

# Zestyki łączników elektrycznych

## Zestyk elektryczny

zespół dwóch elementów przewodzących (styków).

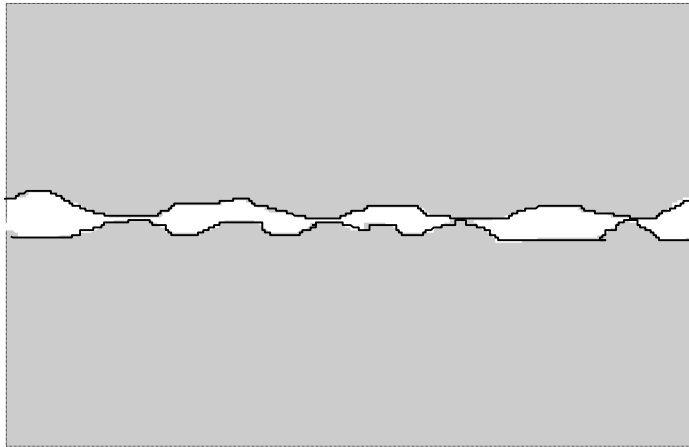
Podstawowy podział zestyków:

- zestyki rozłączne (przerywowe),  
(załączanie i wyłączanie obwodów i urządzeń elektrycznych)
  - zestyk zwykły: styk stały i styk ruchomy,
  - zestyk zespolony: zestyk podstawowy (roboczy),  
zestyk pomocniczy (opalny);
- zestyki nierozłączne:
  - nieruchome (zaciski),
  - ruchome (zestyki ślizgowe).

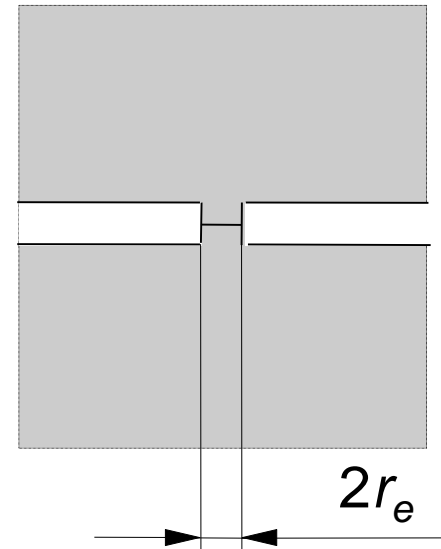
## Rezystancja zestyku rozłącznego

- rezystancja przejścia - zwiększona gęstość prądu w miejscach rzeczywistej styczności powierzchni styków,
- rezystancja warstwy nalotowej (tlenki, siarczki itp. metali, z których wykonane są styki) i adsorbcyjnej (utworzonej przez cząstki zaadsorbowane z atmosfery otaczającej styki).

a)



b)



Szkice przekrojów zestyków w dużym powiększeniu:

a) rzeczywistego,

b) modelowego zestyku elementarnego.

Pojedyncza powierzchnia styczności styków  $S_e$ :

$$S_e = \frac{F_e}{\sigma}$$

$S_e$  - powierzchnia styczności styków,

$F_e$  - siła docisku styków,

$\sigma$  - wartość naprężenia na granicy plastyczności materiału stykowego.

Zastępczy promień powierzchni styczności  $r_e$ :

$$r_e = \sqrt{\frac{S_e}{\pi}} = \sqrt{\frac{F_e}{\sigma \pi}}$$

Prąd przepływający z elektrody płaskiej o promieniu  $r_e$  do półprzestrzeni nieograniczonej o rezystywności  $\rho$  jest ograniczony przez rezystancję:

$$R_1 = \frac{\rho}{4r_e} = \frac{\rho}{4 \sqrt{\frac{F_e}{\sigma \pi}}} = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\sigma \pi}{F_e}}$$

Całkowita rezystancja zestyku elementarnego:

$$R_e = 2R_1$$

Po uwzględnieniu wszystkich zależności:

$$R_e = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi \sigma}{F_e}}$$

Dla całego zestyku ( $n$  jednakowych zestyków elementarnych):

$$R_n = \frac{R_e}{n}$$

Przy docisku całego zestyku siłą  $F$ , liczba powstałych zestyków elementarnych wynosi:

$$n = \rho F^q$$

$\rho$ ,  $q$  - współczynniki zależne od rodzaju zestyku.

Po uwzględnieniu wszystkich zależności:

$$R_n = \frac{R_e}{n} = \frac{\rho \sqrt{\frac{\pi \sigma}{F_e}}}{\rho F^q} = \frac{\rho}{2 \rho F^q} \sqrt{\frac{\pi \sigma}{F_e}}$$

Siła docisku elementarnego zestyku:

$$F_e = \frac{F}{n}$$

Stąd:

$$R_n = \frac{\rho}{2\rho F^q} \sqrt{\frac{\pi\sigma n}{F}} = \frac{1}{F^c} \frac{\rho\sqrt{\pi\sigma n}}{2\rho} = \frac{K}{F^c}$$

gdzie:

$$K = \frac{\rho\sqrt{\pi\sigma n}}{2\rho} \quad c = \frac{q+1}{2}$$

$K$  - współczynnik zależny od rodzaju materiału,  
temperatury oraz stanu powierzchni styków,

$c$  - współczynnik zależny od rodzaju zestyku  
dla zestyków powierzchniowych  $c$  wynosi 1,0.

## Obciążalność prądowa zestyków

Skutki zbyt dużej wartości prądu przepływającego przez zestyk:

- temperatura powierzchni stykowości może zbliżyć się do temperatury topnienia materiału stykowego,
- może nastąpić zespawanie lub trwałe uszkodzenie styków.

Zapewnienie długotrwałej pracy zestyków przez ograniczenie spadku napięcia.

Dopuszczalny spadek napięcia:

$\Delta U_{dop} = (0,1 \dots 0,25) \Delta U_m$  dla zestyków elektroenergetycznych,

$\Delta U_{dop} = (0,5 \dots 0,8) \Delta U_m$  dla zestyków przekaźnikowych,

$\Delta U_{dop}$  – największy spadek napięcia nie powodujący jeszcze mięknięcia metalu.

Materiał	Mięknienie		Topnienie	
	$\nu_m$ [°C]	$\Delta U_m$ [V]	$\nu_t$ [°C]	$\Delta U_t$ [V]
Aluminium	150	0,10	658	0,30
Żelazo	500	0,21	1530	0,60
Miedź	190	0,12	1083	0,43
Srebro	150	0,09	960	0,35
Wolfram	1000	0,40	3370	1,00
Ołów	100	0,07	232	0,13
Platyna	540	0,25	1773	0,70
Molibden	800	0,25	2620	0,75
Grafit	---	---	4700	5,00

Obliczenie prądu obciążenia zestyku:

$$I_n \leq \frac{\Delta U_{dop}}{R_{en}}$$

## Odskoki styków

Zderzenie styku ruchomego z nieruchomym:

- przemiana energii kinetycznej styku ruchomego na:
  - energię odkształcenia plastycznego materiału stykowego,
  - energię fal sprężystych w sprężynach i konstrukcji wsporczej,
  - energię potencjalną związaną z odkształceniem sprężystym materiału stykowego;
- zmiana energii potencjalnej odkształcenia styków na:
  - energię kinetyczną ruchu styku w przeciwnym kierunku.

Zjawiska w czasie odskoku styku ruchomego:

- malenie docisku do styku stałego,
- wzrost rezystancji zestyku,
- wydzielanie znacznych ilości ciepła,
- powstanie ciekłych połączeń metalicznych,
- rozerwanie połączeń metalicznych,
- zapłon łuku o bardzo wysokiej temperaturze,



- parowanie materiału stykowego,
- ponowne zetknięcie się styków,
- ochłodzenie powierzchni i powstanie mikrospoin,
- rozrywanie mikrospoin w czasie kolejnego odskoku.

Systematyczne niszczenia zestyków wskutek deformacji ich powierzchni i przemieszczania materiału stykowego.

### **Środki ograniczające odskoki styków:**

- zmniejszenie prędkości styku ruchomego,
- zastosowanie amortyzatorów gumowych, filcowych, pneumatycznych, cieczowych,
- wykorzystanie tarcia sprężyn stykowych,
- stosowanie dużego docisku początkowego,
- stosowanie styków ruchomych o dużej bezwładności,
- stosowanie zestyków równoległych o przesuniętych wzajemnie chwilach uzyskiwania styczności.

## Materiały stykowe

### Pożądane własności:

- mała rezystywność,
- duża przewodność cieplna,
- duża odporność na utlenianie i erozję łukową,
- mała skłonność do tworzenia się warstw nalotowych,
- wysoka temperatura mięknięcia, topnienia i parowania
- mała twardość (przeciwdziała odskokom styków),
- duże wartości minimalnych prądów i napięć wyładowań łukowych,
- duża wytrzymałość mechaniczna,
- łatwa obróbka mechaniczna i cieplna,
- niska cena.

Zestyki wykonuje się z metali jednorodnych oraz ze stopów i spieków różnych metali.

## Czyste metale:

Cu, Ag, Pd, Pt, Ni, W, Pt

- miedź (Cu) - tanie styki łączników średniej i dużej mocy,
- srebro (Ag) - pokrywanie styków łączników słaboprądowych,
- pallad (Pd) - na pokrycia styków pracujących w warunkach dużej wilgotności i w obecności związków siarki,
- platyna (Pt) - na styki o dużej niezawodności działania, na styki przekaźników,
- nikiel (Ni) – na styki łączników niskiego i wysokiego napięcia,
- wolfram (W) i molibden (Mo) - styki łączników dużych mocy, duża twardość, trudna obróbka, trwała warstwa tlenków nieprzewodzących.

## Stopy:

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

- duża twardość i wytrzymałość cieplna,
- odporność na szepianie się styków.

## **Spieki:**

Cu-W, Cu-Mo, Ag-W

- mała rezystywność i wysoka temperatura topnienia,
- materiały na styki opalne.

Ag-Ni-grafit, Ag-W-grafit, Ag-CdO

- wysoka odporność na łuk elektryczny i szczepianie się.

## **Erozja powierzchni styków**

Zjawiska związane z erozją styków:

- przenoszenie materiału z jednego styku na drugi,
- ubytek materiału obydwóch współpracujących styków przez jego rozpylanie.

Rodzaje erozji:

- erozja mechaniczna

Zderzenia oraz wzajemne tarcie powierzchni stykowych powodujące odkształcenia styków, rozwarstwienie przypowierzchniowe lub łuszczenie się i odpryskiwanie materiału stykowego.

- erozja elektrotermiczna

Zjawiska elektryczne i ciepłe powodujące wędrowkę materiału z jednego styku na drugi lub rozpylanie materiału do otoczenia.

Erozja w czasie zamykania zestyku:

- styk ruchomy zbliża się do styku stałego,
- następuje przeskok iskry,
- iskra przechodzi w wyładowanie łukowe,
- zetknięcie się nierównych powierzchni stykowych,
- zgaśnięcie łuku,
- duże gęstości prądu w zestykach elementarnych,
- siły elektrodynamiczne odrzucają styk ruchomy,
- połączenia szybko parują i ponownie zapala się łuk.

Erozja w czasie otwierania zestyku:

- maleje docisk styków,
- zmniejsza się powierzchnia przewodzenia,
- gęstość prądu osiąga bardzo duże wartości,

- powierzchnia stykowa topi się,
- płynny metal tworzy połączenie między stykami,
- połączenie przerywa się przy styku o biegunowości dodatniej,
- przybywa materiału na styku o biegunowości ujemnej.

Erozja może zachodzić także:

- przez rozpryskiwanie płynnego metalu na skutek:
  - uwalniania się rozpuszczonych w nim gazów,
  - wyrzucania kropeł materiału przez siły elektrostatyczne.

## **Konstrukcje zestyków rozłącznych**

### **Typowe konstrukcje zestyków:**

- szczękowe,
- czołowe,
- wieńcowe.

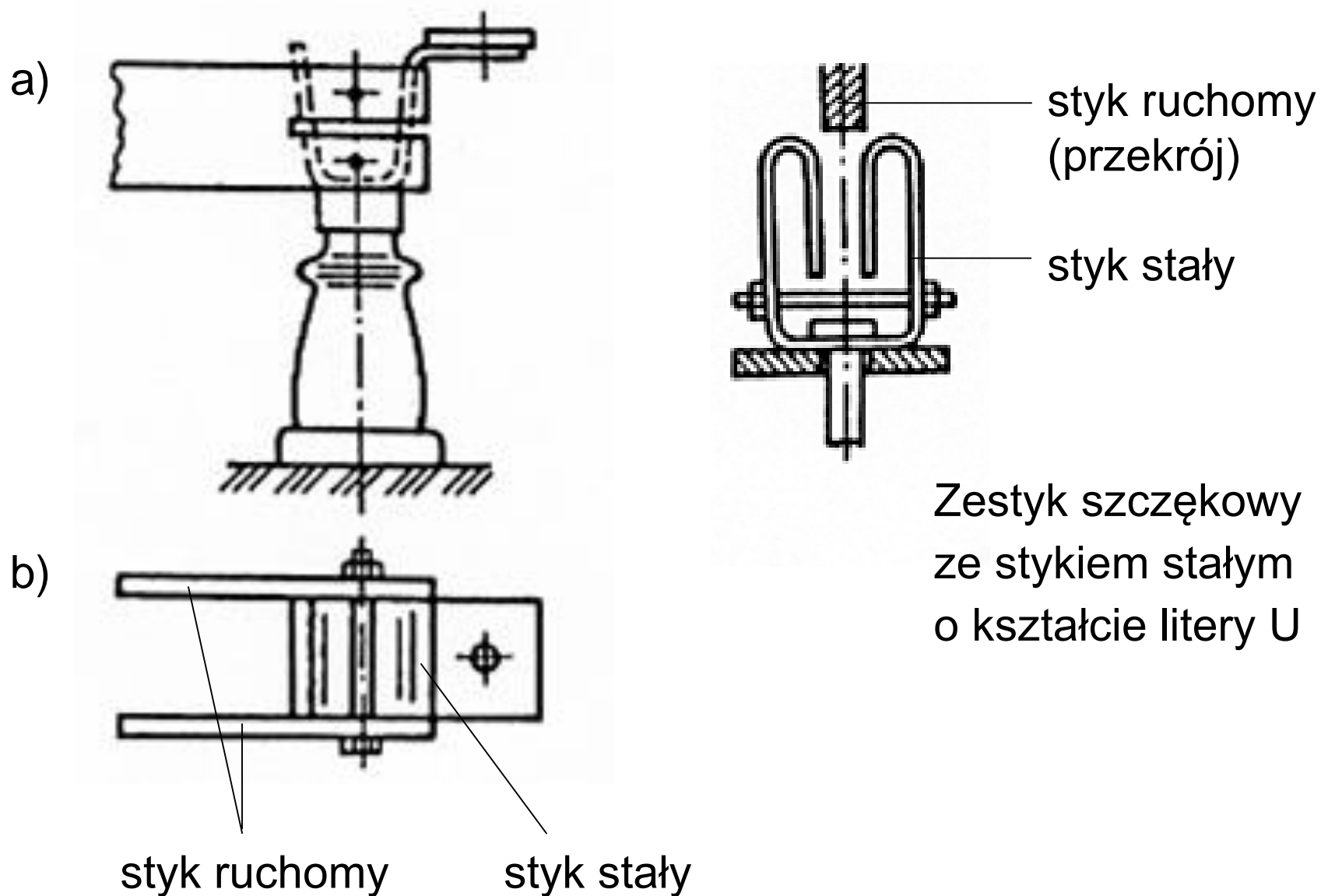
### Zestyki szczegółowe:

- w łącznikach niskiego napięcia  
(łączniki ręczne, bezpieczniki stacyjne),
- w łącznikach wysokiego napięcia  
(odłączniki, bezpieczniki SN).

### Zestyki czołowe i wieńcowe:

- w łącznikach wysokiego napięcia  
(głównie wyłączniki).

## Przykładowe konstrukcje zestyków rozłącznych szczękowych

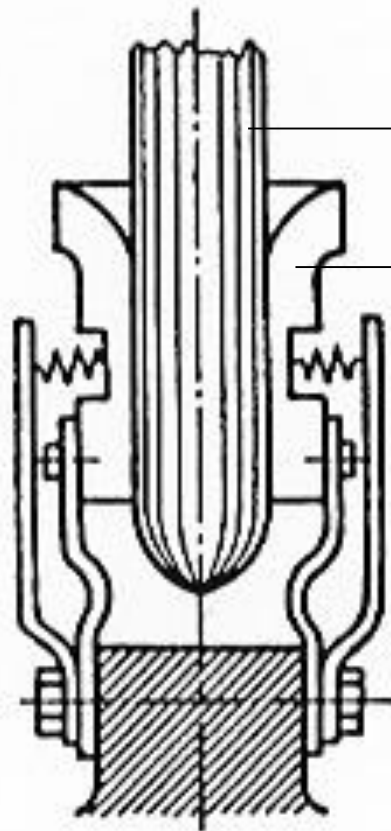


Zestyk szczękowy ze stykiem ruchomym w postaci dwóch płaskowników:

- a) widok z boku,
- b) widok z góry.



## Przykładowa konstrukcja zestyków rozłącznych wieńcowych



styk ruchomy

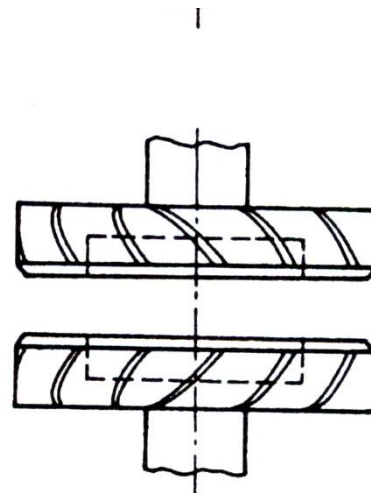
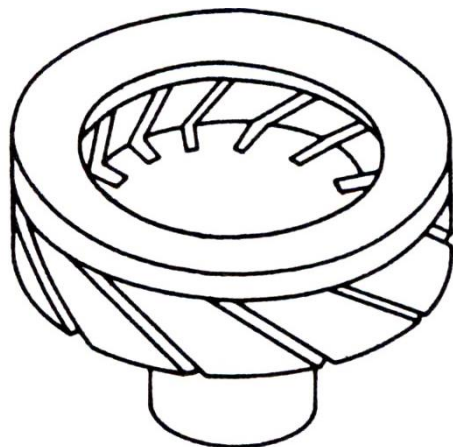
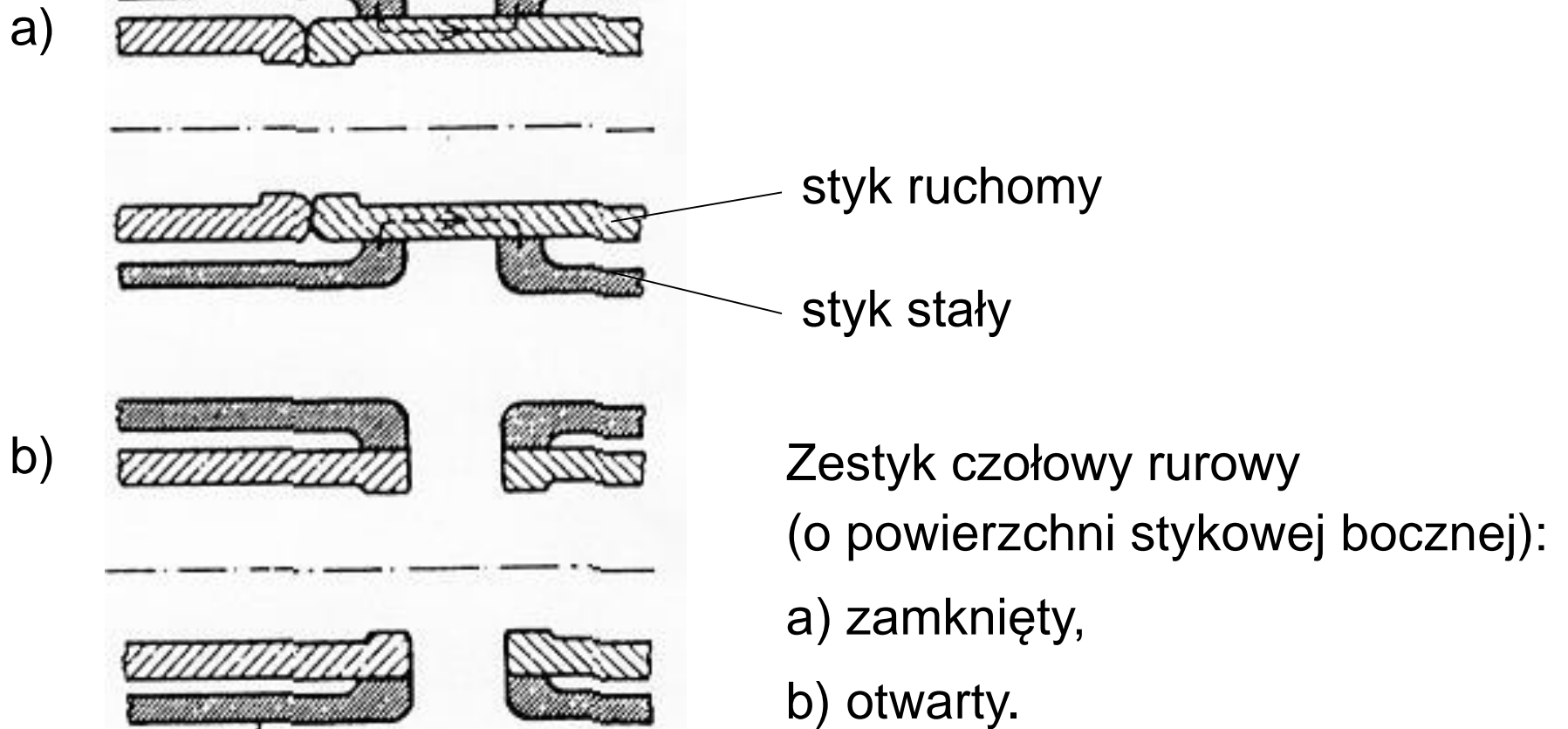
styk stały

Przekrój wzdłuż osi symetrii



Przekrój poprzeczny do osi symetrii

## Przykładowe konstrukcje zestyków rozłącznych czołowych



Zestyk czołowy płaski

## Łuk elektryczny łączeniowy

Łuk elektryczny w łączniku:

- rozdzielanie się styków przy otwieraniu łącznika,
- zbliżanie się styków przy zamykaniu łącznika,
- stopienie i odparowanie elementu topikowego w bezpieczniku.

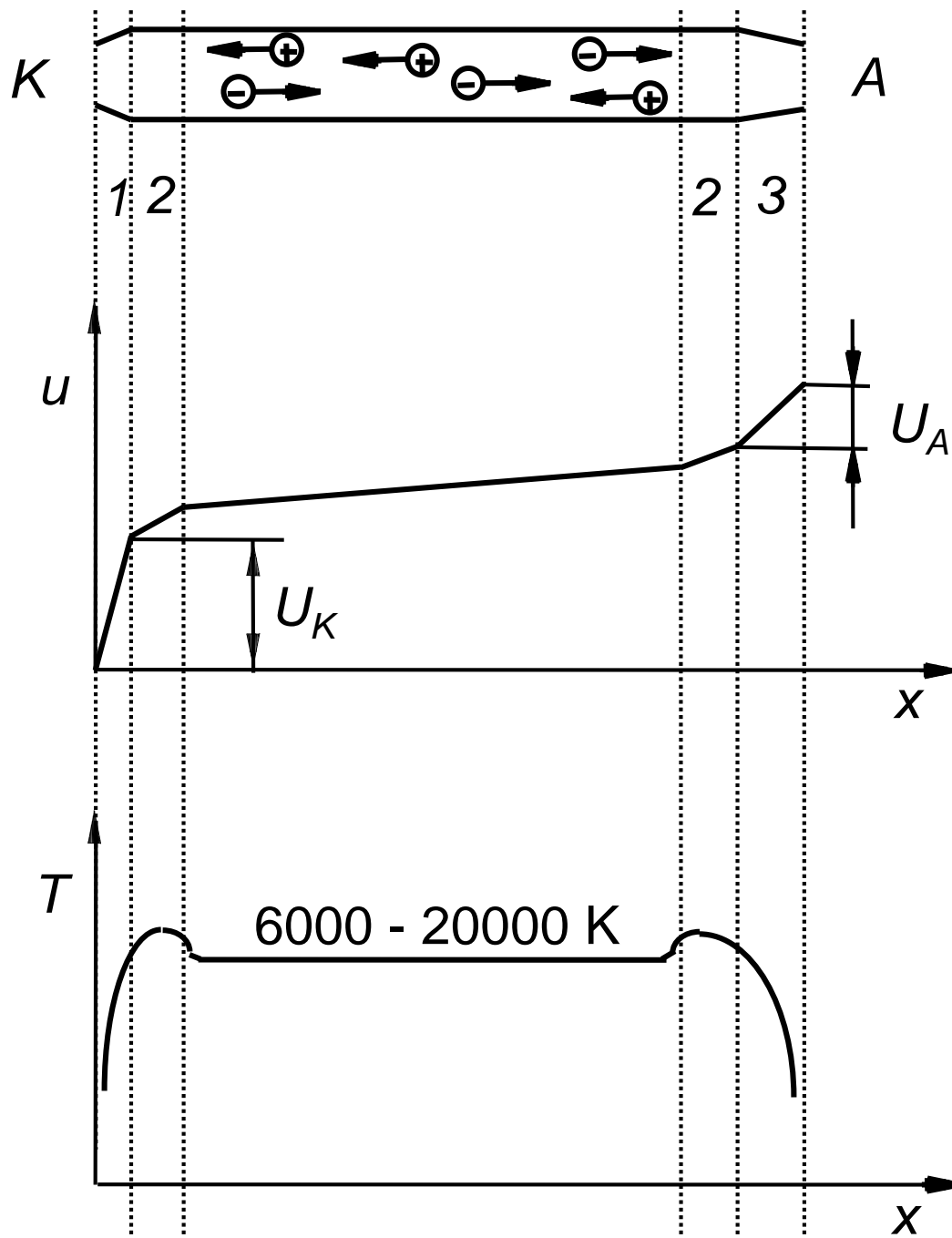
Minimalne wartości napięć ( $U_0$ ) i prądów ( $I_0$ ) warunkujące powstanie wyładowania łukowego

Materiał	$U_0$ [V]	$I_0$ [A]
Platyna	17	0,7 - 1,1
Złoto	15	0,3 - 0,4
Srebro	12	0,4
Wolfram	15 - 16	0,8 - 1,2
Miedź	12 - 13	0,4
Pallad	15 - 16	0,8 - 0,9
Węgiel	20	0,01 - 0,02
Żelazo	13 - 15	0,3 - 0,5
Nikiel	14	0,4 - 0,5

### Łuk przy otwieraniu zestyku:

- siła docisku styków maleje szybko,
- rośnie rezystancja w miejscach styczności,
- prąd silnie nagrzewa powierzchnię styków,
- metal paruje,
- utrata metalicznej styczności,
- między stykami pojawia się silne pole elektryczne,
- rozpoczyna się jonizacja zderzeniowa,
- elektrony jonizują pary metali między stykami,
- dochodzi szybko do jonizacji lawinowej,
- zapala się łuk elektryczny krótki (kilka milimetrów),
- styki oddalają się,
- powstaje łuk długi o temperaturze  $6...20 \times 10^3$  K.

## Wyładowanie łukowe



Uproszczony obraz łuku elektrycznego:

$K$  - katoda,

$A$  - anoda,

1 - strefa katodowa,

2 - strefa przejściowa,

3 - strefa anodowa,

$u$  - rozkład napięcia,

$U_K$  i  $U_A$  - spadki napięcia w strefie katodowej i anodowej,

$T$  - temperatura rdzenia łuku.

### Strefa katodowego spadku napięcia:

- $U_K = 10...20$  V,
- spowodowana ładunkiem przestrzennym jonów dodatnich zjonizowanych w tej strefie i napływających z kolumny łuku,
- grubość strefy katodowej wynosi około  $0,01 \div 0,1$  mm.

### Podstawowe cząstki tworzące łuk:

- elektrony emitowane z elektrody ujemnej,
- dwa rodzaje emisji:
  - termoemisja po rozgrzaniu elektrody na skutek bombardowania jej jonami dodatnimi, przy dużym natężeniu pola elektrycznego,
  - autoemisja (emisja polowa) spowodowana dużym natężeniem pola elektrycznego ( $10^5...10^6$  V·cm<sup>-1</sup>) przy elektrodzie ujemnej.

### Strefa anodowego spadku napięcia:

- $U_A = 5...10 \text{ V}$
- dominują elektrony, jony odpływają do elektrody ujemnej,
- grubość strefy anodowej wynosi  $0,1 \div 1 \text{ mm}$ ,
- elektroda dodatnia spełnia rolę bierną, przyjmuje strumień elektronów.

### Kolumna łukowa:

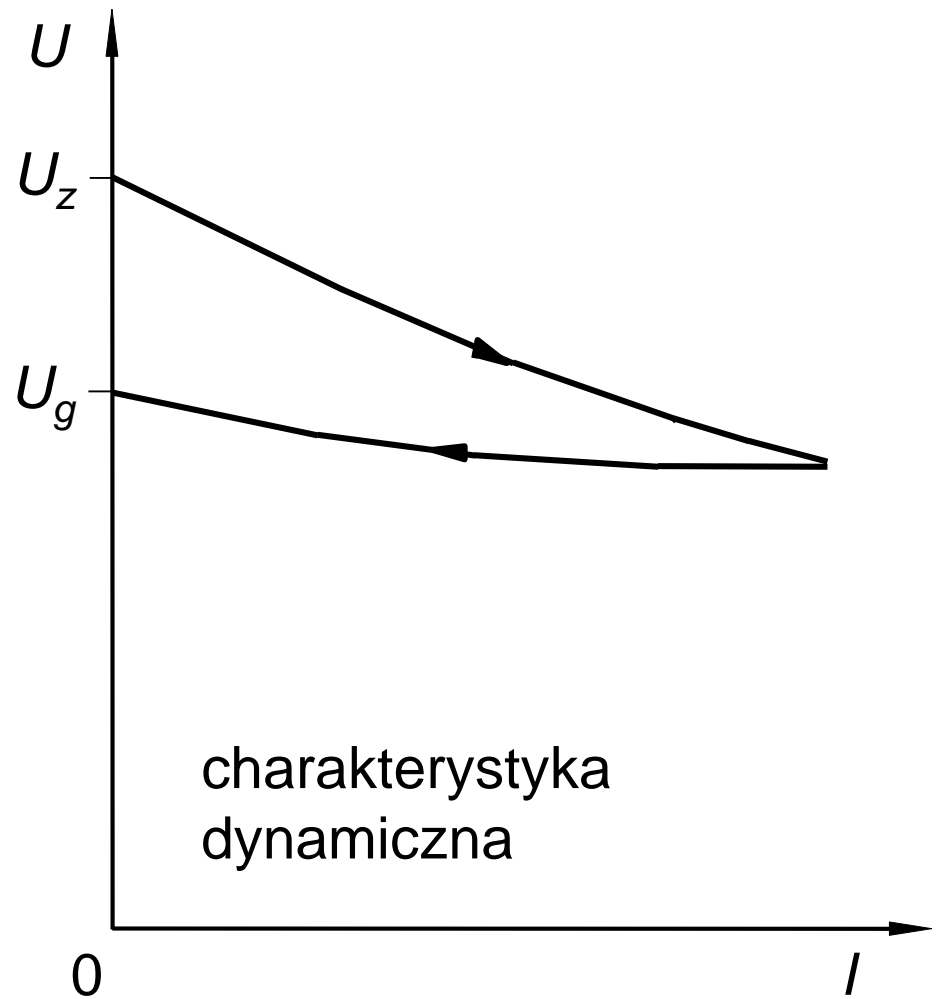
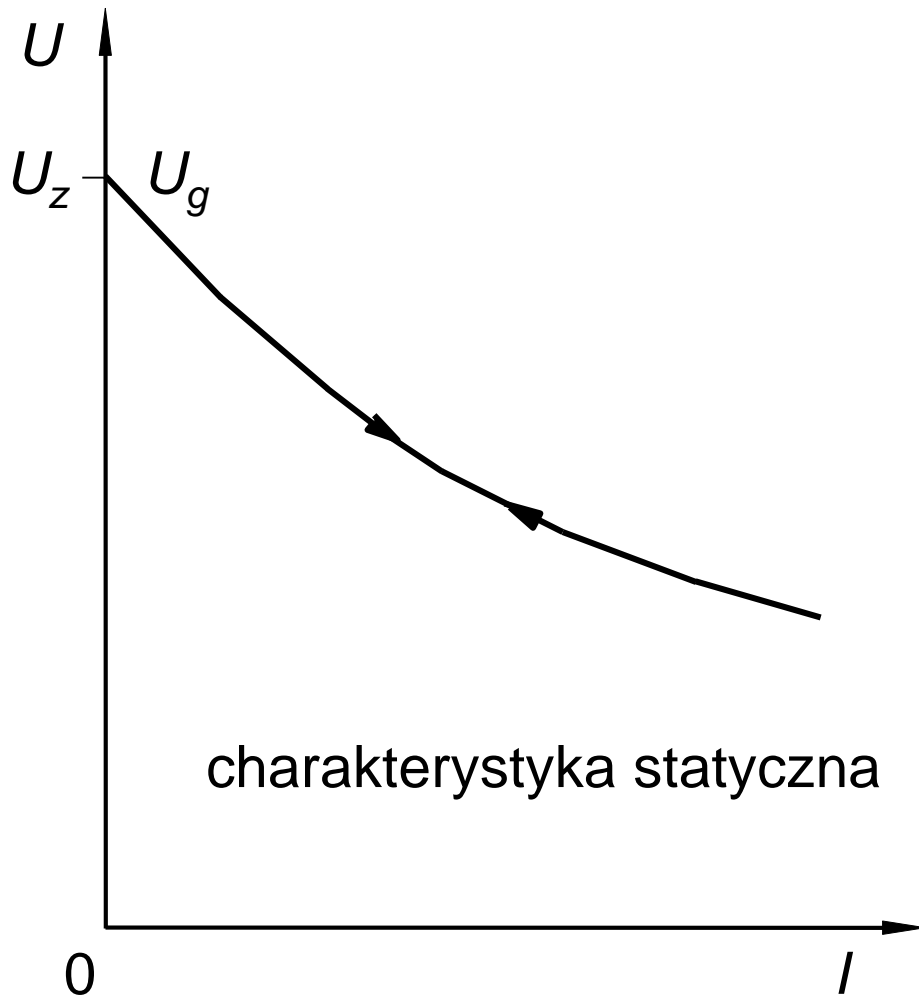
- środkowa, zasadnicza część łuku,
- łączy się ze strefą katodową i anodową przez strefy przejściowe,
- równomierna koncentracja jonów dodatnich i elektronów,
- stałe natężenie pola elektrycznego  $10 \div 400 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,
- temperatura kolumny łukowej  $6...20 \times 10^3 \text{ K}$  z powodu zderzeń sprężystych elektronów z cząsteczkami i jonami dodatnimi.

## Charakterystyka łuku

Zależność napięcia łuku od prądu łuku:

- charakterystyka statyczna:
  - uzyskana przy bardzo powolnych zmianach prądu łuku,
  - równowaga energii dostarczanej do łuku i traconej przez łuk,
  - zależy od długości łuku i intensywności chłodzenia kolumny łukowej,
- charakterystyka dynamiczna:
  - uzyskana przy dużych prędkościach zmian prądu łuku,
  - ujawnia się wpływ bezwładności zjawisk zachodzących w kolumnie łukowej.





Charakterystyki prądowo-napięciowe łuku:

statyczna ( $|di/dt|$  nieco  $> 0$ ), dynamiczna ( $|di/dt| \gg 0$ );

$U_z$  - napięcie zapłonu łuku,  $U_g$  - napięcie gaśnięcia łuku

## Łuk prądu przemiennego:

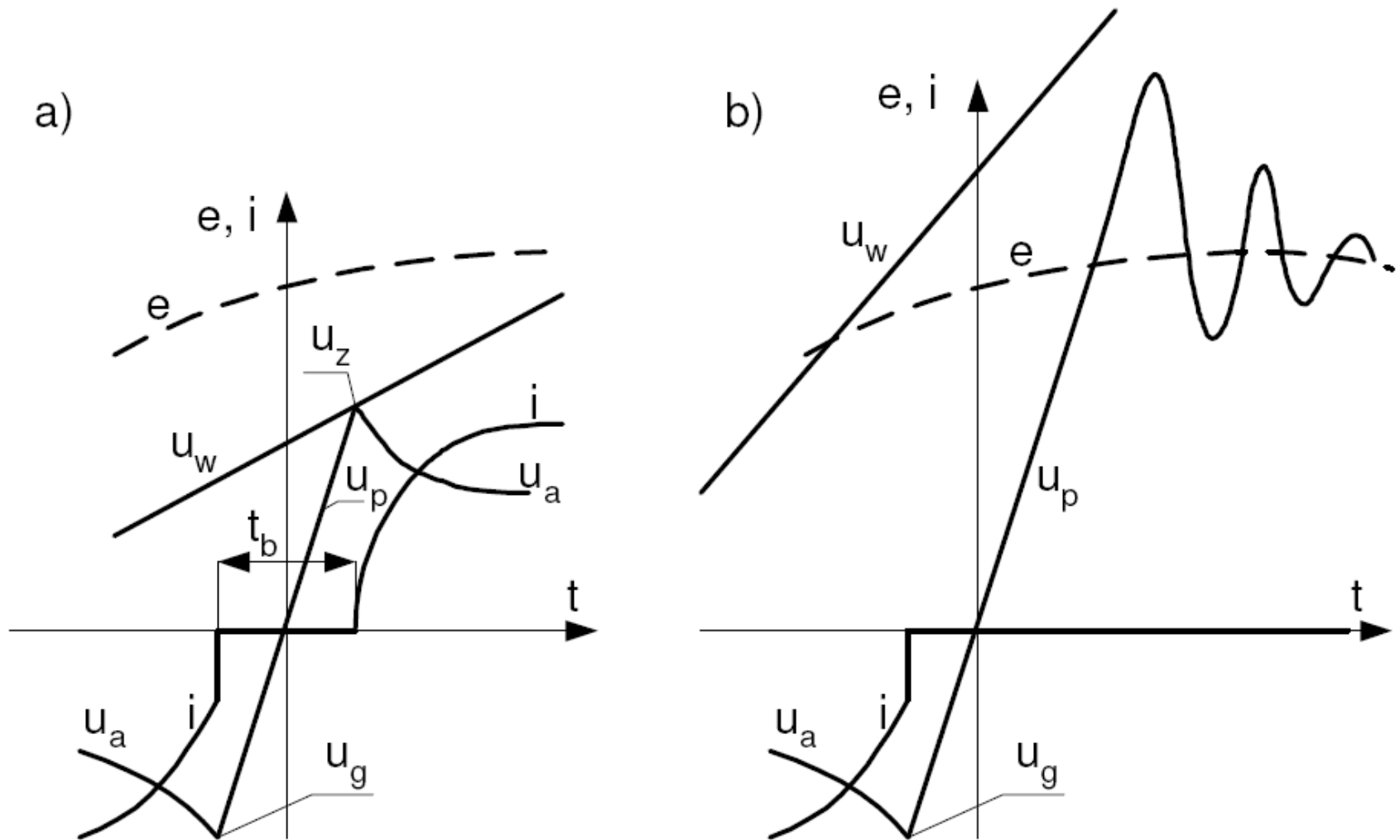
- prąd co pół okresu ma wartość chwilową równą zero,
- prąd zmienia kierunek przepływu,
- łuk zapala się przy napięciu zapłonu ( $U_z$ ),
- łuk gaśnie przy napięciu gaśnięcia ( $U_g$ ),
- dla prądu przemiennego  $|di/dt| \gg 0$ , charakterystyka dynamiczna,
- napięcie gaśnięcia jest niższe od napięcia zapłonu łuku.

## Obwód prądu przemiennego czysto rezystancyjny:

- napięcie zasilające jest w fazie z napięciem i prądem łuku,
- korzystne warunki gaszenia łuku,

## Obwód prądu przemiennego z przewagą reaktancji indukcyjnej:

- przy przejściu prądu przez zero napięcie ma dużą wartość,
- warunki gaszenia łuku niekorzystne,
- krótszy czas przerwy bezprądowej.



Przebiegi prądu i napięcia podczas gaszenia łuku prądu przemiennego:

a) przy ponownym zapłonie łuku,

b) przy skutecznym wyłączeniu obwodu;

$e$  – przebieg siły elektromotorycznej źródła,

$u_w$  – przebieg wzrostu wytrzymałości przerwy połukowej,

$u_p$  – przebieg napięcia powrotnego na stykach

$u_z$ ,  $u_g$  – napięcia odpowiednio: zapłonu i gaszenia łuku,

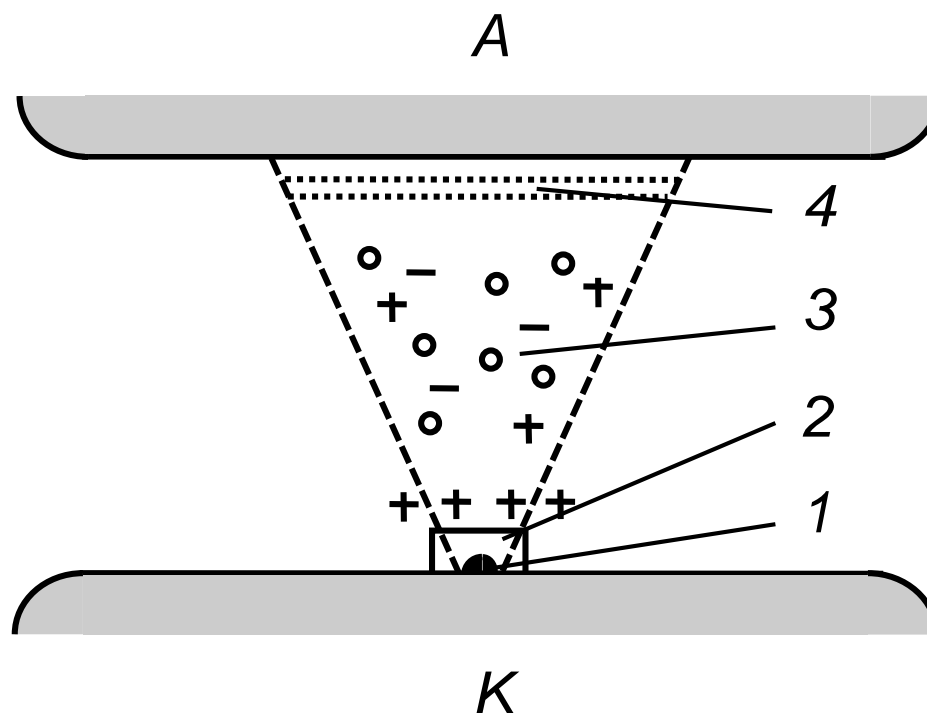
$t_b$  – czas trwania przerwy bezprądowej.

## Wyładowanie elektryczne w próżni

Jest możliwe dzięki zjonizowaniu atomów metali odparowanych z elektrod przez sam proces wyładowania.

Podstawowe etapy rozwoju:

- elementarne łuki równoległe (do kilku tysięcy amperów),
- łuk ściągnięty (powyżej 10 kA).



Uproszczony model łuku próżniowego elementarnego:

$A$  - anoda,  $K$  - katoda, 1 - plamka katodowa,  
2 - stopa katodowa, 3 - strefa plazmowa, 4 - strefa przyanodowa

## Łuki elementarne:

- nie są stabilne (prąd pojedynczych łuków dochodzą do 500 A),
- plamki katodowe poruszają się z dużą prędkością,
- ruch plamek jest wymuszony przez pole magnetyczne wytworzone przez przepływający prąd,
- plamki zatrzymują się w miejscach silnej emisji elektronów i dobrego odprowadzania ciepła,
- zgaszenie jednej plamki powoduje wzrost prądu innych plamek,
- co może prowadzić do podziału niektórych z nich,
- liczba plamek katodowych zmienia się w zależności od zmian wartości chwilowych prądu łuku,
- czas zaniku i tworzenia się plamek jest rzędu mikrosekund.

### Katodowa stopa łuku:

- strefa ładunku przestrzennego:
  - koncentracja cząstek obojętnych i jonów,
  - przewaga jonów dodatnich,
  - dodatnie pole elektryczne o dużym natężeniu,
  - emisja elektronów z plamki katodowej,
  - przyspieszanie elektronów w tym polu elektrycznym,
- strefa jonizacji:
  - elektrony jonizują cząstki par metali.

### Strefa plazmowa:

- kształt stożka, wierzchołek dotyka plamki katodowej,
- podstawa oparta na anodzie,
- przestrzeń plazmowa: elektrony, jony i cząsteczki obojętne, wyrzucane ze strefy jonizacji poruszają się ku anodzie,
- w plazmie  $E$  jest niewielkie,
- w plazmie jony nie zderzają się z innymi cząstkami,
- cząsteczki obojętne i jony dodatnie osadzają się na anodzie.

Strefa przyanodowa:

- niewielki anodowy spadek napięcia,
- gromadzące się elektrony są stale neutralizowane przez dopływające jony dodatnie.

Gaśnięcie łuku próżniowego:

- opadająca część sinusoidy prądu
- zmniejsza się liczba plamek katodowych
- zmniejsza się średnia wartość prądu w plamkach
- łuk jest stabilny przy minimum jednej plamce katodowej
- utrata stabilności łuku – charakterystyczne wartości prądu:

wolfram	40 A
---------	------

miedź	18 A
-------	------

srebro	12 A
--------	------

bismut	1,2 A
--------	-------

antymon	0,8 A
---------	-------

- niestabilny łuk generuje składową nieustaloną napięcia o dużej amplitudzie i częstotliwości
- łuk gaśnie przy wartości prądu nazywanej prądem ucięcia.

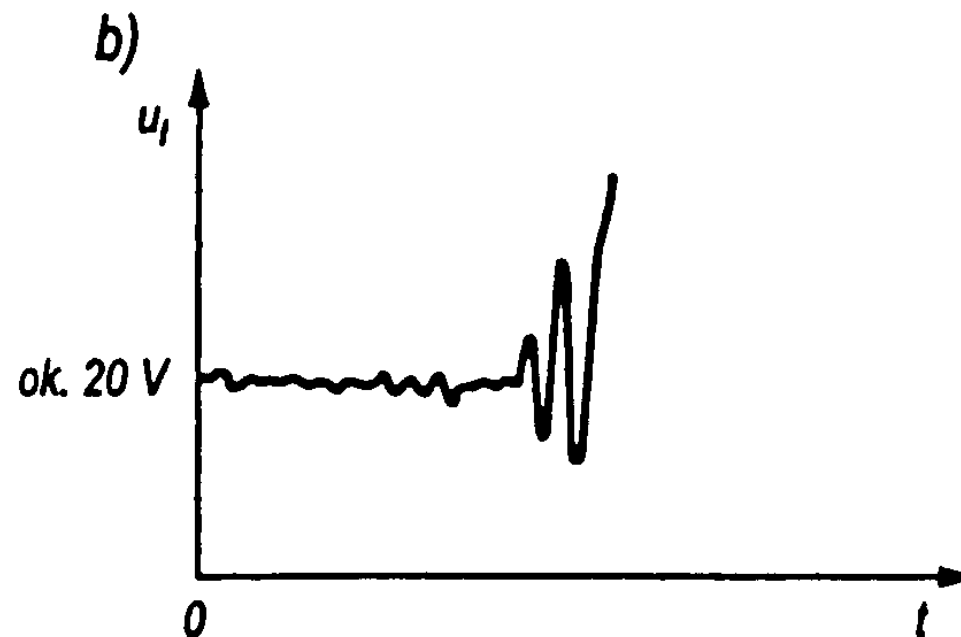
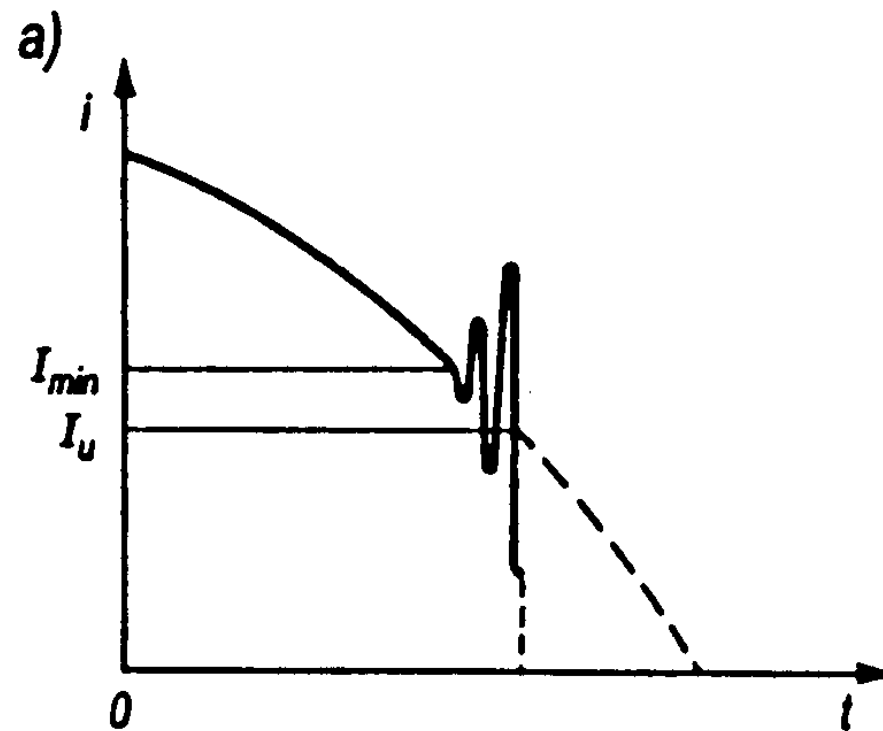
## Gaśnięcie łuku próżniowego:

- opadająca część sinusoidy prądu,
- zmniejsza się liczba plamek katodowych,
- zmniejsza się średnia wartość prądu w plamkach,
- łuk jest stabilny przy minimum jednej plamce katodowej,
- utrata stabilności łuku – charakterystyczne wartości prądu:

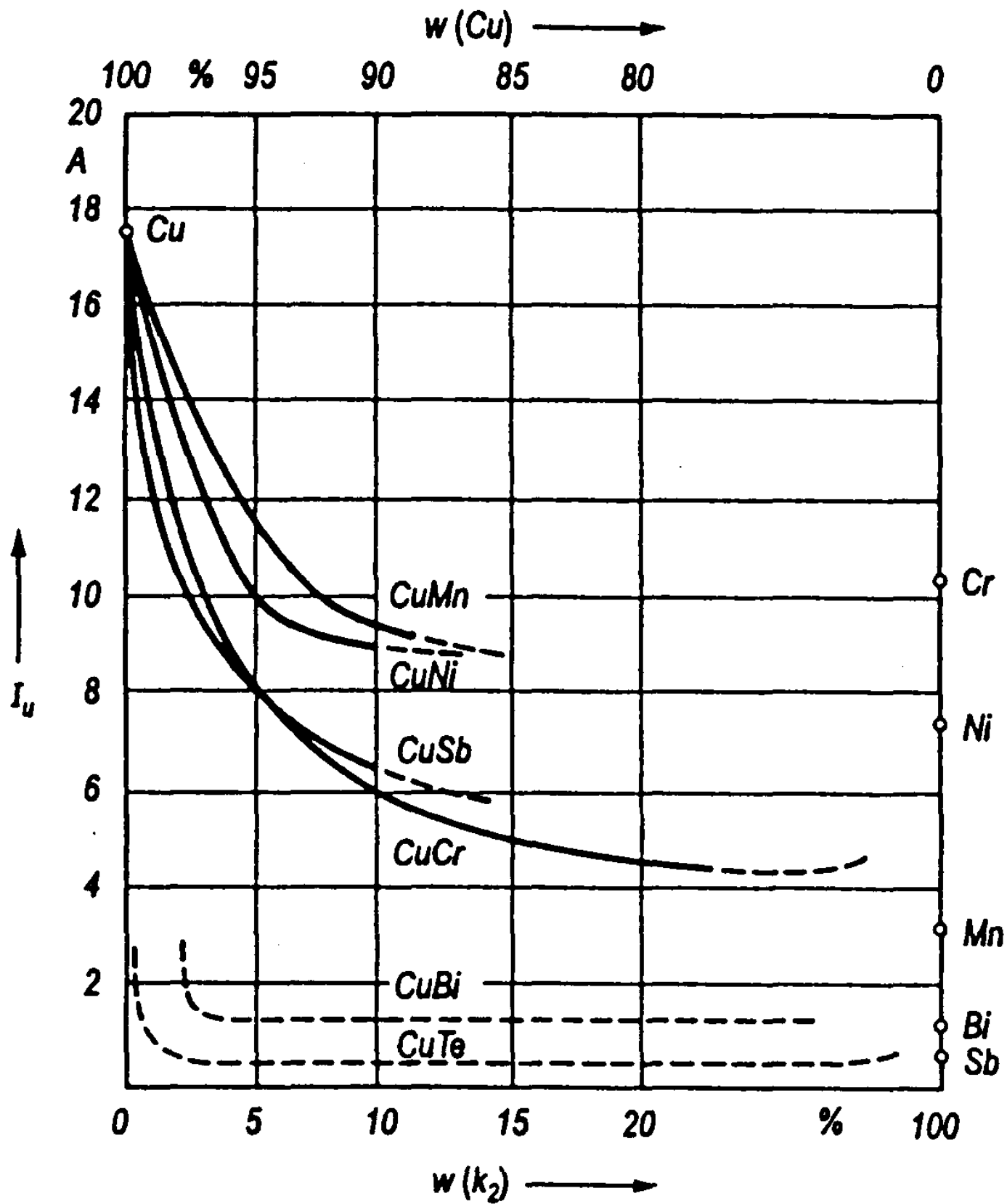
wolfram	40 A
miedź	18 A
srebro	12 A
bismut	1,2 A
antymon	0,8 A

- niestabilny łuk generuje składową nieustaloną napięcia o dużej amplitudzie i częstotliwości,
- łuk gaśnie przy wartości prądu nazywanej prądem ucięcia.





Przebiegi prądu i napięcia łuku próżniowego w pobliżu przejścia prądu przemiennego przez zero;  $I_{min}$  - minimalny prąd stabilnego palenia się łuku,  $I_u$  - prąd ucięcia



Wartości prądów ucięcia stopów dwuskładnikowych

## Gaszenie łuku w łącznikach prądu przemiennego

### Warunki efektywnego gaszenia łuku elektrycznego:

- *zapewnić intensywne odbieranie ciepła z kanału łukowego przed naturalnym przejściem prądu łuku przez zero,*
- *zapewnić skuteczną dejonizację kanału połukowego, dla szybkiego narastania wytrzymałości przerwy między stykami.*

### Miara skuteczność chłodzenia kanału łukowego:

- jego rezystancja w chwili przechodzenia prądu przez zero.

### Czynniki zwiększające rezystancję kanału łukowego:

- intensywny odbiór energii z kanału łukowego,
- mała wartość cieplnej stałej czasowej łuku,
- duża długość kanału łukowego.

### Szybkość narastania wytrzymałości przerwy między stykami zależy od:

- rezystancji łuku przed jego zgaśnięciem,
- zależy od szybkości obniżania temperatury kanału połukowego.

## Łuk krótki - odzyskiwanie wytrzymałości

- utrata styczności styków.
- zaczyna narastać napięcie powrotne między stykami,
- elektrony przemieszczają się w kierunku elektrody dodatniej,
- przy elektrodzie ujemnej powstaje w ciągu około  $1 \mu\text{s}$ , ładunek przestrzenny o wytrzymałości do 1000 V,
- obniża się temperatura całej przerwy,
- gaz przestaje przewodzić - napięcie rozkłada się na całej przerwie,
- skokowy wzrost wytrzymałości, zależny od długości przerwy,
- efekt ten jest wykorzystywany w łącznikach niskiego napięcia.

### Zjawiska wykorzystywane przy gaszeniu łuku:

- wydłużanie łuku,
- powiększanie napięcia na jednostkę długości łuku,
- zmniejszanie cieplnej stałej czasowej kanału łuku,
- zwiększanie wytrzymałości elektrycznej przerwy połukowej.

Wydłużanie łuku:

- wydmuch magnetyczny,
- wydmuch pneumatyczny.

Powiększenie gradientu napięcia łuku do jego podtrzymania:

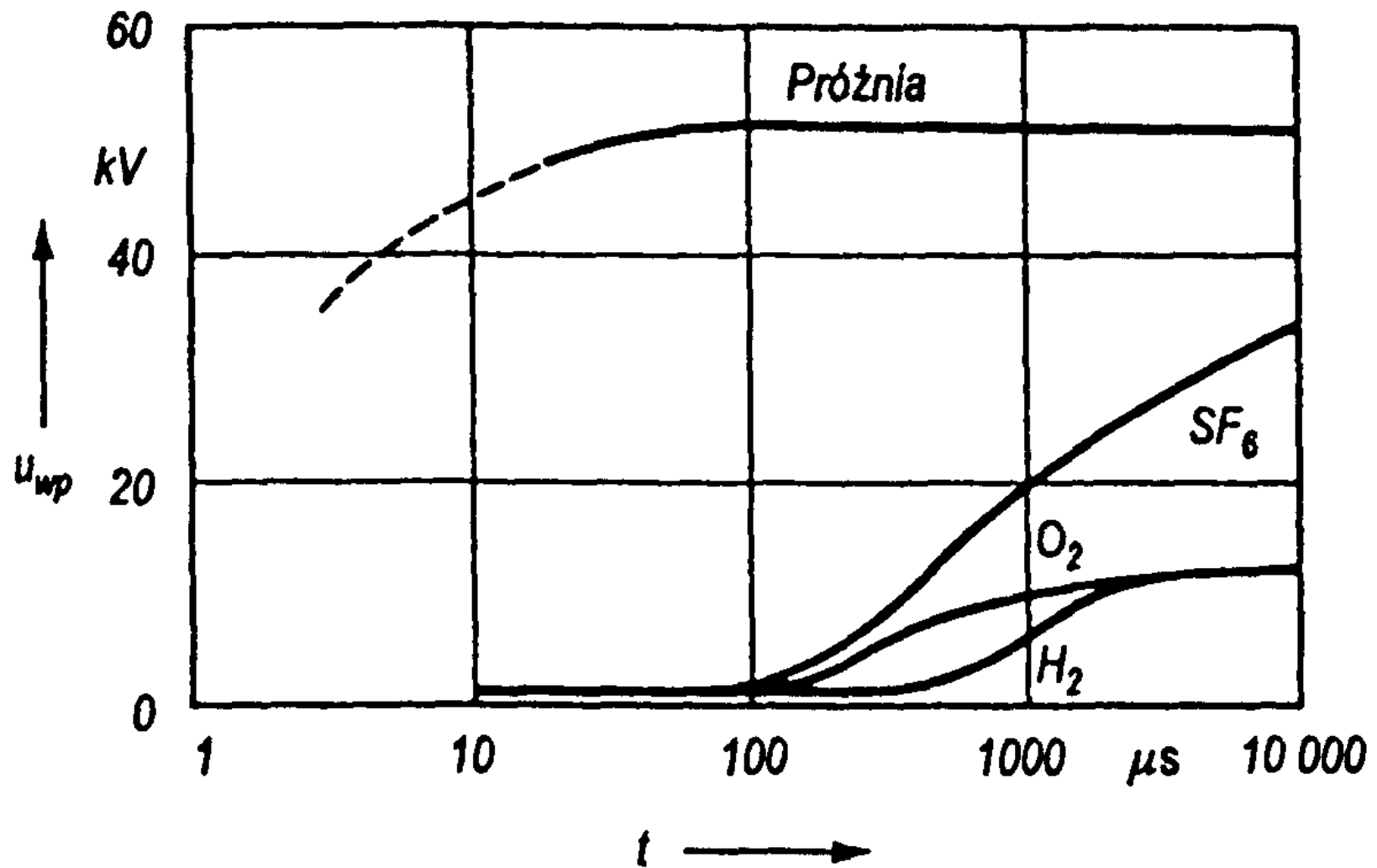
- stosowanie gazów o dużej przewodności cieplnej,
- odparowanie cieczy lub topienie materiałów stałych.

Zmniejszenie stałej czasową cieplnej łuku:

- przyspieszanie dyfuzji przez zwiększenie różnicy ciśnień,
- gazy o małej masie cząsteczek i dużej przewodności cieplnej.

Zwiększanie wytrzymałości elektrycznej przerwy połukowej:

- zwiększanie ciśnienia gazu,
- stosowanie próżni,
- stosowanie gazów elektroujemnych ( $\text{SF}_6$ ).



Zależność wytrzymałości elektrycznej przerwy połukowej próżni ( $10^{-4}$  Pa) oraz gazów przy ciśnieniu 0,1 MPa, od czasu

## Techniki gaszenia łuku w łącznikach prądu przemiennego

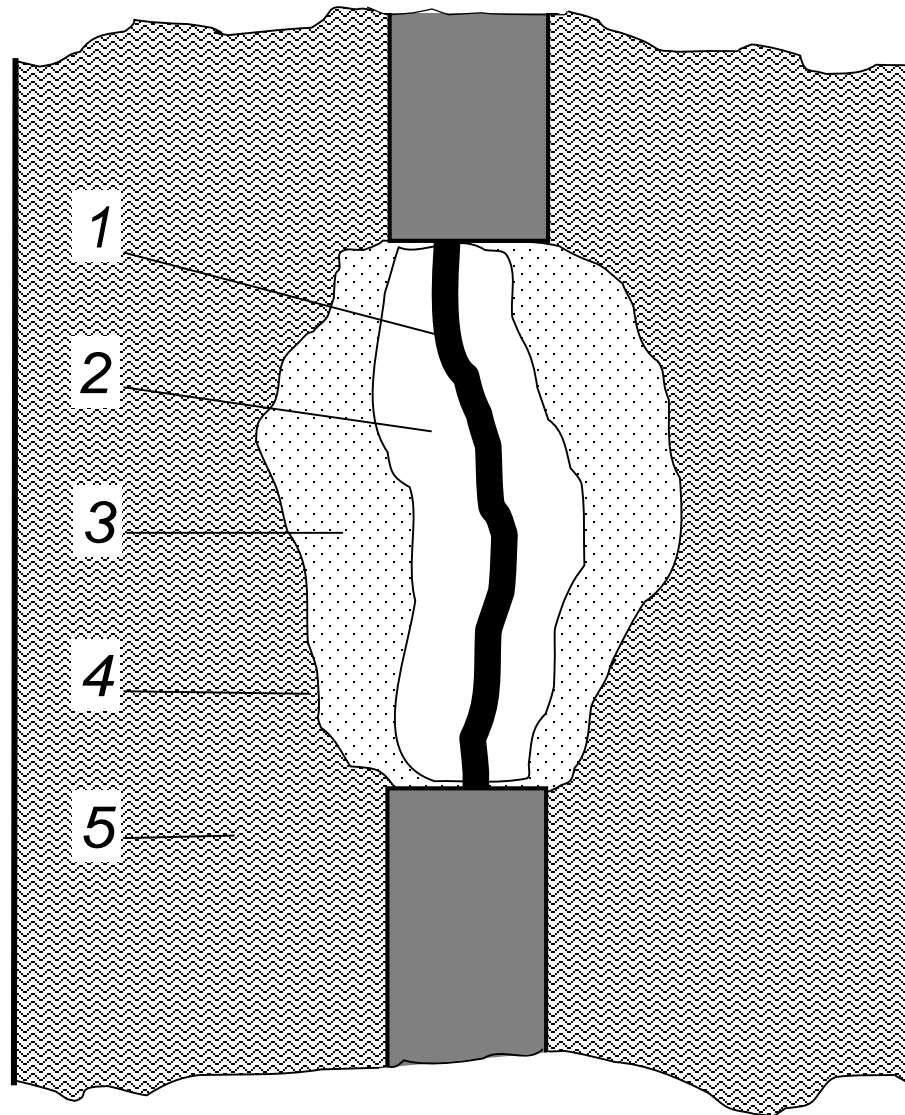
### Środowiska, w których pali się łuk:

- olej mineralny,
- powietrze,
- sześćfluorek siarki,
- próżnia,
- materiały gazowydmuchowe, płytki ceramiczne, piasek kwarcowy.

## Gaszenie łuku w oleju mineralnym

- wysoka temperatura łuku - parowanie i rozkład oleju,
- bańka gazowa: pary oleju, wodór, acetylen, metan,
- temperatura mieszaniny gazów: kilka tysięcy stopni,
- wodór ma bardzo wysoką przewodność cieplną, intensywnie odprowadza ciepło z powierzchni kanału łukowego,
- wartość prądu zbliża się do zera - efekt ekspansyjny:
  - wzmożenie parowania oleju przy malejącym ciśnieniu,
  - odrywanie kropeł oleju z jego powierzchni otaczającej bańkę gazową i wrzucanie ich do kanału łukowego,
  - intensywne chłodzenie łuku,
- zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero,
- dejonizacja kolumny połukowej przez zalanie jej olejem.





Wyładowanie łukowe w oleju;

- 1 - rdzeń łuku (10000 K),
- 2 - bańka gazowa (10000...500 K),
- 3 - silnie przegrzane pary oleju,
- 4 - warstwa oleju na granicy parowania,
- 5 - olej o temperaturze otoczenia.

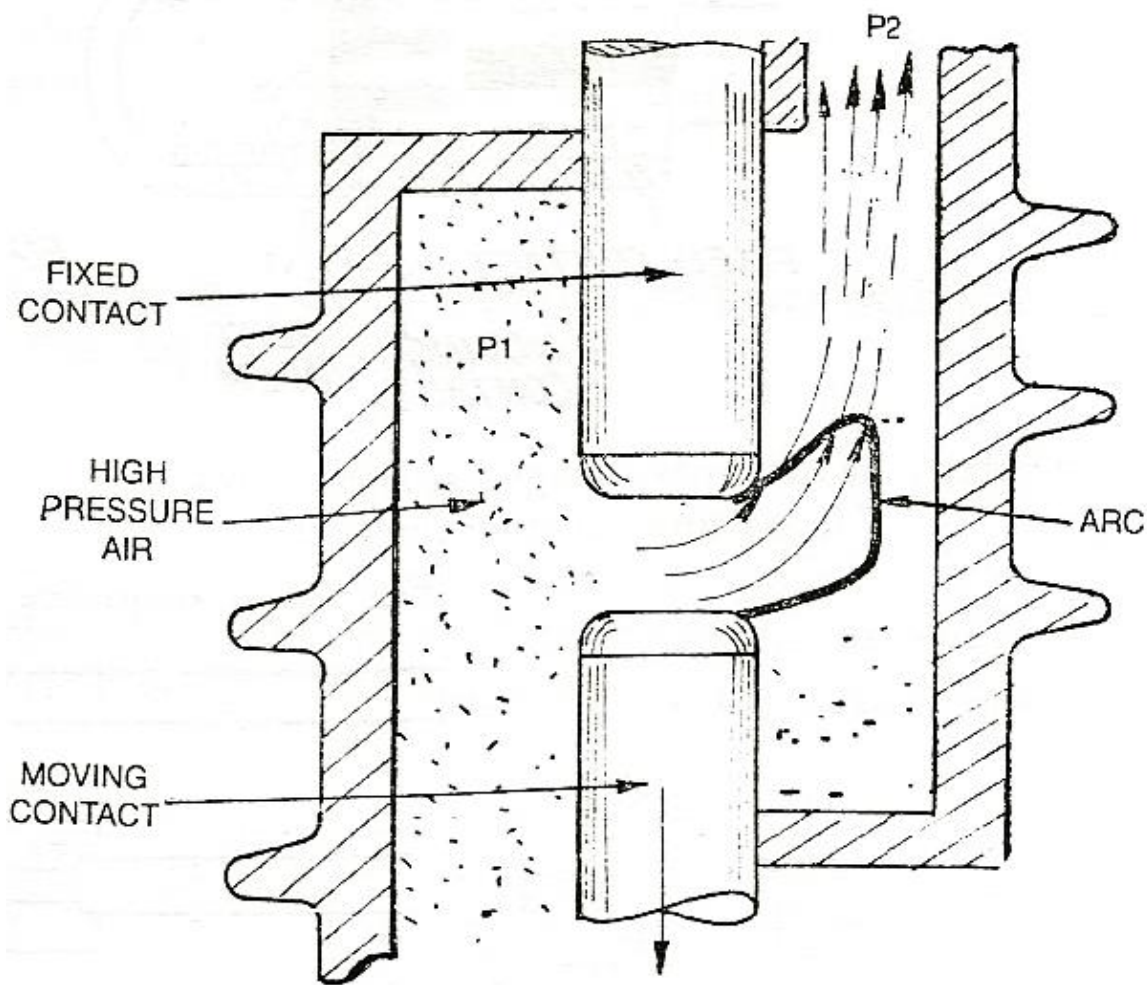
## Gaszenie łuku sprężonym powietrzem

### Wyłączniki powietrzne (pneumatyczne):

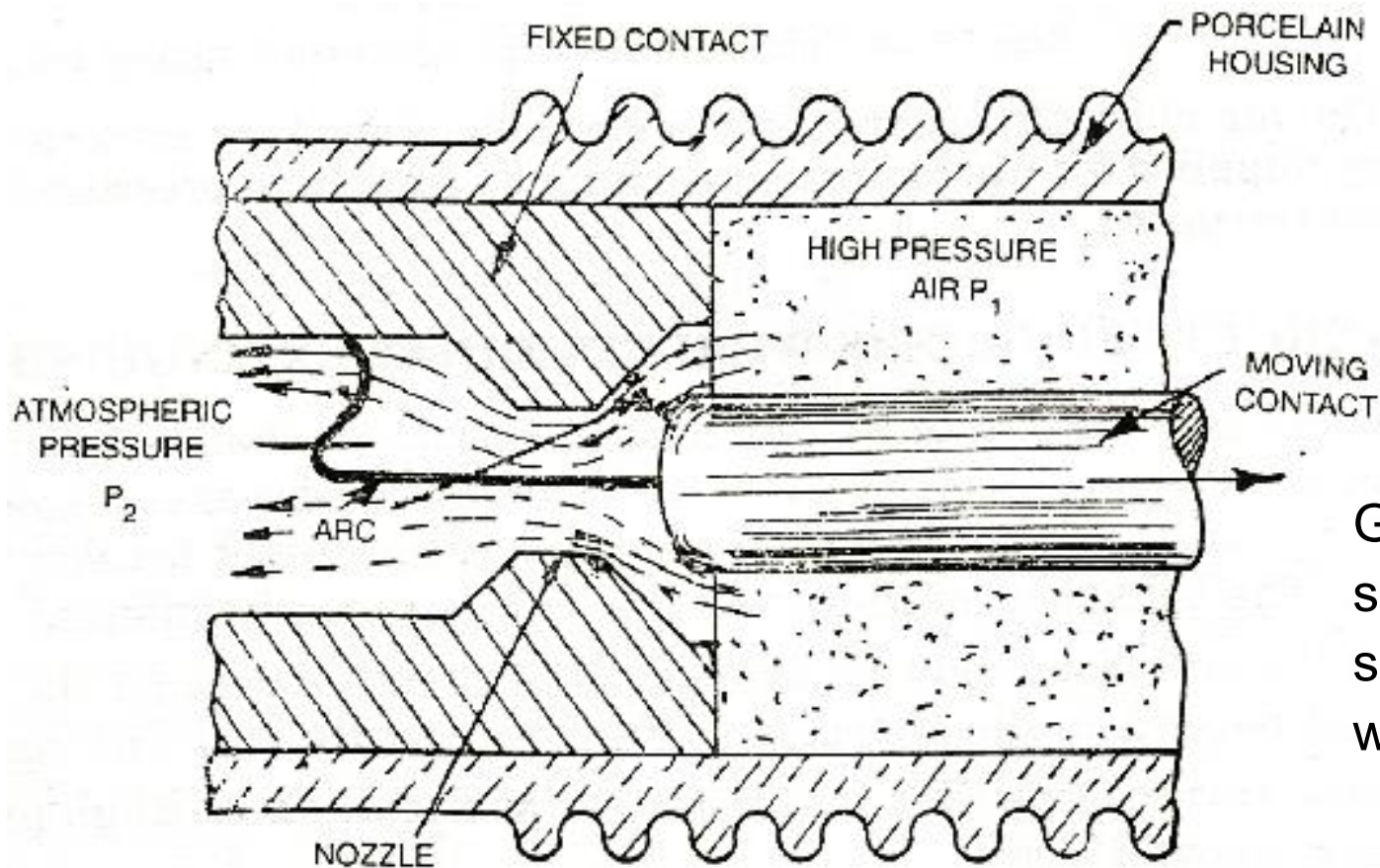
- ciśnienie sprężonego powietrza: 1...4 MPa,
- wzrost ciśnienia powietrza
  - wzrost jego wytrzymałości elektrycznej
  - malenie średnicy kanału
  - malenie cieplnej stałej czasowej łuku

### Gaszenie łuku:

- otwarcie zaworu zbiornika sprężonego powietrza,
- rozejście się styków – zapalenie się łuku'
- cząsteczki sprężonego powietrza wpadają do kolumny łukowej,
- są nagrzewane, jonizowane i wyrzucane z łuku,
- łuk jest intensywnie chłodzony i dejonizowany (azot ma największą przewodność cieplną przy ok. 7500 K),
- gradient napięcia łuku dochodzi do  $200 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,
- zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero.



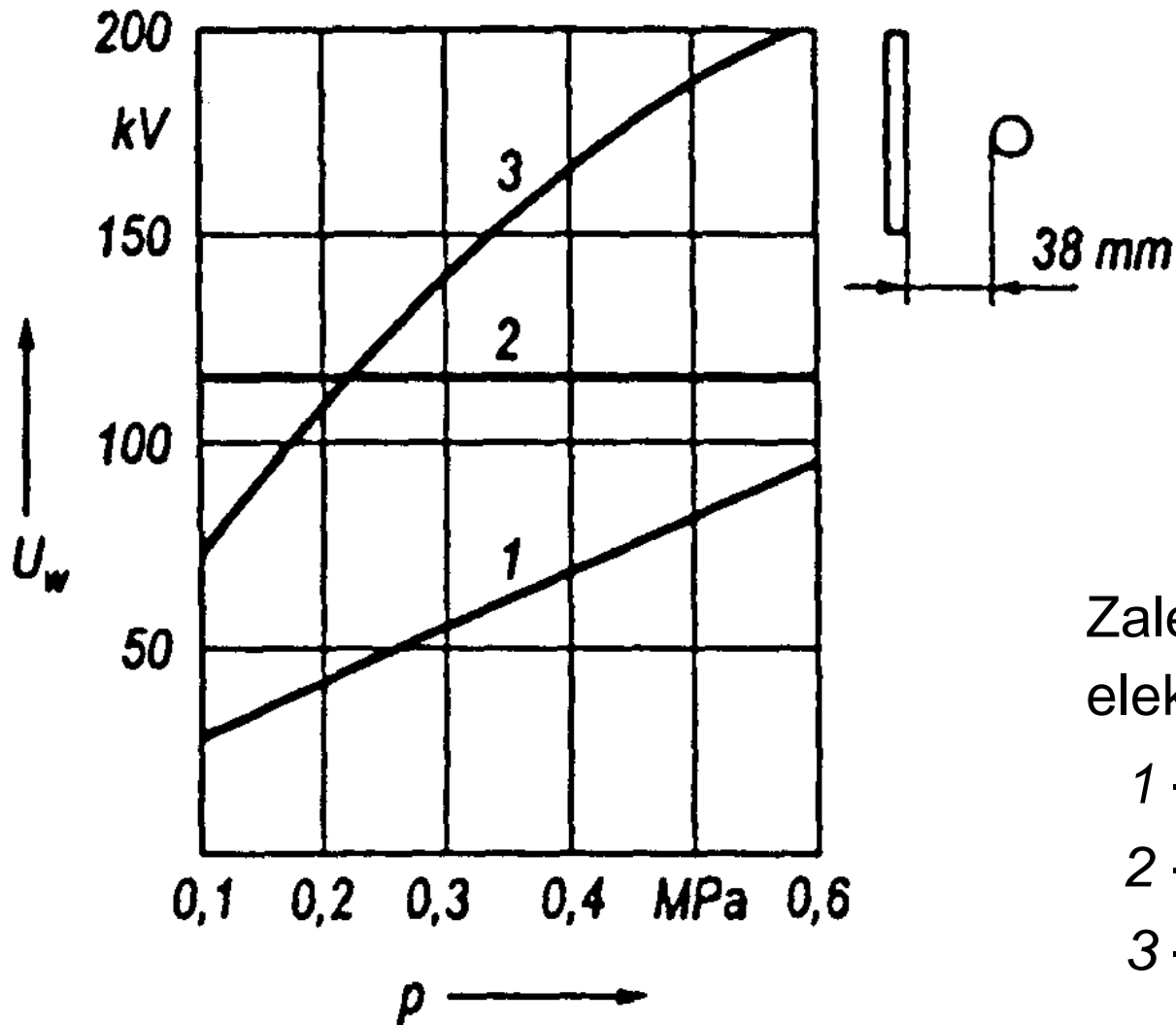
Gaszenie łuku  
sprężonym powietrzem;  
strumień powietrza  
poprzeczny do łuku



Gaszenie łuku  
sprężonym powietrzem;  
strumień powietrza  
wzdłuż łuku

**Sześćciofluorek siarki (SF<sub>6</sub>):**

- produkt przemysłowej syntezy fluoru i siarki,
- trwały do temperatury 500°C,
- bezwonny, duża gęstość (6,4 kg·m<sup>-3</sup>),
- dysocjuje do poziomu pojedynczych atomów,
- największa wartość przewodności cieplnej przy ok. 3000 K,
- wysoka przewodność elektryczna zjonizowanego gazu SF<sub>6</sub>,
- łatwe zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero,
- dobre właściwości izolacyjne - gaz elektroujemny,
- atomy fluoru wychwytyją swobodne elektrony,
- wytrzymałość elektryczna ok. 2,5-krotnie większa od wytrzymałości powietrza przy tym samym ciśnieniu.



Zależność wytrzymałości elektrycznej od ciśnienia:

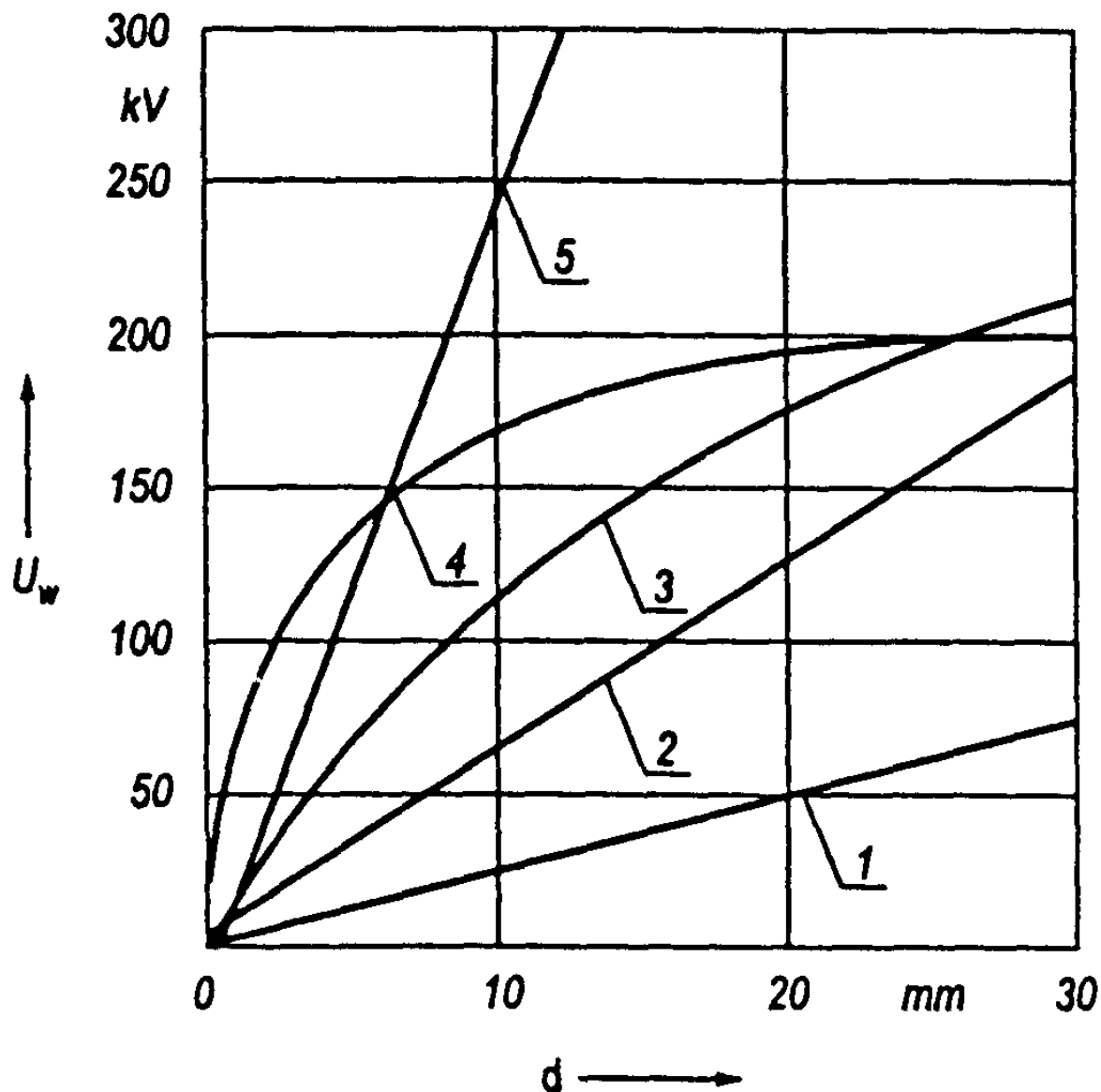
- 1 - powietrza,
- 2 - oleju,
- 3 - sześćfluorku siarki.

### Gaszenie łuku w $SF_6$ :

- chłodzenie łuku przez dysocjację  $SF_6$  i przewodzenie,
- osłabienie jonizacji przez dużą przewodność plazmy,
- zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero,
- dejonizacja kolumny połukowej, wychwyt elektronów,
- synteza  $SF_6$ .

## Gaszenie łuku w próżni:

- zbliżanie się prądu łuku do zera,
- zmniejszanie się ciśnienia par metali,
- ucięcie prądu przed jego naturalnym przejściem przez zero,
- dejonizacja kolumny łukowej (dyfuzja jonów i elektronów).



Zależność wytrzymałości elektrycznej  $U_w$  od dielektryka i odstępu  $d$  między elektrodami:

- 1 - powietrze (0,1 MPa),
- 2 - SF<sub>6</sub> (0,1 MPa),
- 3 - olej,
- 4 - próżnia,
- 5 - SF<sub>6</sub> (0,5 MPa)

## Komory gaszeniowe z materiałami stałymi

### Komory otwarte:

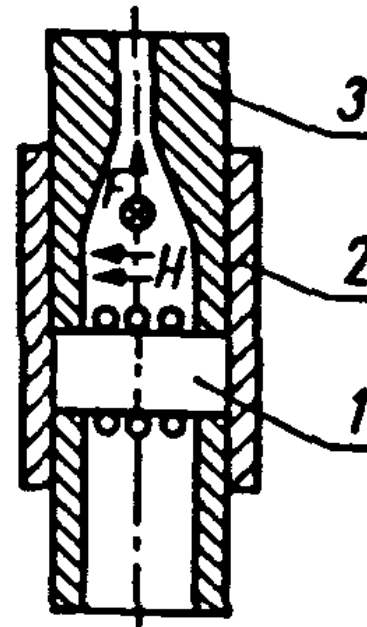
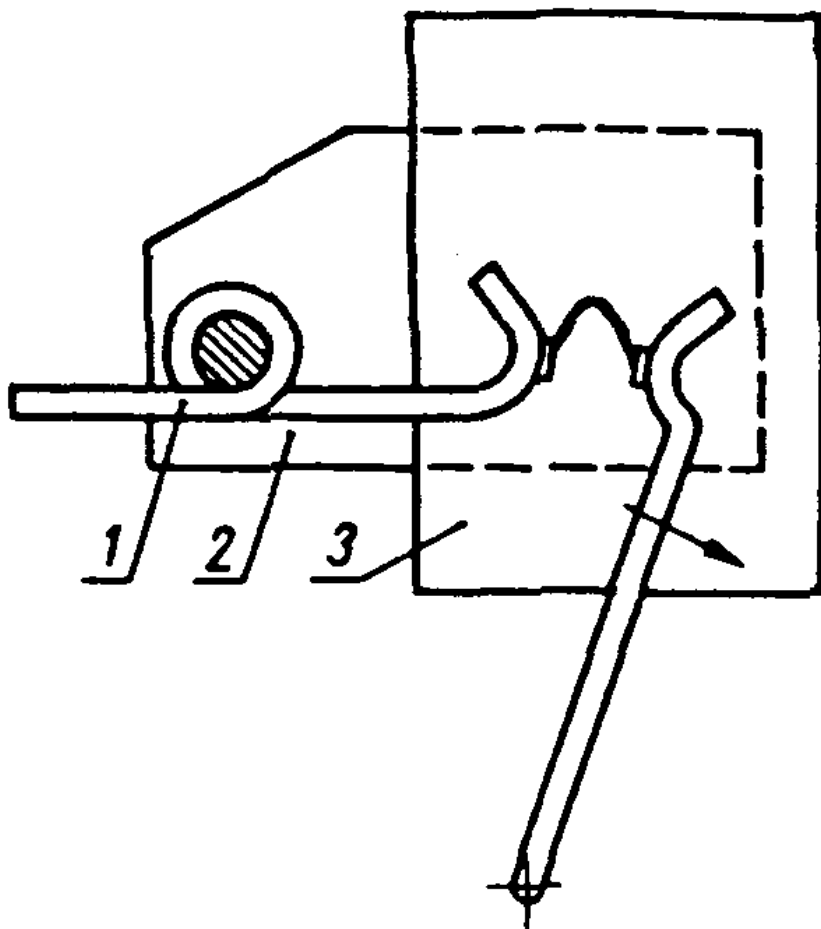
- stosowane w łącznikach mgneto- i gazowydmuchowych WN:
  - komory magnetowydmuchowe z niegazujących materiałów ceramicznych,
  - komory gazowydmuchowe ze szkła organicznego, fibry, tworzyw poliamidowych,
- stosowane w łącznikach niskiego napięcia:
  - komory gaszeniowe z płytkami dejonizującymi.

### Komory zamknięte:

- bezpieczniki topikowe z gasiwem kwarcowym.

### Gaszenie łuku w komorach magnetowydmuchowych:

- wydłużenie łuku w polu magnetycznym
- chłodzenie łuku przez styczność z płytkami ceramicznymi
- zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero
- dejonizacja przez osiadanie elektronów i jonów na płytkach



Prosta komora magnetowdmuchowa:

- 1 - jarzmo elektromagnesu z cewką,
- 2 - nabiegunniki elektromagnesu,
- 3 - ścianki komory gaszeniowej wąskoszczelinowej

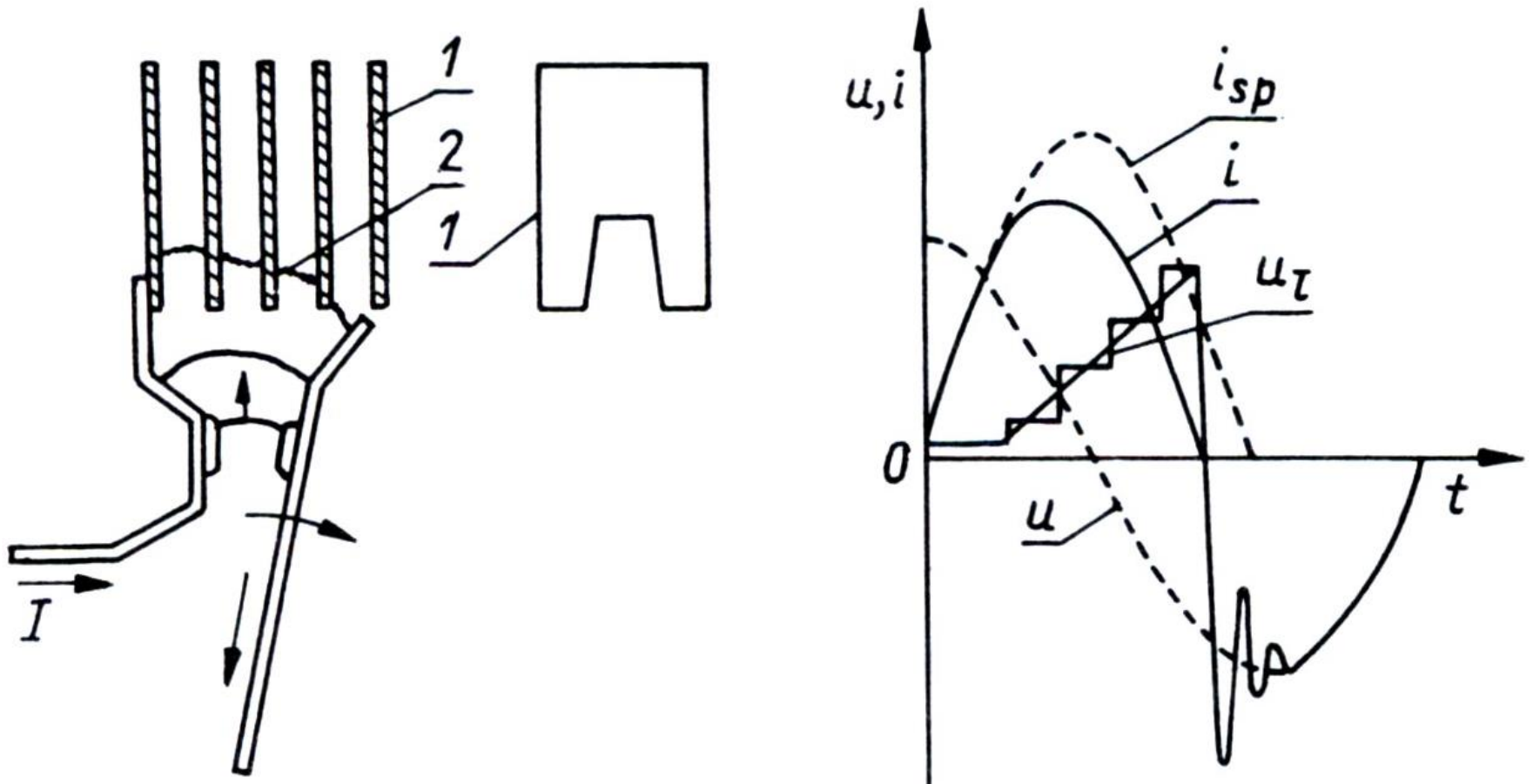
### Gaszenie łuku w komorach gazowdmuchowych:

- intensywny odbiór mocy z łuku w kanałach w materiale gazującym,
- zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero,
- wydmuch rozgrzanych zjonizowanych gazów.



## Gaszenie łuku w komorach z płytkami dejonizującymi:

- płytki z miedzi, mosiądzu lub stali, prostopadłe do łuku,
- łuk podzielony na łuki krótkie - intensywne chłodzenie,
- zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero,
- dejonizacja przez osiadanie elektronów i jonów na płytkach.



Szkic układu gaszeniowego z płytkami metalowymi; 1 - płytki, 2 - łuk elektryczny,  $u_l$  - napięcie łuku,  $i_{sp}$  - prąd spodziewany,  $i$  - prąd łuku,  $u$  - napięcie źródła zasilającego

### Gaszenie łuku w komorach z piaskiem kwarcowym:

- chłodzenie przez przewodzenie i topienie gasiwa,
- zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero,
- dejonizacja przez osiadanie elektronów i jonów na ziarnach piasku.

### Gaszenie łuku elektrycznego prądu stałego:

- brak naturalnego przejścia prądu łuku przez zero,
- zmniejszenie wartości prądu łuku po otwarciu styków przez:
  - zwiększanie rezystancji łuku przez jego wydłużenie,
  - zwiększanie rezystancji łuku przez intensywne chłodzenie,
  - nałożenie prądu przemiennego na prąd łuku,
  - stosowanie elementów *RLC* do wymuszenia niestabilnego palenia się łuku.