona na sztywnym podłożu i podparta tak, aby uniemożliwić jej przesuwanie,
- powierzchnia badana musi być prostopadła do osi wgłębnika i działania siły obciążającej.
- przy badaniu próbek o kształcie cylindrycznym konieczne jest stosownie podstawki unieruchamiającej próbkę.

Odpowiednio przygotowane próbki do badań posiadają kształt płaskich krążków bądź prostokątów. Na próbkach znajdują się ślady po poprzednich pomiarach i ustawiając próbkę należy uważać, aby usytuować wgłębnik w obszarze gdzie nie ma poprzednich odcisków. Jeżeli z powodu zbyt dużej liczby odcisków pomiar jest niemożliwy należy odwrócić próbkę i zacząć pomiary po drugiej stronie próbki. Twardość wyrażamy w stopniach Rockwella.



Widok ogólny twardościomierza; 1 – stolik pomiarowy, 2 – śruba dociskowa, 3 – węgłbnik pomiarowy, 4 – wskaźnik odczytowy, 5 – korba naciągu sprężyny, 6 – przycisk pomiarowy

Przy pomiarach postępujemy w następujący sposób:

1. Za pomocą korby naciągamy sprężynę twardościomierza.
2. Umieszczamy badaną próbkę na stoliku pomiarowym twardościomierza.
3. Pokręcając śrubą dociskową w kierunku odwrotnym od wskazywanego przez strzałki doprowadzamy do styku wgłębnika z badaną próbką.
4. Zwiększamy docisk za pomocą śruby aż do momentu, gdy na wskaźniku pomiarowym mała wskazówka znajdować się będzie na czerwonym polu, a duża będzie wskazywać zero.
5. Naciskamy przycisk pomiarowy. Następuje zwolnienie sprężyny.
6. Po zatrzymaniu korby sprężyny należy ponownie ją naciągnąć, a ze skali odczytać twardość.
7. Przy pomiarach za pomocą wgłębnika diamentowego odczytujemy wskazania ze skali czarnej, a przy wgłębniku kulkowym ze skali czerwonej.
8. Po badaniu należy próbkę odsunąć od wgłębnika kręcąc śrubą w kierunku strzałek.
9. Wyniki pomiarów notujemy w tabeli.
10. Jeżeli twardość mierzona przy pomocy wgłębnika diamentowego jest mniejsza niż 20 HRC należy przejść na pomiary wgłębnikiem kulkowym.

Przy podawaniu twardości dla powierzchni zakrzywionych należy stosować poprawki wg tabeli.

Dla wgłębnika typu stożek diamentowy, skale Rockwella A; C; D

Twardość Rockwella	Promień krzywizny [mm]								
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5	16	19
20				2,5	2	1,5	1,5	1	1
25			3	2,5	2	1,5	1	1	1
30			2,5	2	1,5	1,5	1	1	0,5
35		3	2	1,5	1,5	1	1	0,5	0,5
40		2,5	2	1,5	1	1	1	0,5	0,5
45	3	2	1,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5
50	2,5	2	1,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
55	2	1,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
60	1,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
65	1,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
70	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
75	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
80	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0
85	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
90	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0

Poprawki większe niż 3 HRA; HRC; HRD są niedopuszczalne!

Dla wgłębnika typu kulowego $f = 1,5875 \text{ mm}$, skale Rockwella B; F;
G

Twardość Rockwella	Promień krzywizny [mm]						
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5
20				4,5	4	3,5	3
30			5	4,5	3,5	3	2,5
40			4,5	4	3	2,5	2,5
50			4	3,5	3	2,5	2
60		5	3,5	3	2,5	2	2
70		4	3	2,5	2	2	1,5
80	5	3,5	2,5	2	1,5	1,5	1,5
90	4	3	2	1,5	1,5	1,5	1
100	3,5	2,5	1,5	1,5	1	1	0,5

Poprawki większe niż 5 HRB; HRF; HRG są niedopuszczalne!

Dodanie poprawki polega na tym, że gdy badana powierzchnia ma określony promień krzywizny powierzchni do uśrednionego wyniku uzyskanego w wyniku serii pięciu pomiarów dodajemy odpowiednio określoną liczbę stopni Rockwella. Podając wartość twardości należy uwzględnić dopuszczalny błąd pomiaru, błędy te są określone przez normę a ich wartości podaje tabela. Prawidłowo podana twardość to np. (25 ± 2) HRC.

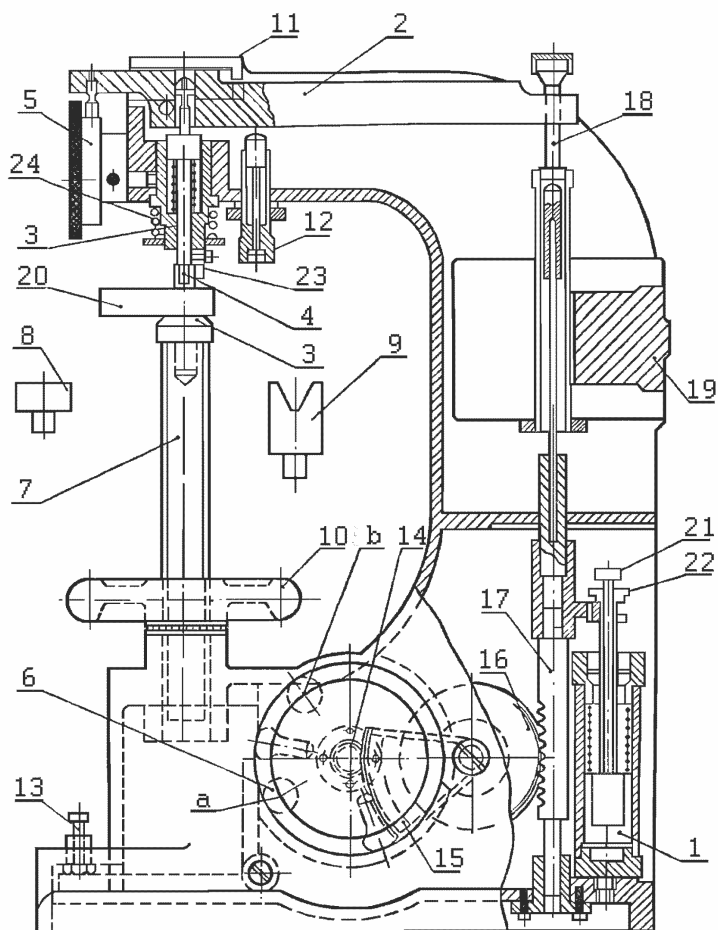
Skala twardości Rockwella	Zakres wzorców	Dopuszczalny błąd	Dopuszczalna powtarzalność
A	20 HRA do $\leq$ 75 HRA > 75 HRA do $\leq$ 88 HRA	$\pm$ 2 HRA $\pm$ 1,5 HRA	$\leq 0,02(100-H)^{(a)}$ lub 0,8 jednostki HRA
B	20 HRB do $\leq$ 45 HRB 45 HRB do $\leq$ 80 HRB > 80 HRB do $\leq$ 100 HRB	$\pm$ 4 HRB $\pm$ 3 HRB $\pm$ 2 HRB	$\leq 0,04(100-H)$ lub 1,2 jednostki HRA
C	20 HRC do $\leq$ 70 HRC	$\pm$ 1,5 HRC	$\leq 0,02(100-H)$ lub 0,8 jednostki HRA
D	40 HRD do $\leq$ 70 HRD > 70 HRD do $\leq$ 77 HRD	$\pm$ 2 HRD $\pm$ 1,5 HRD	$\leq 0,04(100-H)$ lub 1,2 jednostki HRA
E	70 HRE do $\leq$ 90 HRE > 90 HRE do $\leq$ 100 HRE	$\pm$ 2,5 HRE $\pm$ 2 HRE	$\leq 0,04(100-H)$ lub 1,2 jednostki HRA
F	80 HRF do $\leq$ 90 HRF > 90 HRF do $\leq$ 100 HRF	$\pm$ 3 HRF $\pm$ 2 HRF	$\leq 0,04(100-H)$ lub 1,2 jednostki HRA
(a) – zawsze należy wybrać wartość większą			
H – średnia twardość Rockwella z minimum pięciu pomiarów			

4. Opracowanie wyników

Otrzymane wyniki twardości należy zanotować w tabeli, a następnie wyliczyć średnią twardość dla danego materiału. Pomiar walca zanotować dla przynajmniej trzech stref o różnej twardości. Następnie należy oznaczyć błąd pomiaru oraz jego powtarzalność. Dla próbek o nieznanach nazwach należy przy pomocy literatury spróbować ustalić rodzaj materiału, z którego zostały wykonane. Poniżej przedstawiono przykładową tabelę pomiarową.

Lp.	Rodzaj materiału	Skala twardości	Twardość	Średnia twardość	Błąd pomiaru	Powtarzalność
1.						
2.						

Rysunek poniżej przedstawia budowę wewnętrzną przykładowego twardościomierza Rockwella.



-
- | | | |
|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 1. Tłumik olejowy | 9. Stolik | 17. Zębatka z |
| 2. Dźwignia | przedmiotowy | trzcieniem |
| 3. Trzpień mierniczy | 10. Kółko | 18. Wieszak z szalką |
| 4. Wgłębnik | 11. Płyta górna | 19. Obciążnik |
| 5. Czujnik | 12. Śruba oporowa | 20. Przedmiot badany |
| 6. Korbka | 13. Zwalniacz | 21. Śruba regulacyjna |
| 7. Śruba podnośna | 14. Koło zębate | 22. Nakrętka |
| 8. Stolik | 15. Segment zębaty | 23. Urządzenie |
| przedmiotowy | 16. Segment zębaty | dociskowe |
| | | 24. Sprężyna |
-

7. Wyznaczanie rezystywności materiałów oporowych i temperaturowego współczynnika rezystancji

1. Wprowadzenie

Materiały stykowe są specyficznym rodzajem materiałów przewodzących, oprócz dobrych własności elektrycznych muszą także wykazywać dobre własności mechaniczne i termiczne. W materiałach tych przewodnictwo ma charakter czysto elektronowy i wyraża się zależnością:

$$\gamma = n \cdot e \cdot k \left[\frac{S}{m} \right] = \left[\frac{1}{\Omega m} \right],$$

gdzie:

n – koncentracja elektronów w materiale [m^{-3}],

e – ładunek elektronów [C],

k – ruchliwość elektronów w materiale $\left[\frac{m^2}{Vs} \right]$.

Do materiałów przewodzących należą metale i ich stopy. Wartość przewodności tych materiałów jest uzależniona od kilku czynników, a mianowicie:

- rodzaju materiału i jego budowy,
- czystości materiału, czyli zawartości obcych domieszek,
- obróbki mechanicznej na zimno,
- temperatury.

We wzorze (1) zależnie od rodzaju materiału (przyczyna a), i w pewnym stopniu na skutek obecności domieszek (przyczyna b) zmienia się koncentracja elektronów (n), zarówno domieszki (przyczyna b), obróbka mechaniczna na zimno (przyczyna c) i wzrost

temperatury (przyczyna d) wpływają na zmniejszenie ruchliwości elektronów (k), czyli na uzyskiwaną skierowaną prędkość przemieszczania się elektronów, przypadającą na 1 kV przyłożonego napięcia. W sumie obecność domieszek, obróbka na zimno i wzrost temperatury powodują pogorszenie konduktywności materiału.

STE (siła termoelektryczna) jest to różnica potencjałów powstająca na styku dwóch różnych przewodników metalicznych pod wpływem różnicy między temperaturą złącza a temperaturą wolnych końców tych przewodników. Najczęściej mierzona jest względem platyny (złącze metal-platyna) i podawana w mV/°C lub mV/K.

2. Podział i charakterystyka ogólna

W przeciwieństwie do materiałów przewodowych materiały oporowe powinny odznaczać się dużą rezystywnością. Warunek ten najlepiej spełniają stopy różnych metali, największe wartości rezystywności uzyskujemy dla stopów jednorodnych. Ze względu na późniejsze zastosowanie materiały oporowe możemy podzielić na:

- pomiarowe,
- regulacyjne,
- grzejne.

Wymagania dla materiałów oporowych możemy scharakteryzować własnościami elektrycznymi, termicznymi, mechanicznymi i chemicznymi.

- **Własności elektryczne** to duża rezystywność ρ , mała wartość współczynnika temperaturowego α , duża obciążalność prądowa, mała wartość siły termoelektrycznej STE.
- **Własności termiczne** to mała wydłużalność termiczna, wysoka temperatura długotrwałej pracy, możliwość lutowania.
- **Własności mechaniczne** to wysoka wytrzymałość na zrywanie i podatność na obróbkę skrawaniem.
- **Własności chemiczne** to odporność na utlenianie i długi czas pracy.

W zależności od zastosowania jedno z tych cech będzie ważniejsze lub drugorzędne. Od materiałów na oporniki pomiarowe wymaga się dużej rezystywności, małej wartości α i małej wartości STE i niezmienności tych parametrów w czasie. Materiały na oporniki regulacyjne muszą być tanie w produkcji, a materiały na oporniki grzejne muszą się odznaczać wysoką temperaturą pracy i samoczynnie pokrywać się warstwą nie odpryskujących tlenków, co zabezpiecza je przed korozją.

W tabeli poniżej zestawiono parametry niektórych stopów oporowych.

Lp.	Materiał	Skład stopu	T _{max}	Rezystywność	Współczynnik α	STE
		[%]	°C	$\mu\Omega\cdot m$	1/deg	$\mu V/deg$
1	Manganin	Cu – 86 Mn – 12 Ni – 2	250	0,46	$30\cdot 10^{-6}$	1
2	Izabelin	Cu – 84 Mn – 13 Al – 3	200	0,50	$20\cdot 10^{-6}$	-0,2
3	Inmet	Cu – 82,5 Mn – 12,0 Al – 4,0 Fe – 1,5	300	0,50	$20\cdot 10^{-6}$	-0,3
4	Konstantan	Cu – 55 Ni – 45	400	0,48	$20\cdot 10^{-6}$	-42,6
5	Nikielina	Cu – 54 Ni – 26 Zn – 20	300	0,43	$230\cdot 10^{-6}$	–
6	Żeliwo Stopowe	Fe – 93,9 Mn – 0,8 Si – 1,7 Zn – 3,6	400	0,45	$1000\cdot 10^{-6}$	–
7	Chromonikielina beżżelazowa	Ni – 80 Cr – 20	1150	1,10	$150\cdot 10^{-6}$	–

8	Chromonikielina żelazowa	Ni – 65 Cr – 15 Fe – 20	850	1,03	$200 \cdot 10^{-6}$	–
9	Stop KNS12	Ni – 20,0 Cr – 25,0 Fe – 52,5 Mn – 2,5	1000	0,86	–	–
10	Kanthal A1	Fe – 68,0 Cr – 24,0 Al – 5,5 Co – 1,5	1375	1,45	$32 \cdot 10^{-6}$	–
11	Baildonal 12	Fe – 67,5 Cr – 27,0 Al – 5,5	1150	1,45	$40 \cdot 10^{-6}$	–

2. Program badań

W toku ćwiczenia należy wyznaczyć rezystywność oraz wartość temperaturowego współczynnika rezystancji badanych próbek. Po wyznaczeniu wartości tych parametrów należy zidentyfikować badane próbki w oparciu o dane z instrukcji i literatury.

Rezystywność ρ – jest odwrotnością konduktywności, czyli przewodności odcinka przewodnika o jednostkowym przekroju s i jednostkowej długości l . Z pojęcia rezystywności jest wygodnie korzystać przy charakteryzowaniu materiałów oporowych.

$$\gamma = \frac{1}{\rho \cdot l} \left[\frac{S}{m} \right]$$

$$[S] = \left[\frac{1}{\Omega} \right] \text{ – Siemens}$$

$$\rho = \frac{l}{\gamma} [\Omega \cdot m]$$

Temperaturowy współczynnik rezystancji α – jest względną zmianą rezystancji danego materiału oporowego przy zmianie temperatury o 1°.

$$\alpha = \frac{R_{tw} - R_{to}}{R_{to}(t_w - t_o)} \left[\frac{1}{^{\circ}C} \right]$$

Rezystywność i współczynnik α wyznacza się na odcinku materiału oporowego, zamocowanego w uchwycie wewnątrz komory grzejnej. Pierwszy pomiar wykonuje się w temperaturze otoczenia R_{to} . Aby wyznaczyć współczynnik α oraz rezystywność próbki, kolejne pomiary przeprowadzane są w wyższych temperaturach R_{tw} .

Wielkości mierzone w ćwiczeniu to:

- R_t [Ω] – opór elektryczny zmierzony w temperaturze t ,
- temperatura t [$^{\circ}C$],
- długość i średnica próbek (podane dla każdej próbki) [m].

Lp.	Długość	Średnica
	[m]	[m]
1	12	$0,80 \cdot 10^{-3}$
2	10	$0,50 \cdot 10^{-3}$
3	2	$0,30 \cdot 10^{-3}$
4	2	$0,11 \cdot 10^{-3}$
5	10	$0,40 \cdot 10^{-3}$
6	2	$0,12 \cdot 10^{-3}$
7	2	$0,15 \cdot 10^{-3}$
8	10	$0,28 \cdot 10^{-3}$

Wielkości obliczane w ćwiczeniu to:

- $\alpha \left[\frac{1}{^{\circ}C} \right]$ – temperaturowy współczynnik rezystancji

$$\alpha = \frac{R_{tw} - R_{to}}{R_{to}(t_w - t_o)},$$

- $R_{20} [\Omega]$ – opór elektryczny odcinka l w temperaturze $20^{\circ}C$

$$R_{20} = \frac{R_{to}}{1 + \alpha(t_o - 20)} = \frac{R_{tw}}{1 + \alpha(t_w - 20)},$$

- $\rho [\Omega \cdot m]$ – rezystywność próbki

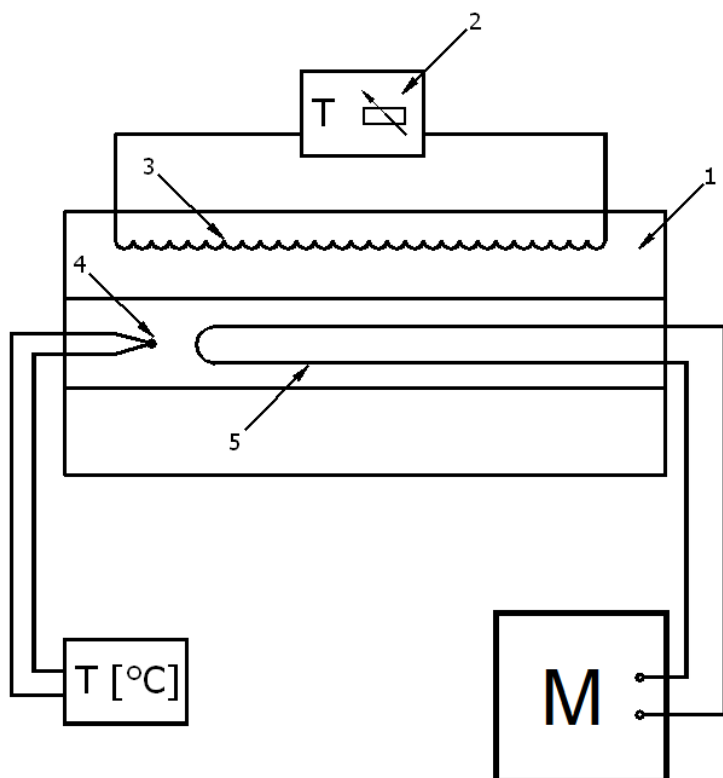
$$\rho = \frac{R_{20} \cdot s}{l}.$$

4. Aparatura

Do wykonania pomiarów wykorzystywane są następujące przyrządy:

- komora grzejna wraz z termostatem,
- termometr laboratoryjny,
- cyfrowy mostek do pomiaru rezystancji.

Schemat układu pomiarowego przedstawiono poniżej.



-
- 1 – Komora grzejna,
 - 2 – Termostat,
 - 3 – Spirala grzejna,
 - 4 – Czujnik termometru,
 - 5 – Badana próbka,
-

MW – mostek Wheatstone'a,
T – termometr cyfrowy.

5. Wykonanie i opracowanie pomiarów

Za pomocą cyfrowego mostka rezystancji mierzymy wartość rezystancji próbek w temperaturze początkowej, która jest bliska temperaturze otoczenia. Następnie należy nastawić komorę grzejącą na zadaną temperaturę i poczekać aż próbki ją osiągną. Powtórnie zmierzyć rezystancję za pomocą mostka.

Zmierzone wartości należy umieścić w tabeli pomiarowej a następnie obliczyć α , R_{20} i ρ .

Na podstawie otrzymanych wyników oraz dodatkowych obserwacji (np. wygląd próbki) należy podzielić zbadane materiały na grupy (pomiarowe, regulacyjne, grzejne). Wybór uzasadnić. Jeśli to możliwe należy określić konkretny rodzaj materiału oporowego.

Numer próbki	s	l	t ₀	R _{t0}	t _w	R _{tw}	α	R ₂₀	ρ	Rodzaj materiału
	[m ²]	m	[°C]	[Ω]	[°C]	[Ω]	[1/°C]	[Ω]	[Ω·m]	

8. Badanie własności cieplnych materiałów izolacyjnych (wielkocząsteczkowych dielektryków)

1. Charakterystyka głównych tworzyw sztucznych

Oprócz metali i ceramiki do budowy maszyn i urządzeń stosowane są tworzywa sztuczne, które w większości zastąpiły tworzywa pochodzenia naturalnego. Tworzywa te charakteryzują się lepszymi parametrami i niższą ceną. Podstawowe własności tworzyw sztucznych to:

- odporność na korozję i działanie substancji agresywnych,
- niewielki ciężar właściwy,
- niewielki moduł sprężystości,
- kruchość w niskich temperaturach,
- łatwość przetwarzania i kształtowania.

Z punktu widzenia zachowania się tych materiałów podczas przerobu i kształtowania wyróżniamy:

- **Termoplasty** – miękną w podwyższonych temperaturach i dają się łatwo kształtować, a po ochłodzeniu twardnieją i zachowują nadany kształt.
- **Duroplasty** – pod działaniem temperatury lub czynników chemicznych nieodwracalnie twardnieją i zachowują nadany kształt. Po ponownym nagrzaniu ulegają chemicznemu rozkładowi.

- **Elastomery** – mają własności zbliżone do naturalnego kauczuku, łatwo się odkształcają, a po usunięciu siły powracają do pierwotnego kształtu, dają się wulkanizować.

Termoplasty

Cechą charakterystyczną tych materiałów jest to, że ich molekuly tworzą leżące obok siebie łańcuchy. Jest to przyczyną ich zdolności do odkształcania się (lepkiego płynięcia) pod wpływem podwyższonej temperatury i twardnienia przy jej obniżaniu, w temperaturach ujemnych stają się kruche. Ich budowa nosi cechy amorficzności lub krystaliczności, obecność krystalitów podwyższa własności wytrzymałościowe i cieplne.

Polietylen (PE) – jest termoplastem o prostej budowie cząsteczkowej. Zależnie od metody polimeryzacji etylenu otrzymujemy polietylen o niskiej gęstości $\leq 925 \text{ kg/m}^3$ (LDPE), lub polietylen o dużej gęstości (940-965) kg/m^3 (HDPE). Obie odmiany mają dobre właściwości konstrukcyjne i dielektryczne. Wraz ze wzrostem gęstości polietylenu rośnie jego stopień krystaliczności a zatem twardość, wytrzymałość i moduł sprężystości. Własności te maleją wraz ze wzrostem temperatury pomiędzy 50-100 °C. Polietylen jest odporny na działanie wody, soli i roztworów kwasów i zasad, atakują go tylko stężone kwasy.

Polipropylen (PP) – jest twardy i dobrze zachowuje swój kształt, co związane jest z wysokim stopniem jego skrzystalizowania (60%), Jest odporniejszy na temperaturę niż PE, gładki i obojętny biologicznie.

Polistyren (PS) – jest tworzywem nadającym się do procesów wtryskiwania, jest odporny na działanie kwasów i zasad (za wyjątkiem kwasu azotowego). Łatwość formowania i dobre parametry mechaniczne sprawiają, że PS ma szerokie zastosowanie w przemyśle.

Polichlorek winylu (PCV) – sztywniejszy i bardziej wytrzymały (ok. 30 razy) od polietylenu. W zależności od zastosowanych zmiękczaczy i plastyfikatorów można uzyskiwać różne rodzaje tego tworzywa, od sztywnych płyt, po miękkie uszczelki przypominające

gumę. Pod działaniem światła lub ciepła PCV rozpada się wydzielając szkodliwy chlorowodór, aby temu zapobiec dodaje się do PCV stabilizatory, które trwale wiążą atomy chloru. Ze wzrostem temperatury maleje twardość PCV, materiał ten ma zastosowanie, gdy nie działają siły, w temperaturach 80-100 °C, a przy obciążeniach do 40 °C.

Poliamidy (PA) – wykazują dobrą elastyczność i odporność na ścieranie, własności te rosną wraz ze stopniem krystalizacji materiału. Są trudne w obróbce metodami wtryskowymi, mają duże zastosowanie przy wytwarzaniu części maszyn. Posiadają dobre własności elektroizolacyjne.

Poliwęglany (PW) – są tworzywami o dużej wytrzymałości w szerokim zakresie temperatur i dobrych własnościach izolacyjnych. Są odporne na starzenie i czynniki atmosferyczne. Znalazły duże zastosowanie w technice medycznej, gdyż można je sterylizować w temperaturze 120 °C. Mając dobre własności mechaniczne są wykorzystywane do budowy części maszyn.

Polimetakrylany metylu (PMM) – wykazują się dobrymi własnościami mechanicznymi, są twarde i odporne na działanie czynników atmosferycznych. Ich najcenniejszą zaletą jest przezroczystość i możliwość barwienia na różne kolory. Ich potoczna nazwa odnosi się do podobieństwa ze szkłem (PLEXI).

Poliuretan (PU) – w zależności od stopnia usieciowania mogą być sztywne lub elastyczne. Przy dodatku spieniających uzyskujemy pianki o dobrych własnościach termo i dźwiękochłonnych. Stosowane w budownictwie i przemyśle na uszczelnienia i wygłuszenia. Podczas procesu zastygania pianki płynne mogą zwiększać swą objętość nawet 11 razy.

Duroplasty

Materiały te mają molekuły usieciowane przestrzennie, co odróżnia je od termoplastów, czyni odpornymi na wzrost temperatury aż do temperatury rozkładu. Kształtuje się je przez odlewanie lub obróbkę wiórową.

Fenoplasty – powstałe na bazie żywicy fenolowo-formaldehidowej z rozróżnieniem na dwa podstawowe typy, żywice

nowolakowe oraz rezolowe. Żywice formaldehydowe utwardza się przez dodanie porcji formaldehydu, który pełni funkcje utwardzacza. Żywice krezolowe są produktem ubocznym procesu utwardzania żywic formaldehydowych. Same są termoutwardzalne, a ich cząsteczki nie są zdolne do usieciowania. Cechy podstawowe fenolpastów to duży moduł sprężystości, twardość powierzchni, duża odporność cieplna, niska palność.

Melaminy – są to produkty polikondensacji melaminy z formaldehydem. Rozkładają się w temperaturze powyżej 160 °C, są twarde i odporne na działanie rozpuszczalników organicznych. Najczęściej łączone są z wypełniaczami takimi jak papier, szkło czy tekstylia. Wyroby takie są bardzo wytrzymałe mechanicznie i dają się kształtować na wiele sposobów.

Epoksydy – otrzymujemy przez dodanie do żywicy utwardzacza. Pod wpływem tej substancji następuje przestrzenne usieciowanie i utwardzenie tych żywic. Proces przebiega na zimno lub ciepło a jego czas można regulować ilością dodawanego utwardzacza w szerokim zakresie. Żywice te można odlewać i kleić nimi różne rodzaje materiałów. Dobre własności mechaniczne daje się uzyskać poprzez nasycanie nimi tkanin szklanych.

Elastomery

Struktura wewnętrzna elastomerów przypomina swoją strukturą budowę duroplastów. Ich łańcuchy cząsteczkowe nie są silnie usieciowane, a raczej pozałamywane. Do zerwania wiązań między nimi wystarczają niewielkie siły, dalszy wzrost działającej siły powoduje wyprostowanie i uporządkowanie łańcuchów. Po odciążeniu następuje powrót do stanu wyjściowego. Moduł sprężystości e tych tworzyw jest mały, a własności elastyczne utrzymują się w dużym zakresie temperatur. Podstawowym materiałem są kauczuki syntetyczne z wypełniaczami aktywnymi, dla koloru czarnego jest to sadza, a dla jasnych krzemionka.

Kauczuk butadienowo-styrenowy przypomina najbardziej naturalny kauczuk i jest używany do wyrobu opon, kabli i węży.

Kauczuk etylenowo-propylenowy wykazuje dużą odporność na

starzenie i działanie ozonu. Jest stosowany jako materiał elektroizolacyjny.

Kauczuki silikonowe są obojętne fizjologicznie, hydrofobowe i są dobrymi izolatorami. Mają zastosowanie w medycynie, wyrobie uszczeltek i powłok izolatorów.

Lateksy – zawiesiny cząstek żywic w wodzie dają się łatwo barwić i rozcieńczać w wodzie. Pod działaniem temperatury następuje usiecianie liniowych polimerów tych żywic, co nazwane jest wulkanizacją.

Podstawowe własności niektórych tworzyw sztucznych zestawiono w tabeli w złączniku.

2. Pomiar odporności cieplnej metodą Vicata

Pomiar polega na określeniu temperatury, przy której znormalizowana stalowa igła zagłębi się w próbkę tworzywa na głębokość 1 mm, próbka podlega ogrzewaniu z określoną szybkością.

W zależności od obciążenia igły rozróżniamy dwa warianty tej metody:

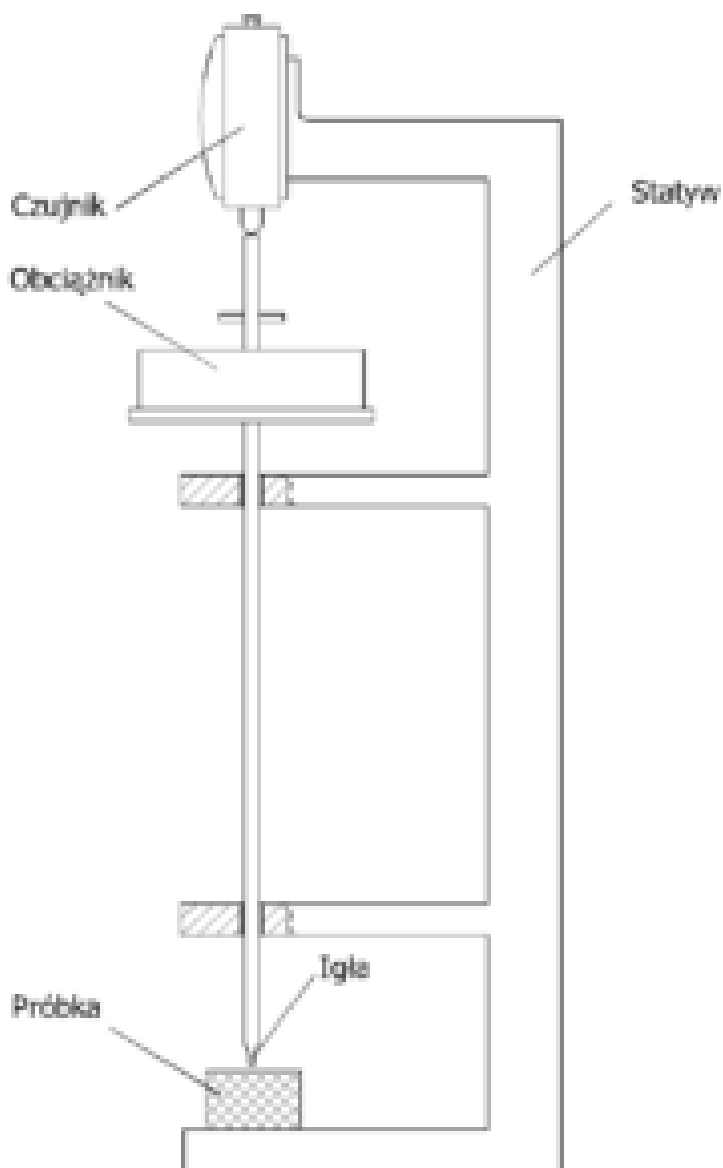
- A. 10,25 N
- B. 50,25 N

W zależności od szybkości ogrzewania próbki pomiar prowadzony jest jednym z dwóch programów:

- I. z przyrostem 60 °C/h
- II. z przyrostem 120 °C/h

Przyrząd do pomiaru odporności cieplnej został schematycznie przedstawiony na rysunku 1. Składa się on ze statywu, którego podstawa służy do ułożenia próbki, pionowego pręta z obciążnikiem zakończonym igłą i czujnika służącego do pomiaru zagłębienia. Najmniejsze zagłębienie, jakie mierzy czujnik wynosi 0,01 mm. Igła pomiarowa jest stalowym walcem o długości 3 mm i średnicy 1 mm. Jej dolna powierzchnia jest gładka i prostopadła do pionowej osi

pręta. Obciążnik jest tak dobrany, aby w zależności od wariantu A lub B dawał odpowiednie obciążenie. Ogrzewanie próbki odbywa się w komorze grzejnej wypełnionej powietrzem. Do kontroli temperatury służy termometr elektroniczny.



Rys. 1. Schemat pomiaru odporności cieplnej metodą Vicata

3. Przygotowanie próbek

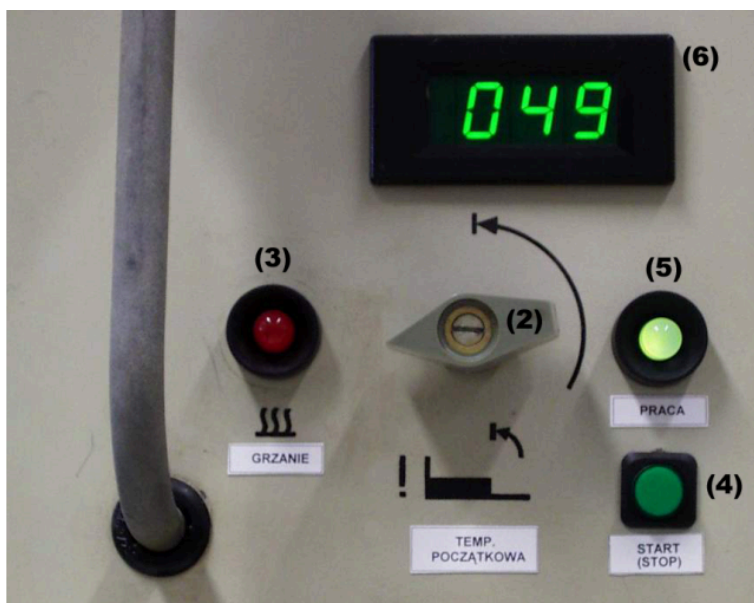
Próbki powinny mieć kształt krążków o średnicy co najmniej 10mm lub płytek prostokątnych o długości boku co najmniej 10mm. Grubość próbki powinna wynosić (3-6,5) mm, przy czym dopuszcza się nałożenie na siebie dwóch próbek o grubości minimum 1,5 mm. Próbki są wycinane z płyt lub folii, a ich powierzchnie powinny być gładkie i równoległe do siebie.

4. Wykonanie pomiarów

Próbkę badanych tworzyw umieszczamy poziomo na podstawie statywu i opuszczamy pręt tak, aby igła pewnie zetknęła się z powierzchnią próbki. Następnie należy napiąć czujnik tak, aby wskazywał 1mm. Po zamknięciu komory należy uruchomić program nagrzewania poprzez wykonanie następujących czynności:

- załączenia aparatu,
- nastawienia aparatu na grzanie, poprzez pokręcanie pokrętłem regulatora (2), aż do zaświecenia się czerwonej diody LED (3),
- wciśnięcia przycisku „START” (4) – powinna zacząć migać zielona dioda LED (5).

Temperaturę z dokładnością ± 1 °C odczytujemy z termometru cyfrowego (6) od momentu, gdy na którymkolwiek czujniku zauważymy zmianę zagłębienia. Temperaturę odczytujemy, co 0,1 mm dla każdej próbki osobno. Ze względu na ograniczenia czasowe nagrzewany po jednej próbce z trzech różnych materiałów. Poniżej na zdjęciu przedstawiono panel sterujący komory grzejnej wraz z oznaczonymi poszczególnymi elementami.



5. Opracowanie wyników

Dane należy umieścić w tabeli pomiarowej.

Lp.	Temperatura [°C]	Zagłębienie w próbce nr 1 [mm]	Zagłębienie w próbce nr 2 [mm]	Zagłębienie w próbce nr 3 [mm]

Uzyskane w wyniku badania dane należy opracować w formie wykresu przedstawiającego zagłębienie w funkcji temperatury, a następnie wyprowadzić własne wnioski.

