

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN STOWARZYSZENIA ELEKTROTECHNIKÓW POLSKICH.

WYCHODZI 1-go i 15-go KAŻDEGO MIESIĄCA.

PRZEDPŁATA:
kwartalnie zł. 6.—
Cena zeszytu 1 zł.

Biuro Redakcji i Administracji: Warszawa, Czackiego № 5 m. 24, I piętro
(Gmach Stowarzyszenia Techników), telefon № 90-23.

Administracja otwarta codziennie od g. 12 do g. 4 po poł.

- Redaktor przyjmuje we wtorki od godziny 7-ej do 8-ej wieczorem.

Konto № 363 Pocztovej Kasy Oszczędności.

CENNIK OGŁOSZEŃ:

Ogłoszenia jednoraz. na 1/1 str.	zł. 120
" " na 1/2 " "	75
" " na 1/4 " "	40
" " na 1/8 " "	20
Strona tytułowa (I) 50 proc. drożej,	
" okładki zewn. (II) 20% "	
" wewn. (III) i (IV) 20% droż.	
Ogłoszenia strony tytułowej przyjmowane są tylko całostronicowe.	
Podwyżka cennika ogłoszeń obowiązuje wszystkie już zleczone ogłoszenia od dnia zmiany cen bez uprzedniego zawiadomienia.	

Rok VII.

Warszawa, 15 października 1925 r.

Zeszyt 20.

Materiały izolacyjne.

Prof. K. Drewnowski.

(Dokończenie).

C. Materiały izolacyjne stałe. — Porcelana. — Papiery.

Materiały izolacyjne stałe stanowią przeważającą większość materiałów, używanych w elektrotechnice do izolowania części metalowych, pod napięciem, — a to dzięki własnościom mechanicznym tych materiałów. W przeciwieństwie do nich materiały izolacyjne lotne lub płynne nie mogą same wystarczyć jako izolacja, muszą być używane w połączeniu ze stałymi (np. izolatory porcelanowe i powietrzne — względem przewodów; preszpan, tektura i t. p. i olej — względem uzwojeń transformatora).

Izolatory stałe są bardzo różnorodne. Prawie każdy materiał nieprzewodzący i jako tako odporny mechanicznie i chemicznie, może być stosowany jako izolator, zwłaszcza przy urządzeniach niskiego napięcia. Należy jednak z naciskiem zaznaczyć, że bezkrytyczne stosowanie byle jakich materiałów izolacyjnych może spowodować złe skutki nie tylko dla bezpieczeństwa urządzenia, ale także i dla życia ludzkiego. W ostatnich latach przejawia się wobec tego silna dążność do uporządkowania sprawy materiałów izolacyjnych, do poznania wszechstronnego ich własności i przeznaczenia. Instytuty badawcze różnych krajów i specjalne komisje zajmują się tą sprawą usilnie tak, że dziś rozporządzamy już dużą ilością danych o różnych materiałach.

O ile ta sprawa jest względnie prosta w stosunku do materiałów izolacyjnych naturalnych, o tyle jest nader trudna, gdy chodzi o materiały sztuczne, których potworzyło się w ostatnich czasach mnóstwo pod różnymi nazwami. Zwłaszcza przy wysokim napięciu konieczne potrzebne są wiadomości o tych materiałach, gdyż tam czynnik izolacyjny wysuwa się na pierwszy plan i odgrywa bardzo poważną rolę w kosztach.

Materiały izolacyjne stałe można podzielić na trzy grupy:

naturalne, używane bez specjalnej przeróbki (marmur, asbest, mika, łupek, drzewo, kauczuk, gutaperka);

ceramiczne, otrzymywane skutkiem procesów ceramicznych (porcelana, szkło, kamionka);
sztuczne, zarówno przerabiane z różnych produktów naturalnych (papier, mikanit), jak też na podstawie procesów syntetycznych, jako sztuczne twory zastępcze (sztuczna żywica, bakelit).

W dalszym ciągu zajmiemy się tylko materiałami, mającymi zastosowanie praktyczne w technice wysokich napięć, jak porcelana, papier impregnowany, sztuczna żywica i to raczej ze strony praktycznego ich użycia, a więc wytrzymałości, aniżeli ze strony technologicznej. Przedewszystkiem trzeba jednak zapoznać się ze zjawiskami, zachodzącymi w izolatorach stałych, poddanych działaniu napięcia elektrycznego.

1. Przewodność materiałów izolacyjnych stałych.

Przechodzenie prądu przez izolator stały musi się odbywać — ze względu na jego stan skupienia — w nieco inny sposób, niż w izolatorach płynnych i gazowych, w których cząsteczki mogą odbywać ruch postępowy wraz z ładunkami elektrycznymi. Ładunki te (elektrony), związane ściśle z cząsteczkami, nie mogą pod wpływem pola elektrycznego poruszać się tak, jak w przewodnikach, lecz tylko doznają przesunięcia względem ich pierwotnego położenia w stosunku do cząsteczki. Następuje polaryzacja dielektryku, o której mówiliśmy w rozdziale, traktującym o podstawach nauki o wytrzymałości elektrycznej^{*)}. Przesunięcie dielektryczne jest proporcjonalne do natężenia pola. Jeżeli więc to natężenie przekroczy dopuszczalną dla danego materiału granicę, to musi nastąpić gwałtowne oderwanie ładunków elektrycznych od cząsteczek, czyli zmniejszenie dielektryczności dielektryku. Prąd elektryczny może już wtedy płynąć przez izolator, względnie przez utworzony w nim kanał przewodzący.

Jednak nie tylko w takim przypadku prąd może przepływać przez izolator. Jak poprzednio mówiliśmy^{**)}, nawet najlepszy izolator posiada pewną przewodność tak, że przepływa przez niego pewien minimalny zresztą, prąd, o ile pozostaje on pod napięciem. Pochodzi to prawdopodobnie stąd, że pod wpływem natężenia pola następuje pewna, choćby minimalna dysocjacja materiału; uwolnione jony to-

*) P. „Przeł. Elektr.” 1925, zes. 9 i 10.

**) l. c.

rują sobie drogę przez dielektryk. Skutkiem przepływu prądu przez ciało o dużej oporności, powstaje stosunkowo duże ogrzewanie, co powoduje tworzenie się wilgoci wewnątrz dielektryku. Pod wpływem wody następuje wzrost materiału. Wszystko to odbywa się przy stosunkowo dużym natężeniu pola. Mamy więc zjawisko i elektrolitycznego przewodzenia prądu. Wydaje się, jakoby przewodność wzrosła skutkiem ciepła, względnie skutkiem natężenia pola. Tem tłumaczy się zjawisko ujemnego współczynnika cieplnego oporności materiałów izolacyjnych. Im większe jest natężenie pola, tem wybitniej występują te zjawiska i tem bardziej prąd wzrasta. Przy potęgowaniu prądu łatwo może dojść do gwałtownego wzrostu prądu, a więc do zniszczenia izolacyjności materiału.

Taka jest teoria współczesna przebicia materiałów izolacyjnych stałych.

Poprzednio*) wskazywaliśmy, że dielektryki, złożone z kilku warstw o różnej stałej dielektrycznej i różnej przewodności, wykazują większe straty dielektryczne, niż dielektryki jednorodne. W rzeczywistości materiały izolacyjne możemy uważać jako złożone nie z jednolitego, lecz z różnych materiałów, w różny sposób zmieszanych, więcej lub mniej jednolicie. Pomiar i badania potwierdzają to i wykazują, że im bardziej czysty i jednolity jest materiał izolacyjny, tem te dodatkowe zjawiska są mniej wyraźne. Materiały izolacyjne płynne, jako mogące się łatwiej wyrównywać skutkiem dyfuzji, nie wykazują tych zjawisk.

Zwłaszcza wpływ wody higroskopijnej jest tu bardzo znaczny, wobec tego, że roztwory wodne posiadają bardzo dużą przewodność obok dużej stałej dielektrycznej wody wobec innych materiałów tak, że stosunek $\frac{\epsilon}{\gamma}$ jest dla wody bardzo mały w porównaniu z tym stosunkiem dla innych materiałów, w których się ona znajduje. Skutkiem tego materiały izolacyjne higroskopijne wykazują większe straty dielektryczne.

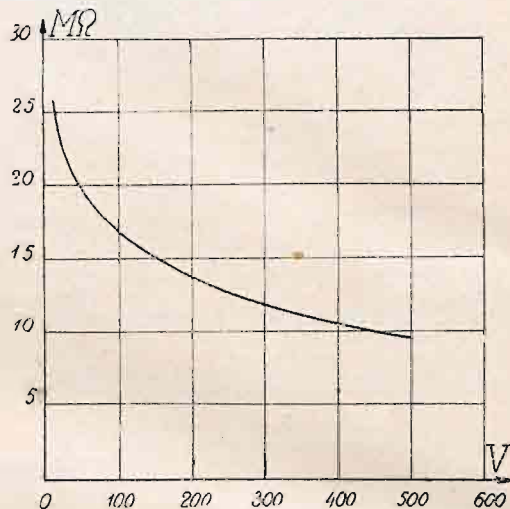
Zależność przewodności od wilgotności powietrza jest bardzo trudno ustalić, gdyż materiały higroskopijne, raz nasiąknięte wilgocią, bardzo trudno ją oddają. Natomiast stwierdzono, że ich oporność zależy od natężenia pola, a więc i od napięcia przyłożonego, a mianowicie jest odwrotnie proporcjonalna do drugiego pierwiastka z napięcia: $R_p = k \frac{1}{\sqrt{V}}$, gdzie k jest współczynnikiem proporcjonalności. (Rys. 18).

Rozdział wilgotności w izolatorze jest niejednostajny, zależy on od układu pór i włókien materiału oraz od czasu trwania naprężenia. Skutkiem tego prąd skrośny wzrasta z tym czasem, np. u materiałów włóknistych.

Pozatem stwierdzono, że przewodność materiałów izolacyjnych stałych zależy również od jonizacji obcej (radioaktywnej), która powoduje zwiększenie się przewodności. Wskazywałoby to na pokrewny sposób przewodzenia prądu przez izolator stały, jak przez płynny i gazowy.

Przewodzenie elektryczności w izolatorach stałych nie jest jeszcze tak dobrze zbadane, jak w cie-

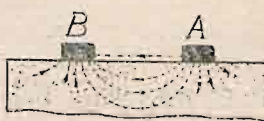
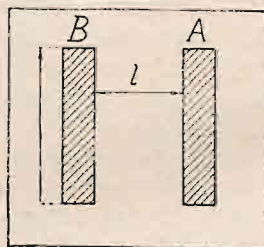
czach i gazach. Narazie stwierdzono istnienie przewodzenia metalicznego, elektrolitycznego i gazowego. Niewątpliwie wkrótce dojdziemy do jednolitej teorii przewodzenia elektryczności w ciałach.



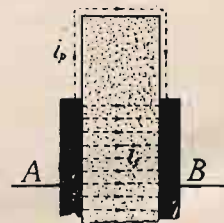
Rys. 18.

2. Przewodność powierzchniowa.

Izolator stały, wystawiony na działanie napięcia na elektrodach A B (Rys. 19), do niego przylegających, wykazuje dwojaki prąd; prąd skrośny, płynący wskroś izolatora, oraz prąd powierzchniowy — płynący po jego powierzchni. Zależnie od położenia elektrod względem siebie i względem powierzchni izolatora, płyną te prądy rozmaicie przez izolator wzgl. po jego powierzchni. Który z nich przeważa, — zależy to ponadto od czynników zewnętrznych. Naogół przy izolatorach złych i suchem powietrzu otaczającym, przeważa prąd skrośny, przy dobrych i powietrzu wilgotnym — przeważa prąd powierzchniowy.



Rys. 19.



Rys. 20.

Prąd skrośny określony jest przewodnością skrośną materiału, prąd powierzchniowy — jego przewodnością powierzchniową. Jeżeli oznaczymy przez R_p oporność powierzchniową drogi prądu od elektrody A do B, tj. o długości l i szerokości a (Rys. 20), to przyłożone napięcie V wywoła prąd i_p ; wtedy będzie:

$$\frac{V}{i_p} = R_p = \sigma \frac{l}{a},$$

gdzie σ jest opornością powierzchniową właściwą

*) l. c

$\left(\sigma = \frac{R_p a}{l}\right)$. Odwrotność tego jest przewodnością powierzchniową:

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{a}{\sigma l} = \zeta \frac{a}{l},$$

gdzie ζ jest przewodnością powierzchniową właściwą $\left(\zeta = \frac{1}{\sigma}\right)$.

Przewodność powierzchniowa nie jest wartością stałą dla materiału, — lecz zależy od wielu czynników. Przedewszystkiem ma tu wpływ napięcie, do którego jest wprost proporcjonalna — przeciwnie, niż przewodność przewodników.

Na przewodność powierzchniową ma bardzo duży wpływ wilgotność powietrza, jednak tylko u takich ciał, których powierzchnia ma własność pokrywania się warstwą wilgoci; ich przewodność może się zmieniać nawet w stosunku 1 : 10⁷. Zato inne ciała, które nie pokrywają się jednolitą warstwą wilgoci, mają przewodność powierzchniową prawie niezależną od wilgotności powietrza (materiały „tłuste”, jak parafina, lak, celluloid, bursztyn).

Również zanieczyszczenie powierzchni, zwłaszcza solami, — przez co ułatwia się osiadanie wilgoci i zgrubienie jej warstwy, — wpływa znacznie na przewodność powierzchniową. Temperatura zato ma minimalny wpływ na zmiany tej przewodności.

Przewodność, mierzona prądem zmiennym, jest naogół większa, niż przy prądzie stałym. Pochodzi to stąd, że prąd zmienny może płynąć także po niejednolitej (przerwanej) warstwie wilgoci w postaci prądów przesunięcia, co nie występuje przy prądzie stałym.

Przy pomiarze oporności izolatorów gotowych, uważać należy na to, że wtedy mierzy się równocześnie prąd płynący przez izolator i po jego powierzchni. Ten ostatni zależy bardzo od stanu powierzchni i zmienia się z wilgotnością powietrza. Wyniki pomiarów mogą być przeto różne.

U wielu materiałów izolacyjnych (przy prądzie stałym) idzie nietylko o ich wytrzymałość na przebicie, ale również o ich izolacyjność, t. j. o zdolność nieprzepuszczania prądu ani przez nie, ani po ich powierzchni. W stanie suchym mogą one izolować doskonale, natomiast wiele z nich traci te własności pod wpływem wilgoci, którą nasiakają. Wpływ ten odbija się przedewszystkiem na ich powierzchni, t. j. na przewodności powierzchniowej.

Przechodzenie prądu po powierzchni izolatora nie jest jedyną formą występujących tam wyładowań elektrycznych. Podobnie jak, obok przechodzenia prądu przez powietrze, — niewidzialnego i niesłyszalnego, występuje przy zwiększeniu napięcia wyładowanie niepełne, jarzące lub snopiaste, a potem zupełne, — tak samo i przez izolatory stałe płynie zrazu po ich powierzchni prąd niewidoczny, który może się przeobrazić w inną, wyraźniejszą formę wyładowań, — w wyładowania powierzchniowe. Mają one postać podobną do wyładowań między elektrodami w powietrzu i mogą doprowadzić do przeskoku iskry naokoło izolatora.

3. Wytrzymałość na przebicie.

Przebicie warstwy powietrza lub oleju, które jest objawem przekroczenia dopuszczalnego napięcia danego materiału, nie pozostawia po sobie trwalszych zmian w tym materiale izolacyjnym. W powietrzu tworzy się ozon, — olej spala się skutkiem przeskoku iskry i wydziela sadze; materiał izolacyjny wypełnia na nowo kanał iskrowy i całość może dalej izolować. Natomiast iskra, przebijająca izolator stały, niszczy zupełnie jego izolacyjność, podobnie jak nadmierne napięcie mechaniczne również psuje go zupełnie.

Napięcie elektryczne izolatora pochodzi od napięcia przyłożonego do elektrod, między którymi znajduje się ów dielektryk stały. W przeciwieństwie do izolatorów gazowych lub płynnych, które otaczają ściśle elektrody, izolator stały jest zwykle w postaci bryły foremnej lub nieforemnej, do której elektrody przylegają więcej lub mniej ściśle. To też pole, wytworzone przez napięcie, przyłożone do elektrod, przechodzi nie tylko przez izolator, ale też i naokoło niego, przez drugi materiał izolacyjny (np. przez powietrze, otaczające izolator stały).

To komplikuje zjawiska, zachodzące przy naprężaniu izolatorów stałych. Oprócz naprężeń na przebicie, mamy do czynienia jeszcze z napięciami dielektryku otaczającego, przez który również może nastąpić przeskoc iskry. Ponieważ izolator ma wogóle niedopuszczać do zawarcia między elektrodami, ten drugi rodzaj naprężenia odniesiony także do niego i mówić będziemy o naprężaniu izolatora na przeskoc (iskry przez powietrze).

Narazie zajmiemy się tylko naprężeniami na przebicie, wyobrażając sobie, że elektrody ściśle przylegają do dielektryku i nie wykazują rozproszenia linii pola, wzgl., że do żadnych wyładowań po powierzchni izolatora nie dojdzie.

Przy tem samym napięciu na elektrodach naprężenie dielektryku zależy od kształtu pola, a więc od kształtu elektrod. Im mniejszy promień ich krzywizny, tem większe tam — jak wiemy — naprężenie elektryczne. Warstwa dielektryku, ograniczona np. koncentrycznymi powierzchniami elektrod, będzie więcej naprężana po stronie wewnętrznej.

Przy nadmiernem naprężeniu miejscowem dielektryku mogą się zjawić wyładowania jarzące w porach, znajdujących się w materiale. O ile materiał jest podatny na działanie jonizacji lub ozonu, może się psuć w tych miejscach i tracić zdolności izolacyjne. Zjawisko to tłumaczymy sobie nierównomiernym rozdziałem napięcia w dielektryku uwarstwionym, o różnych stałych dielektrycznych (powietrze lub woda w porach). Materiały porowate, higroskopijne, mają mniejszą wytrzymałość, niż bardziej zwarte. Podobnie — materiały niejednolite, zanieczyszczone, o nierównomierniej strukturze i t. d.

Widać z tego, że wytrzymałość materiałów takich musi być niejednakowa, zależna od ich składu, struktury, wyrobu i t. p., a nadto także od wpływów zewnętrznych. Wytrzymałość ich nie jest zatem stałą materiału, raczej lepiej mówić o wytrzymałości gotowych układów izolacyjnych z takich materiałów.

Wytrzymałość układu izolowanego praktycznie określona jest wysokością napięcia, przy którym na-

stępuje jego przebicie. Ażeby zatem zrozumieć, czem uwarunkowana jest ta wytrzymałość, trzeba poznać prawa, rządzące zjawiskami, powodującymi przebicie materiału izolacyjnego stałego pod wpływem przyłożonego napięcia. Przy materiałach izolacyjnych gazowych i płynnych przypisujemy przebicie warstwy izolacyjnej przez iskrę elektryczną zjawiskom jonizacyjnym, powodującym przechodzenie przez nią prądu elektrycznego, wzrastającego stopniowo aż do formy zupełnego zwarcia. Przy izolatorach stałych — ze względu na inny stan skupienia —, zjawiska jonizacji bodźczej nie mogą występować, jak to poznaliśmy na początku tego rozdziału, tak wyraźnie, jak w tamtych. Muszą tu wchodzić w grę jeszcze inne czynniki.

Pod tym względem mamy różne teorie przebicia materiałów izolacyjnych stałych pod wpływem przyłożonego napięcia.

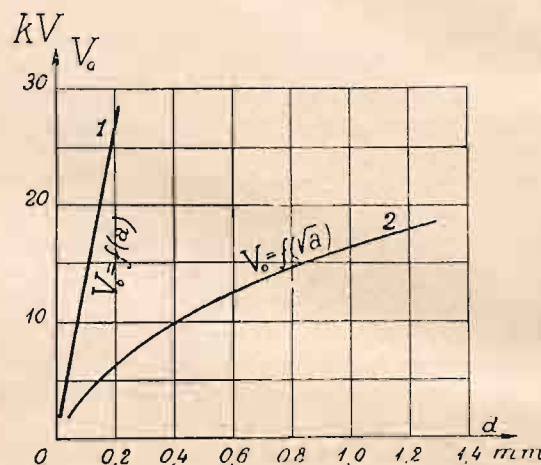
Teoria elektryczna. — Do niedawna panowała powszechnie teoria elektryczna, określająca, że przebicie zależy tylko od maksymalnej wartości natężenia pola. Podobnie określano i prawa przebicia gazów, gdzie jednak przekonano się niedawno ostatecznie, że ma tu wpływ także i lokalny rozdział pola elektrycznego. Według tej teorii następuje skutkiem natężenia pola rozluźnienie się cząsteczek, z którymi są związane jony. Pod wpływem dostatecznie dużego natężenia pola (naprężenie krytyczne) następuje gwałtowne oderwanie tych ładunków od cząsteczek, a jako rezultat tego — przebicie.

W ten sposób wytrzymałość elektryczna musiałaby się wyrazić w określonej liczbie woltów, przypadających na daną grubość dielektryku według pewnego prawa zależności napięcia od grubości. Po osiągnięciu tego naprężenia (kV/cm) musiałoby nastąpić momentalnie przebicie. Tymczasem okazuje się, że materiały izolacyjne stałe mogą wytrzymywać chwilowo znacznie większe wartości naprężenia, niż przy naprężeniach dłużej trwających. Przy chwilowych naprężeniach inne zatem zachodzą zjawiska, niż przy trwałych.

Praktyczne zastosowanie teorii przebicia musi znaleźć swój wyraz podczas prób materiałów izolacyjnych. Próbkę do badania nadają się najlepiej, jeżeli posiadają kształt płytek; elektrody wtedy również będą płaskie i pole elektryczne między nimi — jednostajne. Idzie o stwierdzenie, przy jakim napięciu próbka zostanie przebita, wzgl. jakie naprężenie jeszcze wytrzyma, oraz czy te naprężenia krytyczne są w czym zależne od grubości próbki. Podobnie jak u materiałów izolacyjnych gazowych i płynnych — zależność ta wyraża się w postaci charakterystycznej krzywej: $F_0 = f(a)$, gdzie F_0 maleje z rosnącą odległością elektrod (a).

Doświadczenia naogół potwierdziły, że rzeczywiste naprężenie krytyczne maleje z grubością dielektryku. Ponieważ teoria jonizacji bodźczej nie mogła tu być zastosowana, tłumaczono sobie to w różny sposób i godzono się, że grubsze warstwy wykazują większe nierównomierności struktury, niż cieńsze, że zatem łatwiej mogą być przebijane. Podobnie rzecz się miała, jeżeli przy próbach poddawano płytkę naprężeniu na większej powierzchni, niż — na mniejszej.

Jak się jednak ma rzecz dla zupełnie jednolitych i czystych materiałów? Różne próby i doświadczenia dawały tu różne wyniki, zależne najczęściej od warunków pomiaru. Naogół przyjęło się określenie, że napięcie przebicia rośnie z drugim pierwiastkiem grubości dielektryku. Prof. I. Mościcki w 1904 r. wykazał, *) że w polu jednostajnym, t. j. w środku między okładzinami, napięcie przebicia szkła, jest proporcjonalne od jego grubości. (Rys. 21, krzywa 1).



Rys. 21.

Natomiast na krawędzi okładzin, gdzie naprężenie pola jest większe, niż pośrodku jest ono proporcjonalne do drugiego pierwiastka z grubości (krzywa 2). Zostało to później potwierdzone z innych stron, przy zastosowaniu specjalnych metod, aby uniknąć wpływu wyładowań krawędziowych, które psują pomiar (o czym później będzie mowa). Między innymi potwierdził to Schwaiger **) w 1921 i K. W. Wagner ***) 1922 r.

Teoria termiczna. — Teoria elektryczna przebicia nie dawała jednak odpowiedzi, dlaczego przy dłuższych naprężeniach wytrzymałość materiału maleje. Zwrócono się zatem w zupełnie innym kierunku i starano się szukać rozwiązania w traktowaniu przewodzenia prądu przez izolator, jako zjawiska, zależnego od temperatury.

Pod wpływem choćby minimalnego prądu płynącego przez izolator ogrzewa się on, gdyż ilość wydzielonego ciepła jest, jak wiemy, proporcjonalna do RI^2 , gdzie choć I^2 jest bardzo małe, ale R bardzo duże. Przy prądzie stałym jest to czysty prąd upływowy, przy zmiennym dochodzą jeszcze straty histerezy. Izolatory mają przeważnie współczynnik cieplny oporności ujemny. Skutkiem ogrzewania się przewodność rośnie, a zatem rośnie i prąd, a skutkiem tego i ciepło. Poza to w materiale istnieć mogą miejsca o różnej przewodności, n. p. w postaci kanalików o przewodności większej, niż otoczenie. Prąd elektryczny przepływa więc przede wszystkim tamtędy i tam wywołuje się najwięcej ciepła. To ciepło musi zostać odprowadzone w dostatecznej mierze, aby nie

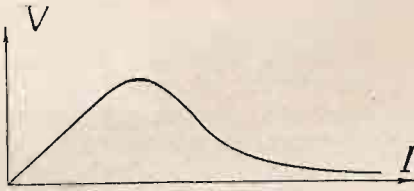
*) E.T.Z. 1904, str. 527.

**) Lehrb. d. elektr. Festigkeit. 1925.

***) Berichte der Akad. d. Wiss. 1922.

dopuszczyć do dalszego zwiększenia się przewodności w kanalikach. Jeżeli jednak ilość ciepła wytworzonego będzie większa, niż odprowadzonego, to zjawisko to potęguje się i dojdzie do przebicia materiału.

Charakterystyka napięcia w funkcji prądu (Rys. 22) przebiega z początku jako linia prosta, t. zn.



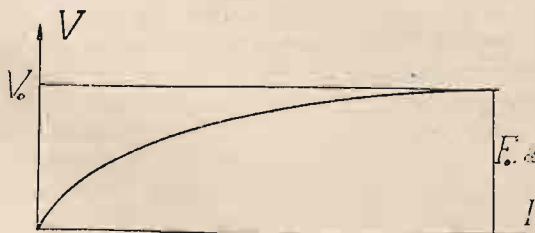
Rys. 22.

że zachodzi ścisła proporcjonalność między temi wielkościami, bo przy małych prądach ogrzewanie nie odgrywa jeszcze większej roli. Następnie osiąga maksimum i zaczyna szybko spadać, co wskazuje na wzrastanie prądu skutkiem ogrzewania, aż nastąpi stan równowagi nietrwalej. Przy tem samym napięciu prąd gwałtownie wzrasta, izolator przepala się i następuje przebicie.

Według tej teorii napięcie przebicia jest proporcjonalne do pierwszej potęgi grubości dielektryku. Badania K. W. Wagnera prawo to potwierdziły.

Teoria termiczna przebicia, której wyrazicielami są w Europie głównie K. W. Wagner*) (1922), a w Ameryce Ch. P. Steinmetz i I. L. K. Hayden**) (1922), nie daje jednak dostatecznego wytłumaczenia przebicia, jako procesu czysto termicznego, w tych wszystkich przypadkach, kiedy czas trwania naprężenia jest zbyt krótki, aby temperatura mogła osiągnąć dostateczne dla przebicia wartości. Zachodzi to np. przy momentalnych naprężeniach, przy b. cienkich płytach i wogóle przy niskich temperaturach.

Wydaje się zatem, że trzeba obie te teorie, termiczną i elektryczną, połączyć, aby wyjaśnić mechanizm przebicia. Zależnie od przewagi charakterystycznych warunków, można zastosować jedną lub drugą, t. zn. raz przeważa czynnik elektryczny, t. j. naprężenie elektryczne, drugi raz termiczny, t. j. naprężenie termiczne. Taką teorię można nazwać termiczno-elektryczną*). Stosownie do tego można różnie tłumaczyć dwa rodzaje naprężeń: chwilowe i trwałe. Według tej teorii, podczas naprężenia chwilowego przy zwiększaniu prądu spadek napięcia RI w izolatorze przebiega według podanej na Rys. 23 krzywej, aż przy V_0 osiągnie wartość $F_0 a$, czyli wte-

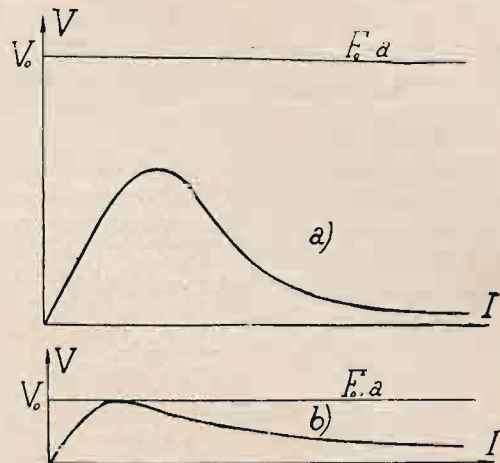


Rys. 23.

dy następuje przebicie skutkiem działań elektrycznych. Przebieg zaś napięcia przebicia zależnie od gru-

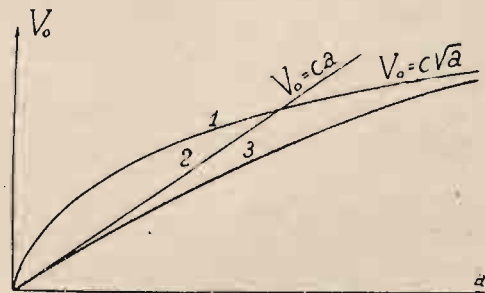
bości płyty przedstawia linia prosta ($V_0 = c \cdot a$, a. n. Rys. 25).

Przy naprężeniach trwałych inaczej się rzecz przedstawia dla grubych i dla cienkich płyt. Przy grubych płytach charakterystyka spadku napięcia jest jak w czysto termicznym ujęciu (Rys. 24, a). Po-



Rys. 24.

dobnie $V_0 = f(a) = c \sqrt{a}$. Maksimum nie dochodzi do wartości $V_0 = F_0 a$, jakaby wypadła z czysto elektrycznego ujęcia. Natomiast u płyt cienkich, przy małych wartościach prądu, charakterystyka ma przebieg, jęka według teorii elektrycznej. (Rys. 24 b). Spadek napięcia RI dochodzi prawie do wartości V_0 , jeżeli jednak temperatura wzrasta, to nie osiągnie tej wartości, lecz oddala się coraz bardziej od V_0 i przechodzi w przebieg termiczny. Krzywa zaś $V_0 = f(a)$ ma dla małych wartości a przebieg prawie prosty (Rys. 25, 3),



Rys. 25.

potem przechodzi powoli w przebieg pierwiastkowy (termiczny). Przy małych grubościach jest zatem proporcjonalność napięcia przebicia do grubości, jak według teorii elektrycznej lub podczas chwilowych naprężeń. Przy grubościach dużych mamy za to proporcjonalność do \sqrt{a} ; odchylenie to należy przypisać wpływom termicznym.

Z powyższych teorii widać, jak duży wpływ na wytrzymałość materiałów izolacyjnych stałych ma ogrzewanie się względnie stopień odprowadzania ciepła, powstałego skutkiem strat w dielektryku. Stąd pochodzą różne wartości, otrzymywane w pozornie tych samych warunkach. Jasnym też jest, że wielkość strat w dielektryku może być oceną dobroci i wytrzymałości materiału. Nowoczesną tendencją jest określanie dobroci wyrobu nie tylko jego wytrzymałością

*) I. c.

**) El. World. 1922.

*) Rogowski, — Arch. f. El. 1924, str. 153.

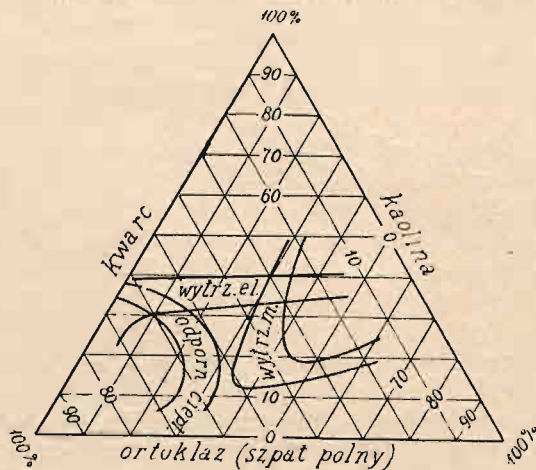
na przebicie, ale i wielkością strat, czyli stratnością dielektryczną, która wyraża się w W/cm^3 .

4. Porcelana.

Najbardziej rozpowszechnionym i najważniejszym materiałem w technice wysokich napięć jest porcelana, używana do wyrobu wszelkiego rodzaju izolatorów.

Porcelana izolatorowa, t. zw. porcelana twarda, jest to mieszanina $\frac{2}{4}$ kaoliny, $\frac{1}{4}$ krzemu i $\frac{1}{4}$ ortoklaz (szpatu polnego), która się wypala w specjalnych piecach. Kaolina jest związek krzemowo-aluminowy ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), topliwy przy temperaturze 1200 do 1800° C. Przez dodanie łatwiej topliwego ortoklaz (punkt topliw. ok. 1200° C) otrzymuje się materiał, który daje się dobrze formować i wypalać już przy temperaturze 1400 — 1500° C. Kwarc ma topliwość podobną, — w temperaturze wypalania nie topi się, lecz tylko zostaje częściowo rozpuszczony przez roztopiony ortoklaz, tak jak kaolina.

Kaolina daje porcelanie przed jej wypaleniem potrzebną plastyczność, a następnie odporność na wpływy termiczne; kwarc — daje należyłą wytrzymałość mechaniczną, stanowiąc niejako szkielet porcelany; wreszcie szpat jest czynnikiem, łączącym oba tamte, i daje porcelanie spoiwość i wytrzymałość elektryczną. Zależnie od procentowego składu tych trzech czynników w masie porcelanowej, otrzymujemy materiał w różnym stopniu odporny na wpływy elektryczne, mechaniczne i cieplne. Osiągnięcie optimum wytrzymałości pod każdym względem jest niemożliwe, trzeba się decydować na jeden, względnie dwa warunki, pomijając trzeci. Zależnie od potrzeby, dobiera się odpowiedni stosunek procentowy tych składników na podstawie specjalnego wykresu trójkątego układu 3-ch osi spórzędnych, który uzmysłowia bardzo przejrzyście własności porcelany (Rys. 26). Każdy punkt wewnątrz trój-



Rys. 26.

kąta jest określony trzema spórzędnymi, odpowiadającymi procentowemu stosunkowi ortoklazu, kaoliny i kwarcu w masie porcelanowej. Krzywe, podane w tym układzie, określają granice tego procentowego składu, który należy zastosować, aby uzyskać odpowiednie własności wytrzymałości elektrycznej, mechanicznej i cieplnej. Widać z tego, że wymagania najlepszych własności są sprzeczne, tak, że trzeba wybierać między nimi stosownie do przeznaczenia materiału. Optimum tych własności jest zawarte między temi trzema krzywymi, co odpowiada mniej więcej

40 — 50% kaoliny, 25 — 30% ortoklazu i ok. 25% kwarcu.

Masa, służąca do wyrobu izolatorów porcelanowych, składa się więc, jak wyżej powiedziano, z trzech głównych składników: kaoliny, kwarcu i ortoklazu, tworzących mieszaninę doskonale sproszkowaną. Rozrobiwszy ją wodą na rzadko, przepuszcza się ją obok magnesów, celem wyłowienia cząstek żelaza, i przez sита, celem usunięcia grudek i zanieczyszczeń, poczem za pomocą pras wyciska się wodę i robi masę, która po odleżeniu pewnego czasu w piwnicy, podczas czego odbywają się procesy rozkładowe, staje się plastyczną. Masę taką poddaje się działaniu specjalnych maszyn gniojących, mających na celu usunięcie powietrza.

Kształt nadaje się izolatorowi albo tocząc go za pomocą szablonu na obracającej się tarczy garncarskiej, albo odlewając w gipsowych formach, po uprzednim rozrobieniu masy wodą. Pierwszy sposób daje przedmiotom większą wytrzymałość, bo przez ściskanie masy staje się ona bardziej spoiwata.

Drobniejsze przedmioty porcelanowe można wyciskać za pomocą pras.

Uformowane izolatory suszy się powoli i równomiernie, poczem pociąga się je polewą i wstawia do specjalnego pieca, tunelowego lub pierścieniowego, gdzie się je wypala przy temperaturze 1400—1500° C, ogrzewając stopniowo przez 25 — 30 godzin, a potem ostudzając przez dalsze 30 — 40 godzin. Cały proces wypalania trwa więc 50 — 70 godzin. W piecach stoją przedmioty na trzonach szamotowych. Po wystudzeniu czyści się je i segreguje.

Przedmioty porcelanowe zmniejszają objętość przez wypalenie około 20%. Różnice wymiarów o $\pm 5\%$ są nie do uniknięcia — wobec tego są dopuszczalne w/g przepisów.

Staranność wyrobu i wypalania jest pierwszorzędnym czynnikiem, warunkującym dobroć izolatora. Fabryki mają tu swe sposoby wypróbowane, których zazdrośnie strzegą. Jako najważniejsze warunki stawiane pod tym względem są: delikatne zmielenie składników i dokładne ich zmieszanie z sobą; staranne modelowanie izolatora, aby uniknąć pór powietrznych, szczelin, szwów, gdyż na wytrzymałość porcelany ma wielki wpływ jej spoiwość i jednolitość; powolne suszenie wyrobionego przedmiotu, aby uniknąć naprężeń wewnętrznych. Jednak najważniejszym procesem jest wypalanie porcelany przy właściwej temperaturze (1400 — 1500° C), najlepiej w piecach tunelowych. Za niska temperatura powoduje to, że porcelana jest za mało gęsta i wytrzymała. Przy temperaturze zbyt wysokiej masa staje się w piecu zbyt miękka i przedmiot może się zdeformować, a porcelana tak wypalona jest bardzo krucha. Studzenie, jak i ogrzewanie, musi być również bardzo powolne, aby znowu nie dopuścić do naprężeń wewnętrznych, a przez to do rys, częstokroć mikroskopijnie małych. Ażeby się przedmiot jednostajnie w całej masie ostudzał, należy unikać nadmiernych zgrubień. Przedmioty cieńsze wykazują większą wytrzymałość mechaniczną, niż uformowane niejednolicie. Nowoczesna technika izolatorowa przepisuje, aby izolatory nie miały w żadnym miejscu ścianki grubszej niż 20 do 25 mm (z wyjątkiem izolatorów o podwójnym kołpaku, które mają trzon specjalnie gruby; o tem później).

Ażeby porcelaną uczynić bardziej odporną na

wpływy zewnętrzne, pokrywa się ją polewą, t. j. szklistą masą porcelanową z dodatkiem kredy, magnezy i potasu, posiadający niższy punkt topliwości, niż porcelana. Polewa musi dokładnie przylegać do porcelany i mieć ten sam współczynnik rozszerzalności, bo inaczej popęka i odpadnie po ostudzeniu. Chroni ona izolator od osadzania się na nim brudu, dymu i t. p., przez co z czasem powierzchnia izolatora mogłaby się stać przewodzącą. Wpływy atmosferyczne także mniej dają się we znaki izolatorom polewanym, niż bez polewy.

Właściwości mechaniczne porcelany izolatorowej.

Ciężkość właściwa — 2,3 ÷ 2,4.

Wydłużalność — różna, zależnie od składu i wypalenia, wynosi ok. 4 ÷ 6 · 10

Twardość — 7 ÷ 8.

Spółczynnik sprężystości — 680 000 ÷ 780 000 kg/cm².

Wytrzymałość na ściskanie — bardzo duża, zwłaszcza przy małych próbkach; średnio można przyjąć 1000 ÷ 4000 kg/cm², zmniejsza się ona z rosnącym przekrojem próbki.

Wytrzymałość na rozciąganie — również bardzo rozmaita, zależnie od próbki. Jakkolwiek w stosunku do poprzedniej — mała, to jednak naogół znacznie większa, niż początkowo przyjmowano, tak że nadaje się do konstrukcji izolatorowych, pracujących na rozciąganie; wynosi 200 ÷ 250 kg/cm².

Wytrzymałość na zginanie — zależy bardzo od kształtu i wymiarów próbki i wynosi 400 ÷ 450 kg/cm².

Obrabialność — bardzo mała; porcelany prawie się nie obrabia.

Porowatość zależy od wyrobu; dobrze wypalona porcelana nie powinna wykazywać porowatości, a więc wchłaniać wody; porcelana zaś wypalona niestarannie jest higroskopijna.

Odporność na ciepło. — Przy temperaturze powyżej 600° C zaczyna porcelana mięknąć; przy 950° części polewane mogą do siebie przylgnąć; iskra nie pozostawia na niej śladów, natomiast płomień dłużej trwającego łuku świetlnego, może uszkodzić izolator, względnie jego polewę. W oleju natomiast łuk wżera się w powierzchnię izolatora, bo olej utrudnia mu przejście. Ważną jest odporność na nagłe zmiany temperatury; porcelana powinna wytrzymać nagłe przeskoki (50 ÷ 75° C) bez najmniejszych rys lub pęknięć.

Odporność na mróz — o ile woda nie wsiąka — zupełna.

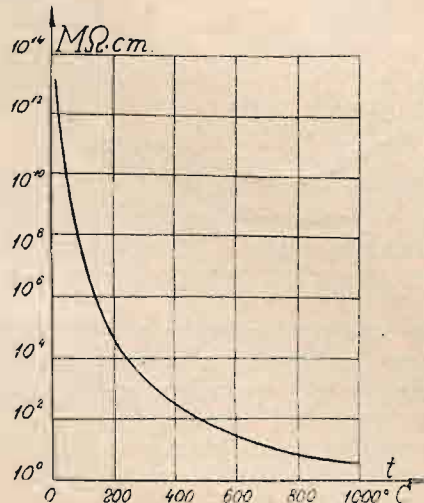
Odporność na kwasy — bardzo duża; normalnie, izolatory porcelanowe nie poddają się wpływom atmosferycznym, oparom, wyziewom.

Właściwości elektryczne porcelany.

Oporność właściwa porcelany — bardzo duża, rzędu 10¹⁴—10¹⁵ Ω cm przy normalnej temperaturze; spada ona znacznie z rosnącą temperaturą. (Rys. 27). Wobec oporności powierzchniowej można ją w normalnych warunkach pominąć.

Oporność powierzchniowa zależy bardzo od wilgotności powietrza i stanu samej powierzchni; np. oporność mierzona dwa miliony M Ω przy 40% wilgotności, opadła na 100 M Ω przy 100%.

Izolatory czyste po zmoczeniu deszczem i wyschnięciu osiągają z powrotem swe pierwotne wartości prędkiej, niż zabrudzone.



Rys. 27.

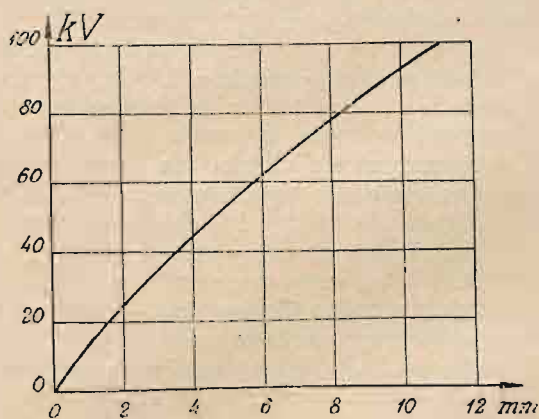
Stała dielektryczna — 5,5 ÷ 6.

Stratność dielektryczna — znikomo mała; kąt stratności ok. 1°. Straty upływowe izolatorów zależą od stanu atmosfery i opadów; wynoszą np. dla izolatora stojącego przy 6 kV:

w suchym powietrzu	ok. 0,05 W
we mgle	ok. 0,20 W
w deszcz	ok. 1,0 W
w ulewę	ok. 2,0 W

a więc wogóle są tak małe, że można ich nie uwzględniać przy obliczaniu strat w linii.

Wytrzymałość na przebicie. — Dane zależą bardzo od kształtu elektrod i próbki, od czasu trwania naprężenia, kształtu krzywej napięcia, szybkości podnoszenia napięcia przy próbie i t. d. Wytrzymałość zależy też bardzo od jej składu i procesu wypalania. Wartości otrzymane przez różnych badaczy, różnią się bardzo. Według Scheringa *) zależność napięcia przebicia od grubości płytki wyraża się, jak



Rys. 28.

na Rys. 28. Zgrubsza można przyjąć ok. 80 — 100 kV dla płytki 10 mm, a ok. 20 ÷ 25 kV dla 2 mm. W technice wysokich napięć ważniejsza jest wytrzymałość gotowych izolatorów, niż samego materiału.

*) Schering Isoliermittel der Elektrotechnik, 1924.

5. Papiery izolacyjne

Papier izolacyjny, znany także pod nazwą papieru t w a r d e g o, wyrabia się, podobnie jak papier zwykły, z celulozy z dodatkiem włókien bawełnianych, lub im podobnych, przy zastosowaniu jednak specjalnych zabiegów. Najważniejszym zabiegiem jest należyte wysuszenie papieru tak, aby wszędzie miał jednakowy stopień wilgotności i jednakową stałą dielektryczną, na którą również ma wpływ zawartość wody i powietrza w porach. Ponieważ papier jest wystawiony na wpływy wilgoci powietrza, może wchłaniać i wydawać tę wilgoć i to najintensywniej w warstwach zewnętrznych; przez to zmieniają się jego własności.

Wobec tego papier trzeba poddać działaniu substancji dobrze izolującej, a nie przyjmującej wody, jak np. oleje, lakiery, parafina, smoła, żywica i t. p. Działanie to musi być dwójakie: p o w l e k a n i e, czyli lakierowanie, wtedy mamy do czynienia z dwiema warstwami izolacyjnymi: papierem i lakierem; albo też n a s y c a n i e papieru tak, że otrzymujemy jednolitą warstwę, przepojoną masą izolacyjną, która wyparła wodę i powietrze z papieru. Sposoby takiego przerabiania papieru są właśnie czynnikiem warunkującym dobroć i wytrzymałość izolacji i stanowią zwykle tajemnicę fabryczną. Procesy te odbywają się w stanie gorącym i pod ciśnieniem, aby wypędzić wilgoć z oleju, jednak przy takiej temperaturze, aby papieru nie zepsuć (ok. 100° C). Papier tak przyrządzony, zwykle bardzo cienki, składa się warstwami pod prasę w postaci płyt lub zwinięty w postaci rur. Ta ostatnia forma daje lepsze wyniki, gdyż łatwiej można zastosować jednostajne ciśnienie podczas wyrobu.

Papier nie znosi dużych temperatur. Przy 100° C zaczyna się jego utlenianie, przy 105 — 110° — kruszeje; ale nawet przy znacznie niższych temperaturach, o ile papier jest na nie trwale wystawiony, traci na wytrzymałości mechanicznej i elektrycznej. Dlatego nie można dopuszczać do nadmiernego grzania się izolacji papierowej; zwłaszcza odnosi się to do kabli, które obecnie, prawie wyłącznie, są wyrabiane o takiej izolacji. Jako maksymalnie dopuszczalną granicę grzania się papieru — przyjąć można 80° C.

N a s y c a n i e papieru podnosi jednak jego wytrzymałość w tym względzie. Doskonale nasycony papier może wytrzymać takie temperatury, jak jego masa impregnacynna. Kwestja ta, t. j. odporność papierów twardych na ciepło, nie jest jeszcze ostatecznie wyjaśniona. Podawane przez różnych badaczy wartości różnią się zbyt od siebie, aby można było ustalić jakieś liczbowe normy w tym względzie.

Dawniej stosowano p a r a f i n ę, jako materiał impregnacynny, bardzo dobry pod względem mechanicznym i elektrycznym, lecz mało odporny na ciepło. Lepszy jest s z e l a k, dający papierowi wytrzymałość do 20 kV/mm, lecz nie znoszący temperatur wyższych, niż 100° C.

Obecnie używana jest sztuczna żywica, znana pod nazwą b a k e l i t u (od wynalazcy—dr. B a e k e l a n d a z Nowego Jorku). Jest to syntetyczne połączenie benzofenolów ($C_{10}H_7OH$) z formaldehydem ($HCOH$) przy zastosowaniu silnego katalizatora, np. kwasu solnego lub alkaliów (amoniak).

Jako produkt tego otrzymuje się masę kleistą, łatwo rozpuszczalną (np. w alkoholu), topliwą; stan

taki nazywamy stanem A. Przez poddanie tej masy dłuższemu ogrzewaniu, przechodzi ona w stan B, jako ciało stałe, dosyć kruche, jeszcze podatne ciepłu, przez które staje się plastyczne, ale już nie topliwe i rozpuszczalne, tylko w niektórych silnych rozpuszczalnikach (aceton, fenol). Pod ciśnieniem da się urabiać plastycznie w formy. — Przy dalszym ogrzewaniu przez 2 — 3 godziny przy 140 do 180° C w specjalnych piecach (bakelizatorach), pod ciśnieniem ok. 2 atm., aby przeszkodzić wydzielaniu się gazów wewnątrz masy w postaci porów, — bakelit przechodzi w ostatnie stadium (stan C), jako materiał jasny, przezroczysty, bardzo twardy, mało elastyczny, nierozpuszczalny i nietopliwy. Tylko stężony kwas solny i azotowy może go nadgryźć. Znosi ciepło do 300° C, poczem powoli się zwęglą, lecz nie mięknie. Ciężkość właściwa ok. 1.75, stała dielektryczna 6 — 8. Wytrzymuje ok. 23 kV/mm.

Do wyrobu papieru izolacyjnego używa się bakelitu w stanie A, rozpuszczonego w alkoholu, którym się pociąga papier. Po wyschnięciu papier przepuszcza się przez odpowiednie maszyny, w których nawija się go spiralnie na rury pod ciśnieniem i przy temperaturze 130 — 140° C, przez co bakelit przechodzi w stan C, a składniki gazowe ulatniają się.

Papier bakelitowany odporny jest na ciepło do 250° C i na wpływy olejów. Wytrzymałość elektryczna przeszło 20 kV/mm, jest ona jednak większa w kierunku prostopadłym do warstw, niż w równoległym, (jak zresztą przy każdym papierze izolacyjnym uwarstwionym).

Daje się on łatwo obrabiać, czem różni się bardzo korzystnie wobec porcelany, od której pozatem jest ok. 2 razy lżejszy, bardziej wytrzymały elektrycznie i znacznie wytrzymalszy na zgięcia. Natomiast jest stosunkowo mniej odporny na wpływy wilgoci atmosferycznej, dlatego nie można go używać pod gołym niebem. Stała dielektryczna wynosi 3 — 5, zależnie od wyrobu. Straty dielektryczne dosyć duże.

W użyciu jest on znany pod różnymi nazwami, jak: repelit, bituba, hefelit, pertinax i t. p., zależnie od fabryki, która go wyrabia.

W ostatnich czasach wyrabiają m a s ę b a k e l i t o w ą ze sproszkowanej celulozy, nasyconej bakelitem. Przez to otrzymuje się materiał, wykazujący taką samą wytrzymałość w różnych kierunkach, niezależnie od układu warstw, jak przy papierze twardym. Obrabialność jego skutkiem tego jest lepsza ma on wytrzymałość elektryczną ok. 15 kV/mm, na ściskanie ok. 5000 kg/cm², na zgięcie 600 kg/cm². Stała dielektryczna 3,8 ÷ 4,5.

Sztuczne materiały izolacyjne wchodzą coraz bardziej w użycie, wypierając porcelanę, na razie z miejsc zamkniętych; — o ile uda się — w co wątpić nie można — wynaleźć materiał izolacyjny sztuczny, odporny na wilgoć, będzie on groźnym konkurentem dla porcelany napowietrznej, jako znacznie od niej lżejszy i łatwiej obrabialny.