

# Radiacyjne sieciowanie przewodów i kabli



## Radiation cross-linking of wires and cables

Doc. dr hab. Grażyna Przybytniak

Dr inż. Andrzej Nowicki

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Warszawa



**XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna**

**ELASTOMERY 2009 Warszawa 18-20.11.2009**



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO





**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



## **DOTACJE NA INNOWACJE**

Przewody elektryczne nowej generacji sieciowane radiacyjnie

Nazwa beneficjenta: Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Wartość projektu: 1 981 209,22 PLN

Udział Unii Europejskiej: 1 684 027,84 PLN

Okres realizacji: 15 lutego 2009 – 31 grudnia 2012

**PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ  
Z EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO**



# Przewody i kable

- W latach 50-tych firma Raychem Corporation po raz pierwszy zastosowała sieciowanie kabli stosując promieniowanie jonizujące. Sieciowanie radiacyjne stosowano w stosunku do PE, PVC, EPR, PVF, EVA.
- Korzyści wynikające z sieciowania: wzrasta odporność na działanie wysokich temperatur, przeciążeń przewodów, wzrasta odporność na płomień, na ścieranie, chemikalia itd.
- Usieciowane kable są stosowane w przemyśle motoryzacyjnym i samolotowym, wojskowości, itp.





# Przewody i kable

Sieciowanie zapobiega skutkom zwarcia (izolacja nie ulega stopieniu)

Podczas kontaktu z płomieniem nie pali się i nie kapie, a także nie rozprzestrzenia ognia

Izolacja może być cieńsza



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



# Kable



- W kontaktach z producentami należy wyeliminować z zastosowań w procesie sieciowania te materiały polimerowe, które zawierają stosunkowo dużą zawartość stabilizatorów i antyutleniaczy, tj. środków inhibitujących procesy rodnikowe, a tym samym sieciowanie.



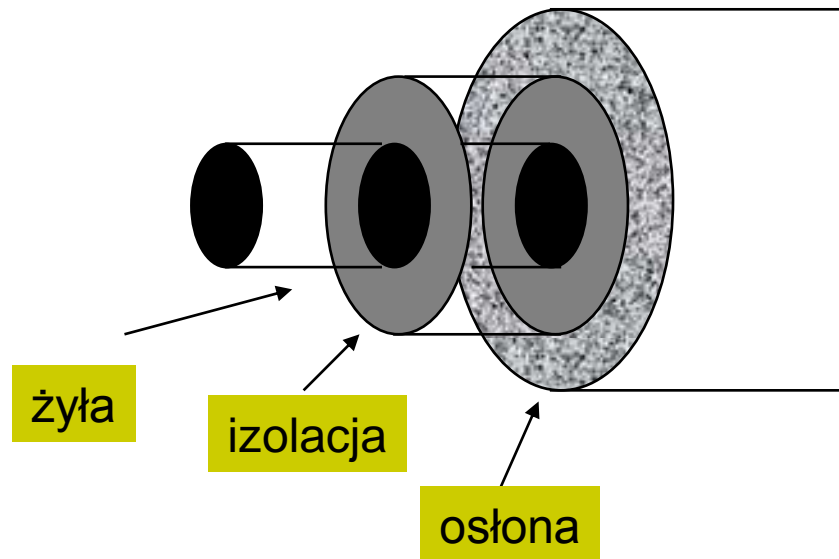
**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



# Kable (schemat)



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



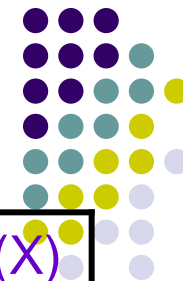
# Sieciowanie radiacyjne a degradacja radiacyjna



- Jeśli wydajność radiacyjna sieciowania -  $G(X)$  przekracza wydajność radiacyjną degradacji -  $G(S)$ , materiał może być sieciowany radiacyjnie.
- $G(X)$  i  $G(S)$  zmieniają się wraz z absorbowaną dawką. Zwykle  $G(S)$  wzrasta z dawką bardziej niż  $G(X)$ . Dlatego konieczne jest wyznaczenie dawki optymalnej.
- $G(X)$  oraz  $G(S)$  zależą również od temperatury i obecności tlenu.
- Typową dawką sieciującą mieści się w granicach 50-150 kGy.



# Wydajności radiacyjne sieciowania i degradacji



Polimer	Sieciowanie G(X)	Degradacja G(S)	G(S)/G(X)
LDPE	0,8-1,1	0,4-0,5	0,47
HDPE	0,5-1,1	0,4-0,5	0,56
PMMA	0,5	0,77	1,54
PMA	0,5	0,04	0,07
Nylon6	0,67	0,68	<b>1,01</b>
Nylon 6,6	0,50	0,70	<b>1,40</b>
PVA	0,30	0,07	0,23
PP ataktyczny	0,27	0,22	0,81
PP izotaktyczny	0,16	0,24	<b>1,50</b>
PS	0,019-0,051	0,0094-0,019	0,41
Guma	1,05	0,1-0,2	0,14
PB	5,3	0,53	0,10
PTFE	0,1-0,3	3,0=5,0	<b>20</b>
PiB	0,5	5	<b>10</b>
Celuloza	niskie	11	<b>wysokie</b>





# Sieciowanie polietylenu - kable



- Surowcem do prawie wszystkich PEX jest LDPE. Sieciowanie powoduje zmianę charakterystyki polimeru - z termoplastu zmienia się on w elastomer. Proces sieciowania można przeprowadzić w trakcie wytłaczania, albo po jego ukończeniu.
- Wg normy ASTM F 876-93 stopień usieciowania powinien wynosić pomiędzy 65 a 89%. Wyższy może prowadzić do kruchości polimeru i utraty odporności na uderzenie.
- Przewiduje się, że wyroby wykonane z PEX mogą być używane 50-200 lat.

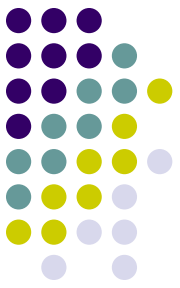




# Przewody i kable

- Udział metalu (miedzi)
- Z powodu dużej gęstości metal pochłania energię radiacyjną w większym stopniu niż polimer.
- Powierzchnia polimeru stykająca się z metalem łatwiej ulega degradacji oksydacyjnej.
- Wydzielanie wodoru na powierzchni





# Wzrost temperatury

- W czasie napromieniowania polimer absorbuje energię, które jest wyrażana jako dawka absorpcyjna.
- Wzrost temperatury wyraża równanie:
- $\Delta T = D / c$ 
  - D – dawka pochłonięta
  - c – ciepło właściwe
- Ciepło właściwe polimerów jest duże w porównaniu np. z metalami. Dlatego podczas radiacyjnego sieciowania kabli należy brać pod uwagę efekt termiczny



# Ciepła właściwe wybranych materiałów



	Ciepło właściwe J/g °C	Wzrost temperatury °C/kGy
Węgiel	0,71	1,41
Glin	0,90	1,11
Krzem	0,71	1,41
Tytan	0,52	1,92
Żelazo	0,44	2,27
<b>Miedź</b>	<b>0,38</b>	<b>2,63</b>
German	0,32	3,13
Srebro	0,24	4,26
Cyna	0,23	4,41
Tantal	0,14	7,14
Wolfram	0,13	7,69
Złoto	0,13	7,81
Ołów	0,13	7,69



# Ciepło właściwe polimerów i wzrost ich temperatury dla dawki absorpcyjnej 1 kGy

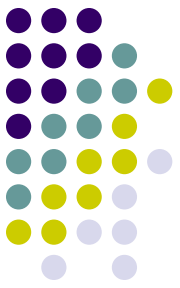


Polimer	Ciepło właściwe J/g °C	Wzrost temperatury deg/kGy
Nylon 6	1,67	0,60
Poliwęglan (maks.)	1,26	0,79
Poliwęglan (min)	1,17	0,85
Polietylen	2,30	0,43
Polimetakrylan metylu	2,09	0,48
Polipropylen	1,92	0,52
Polistyren	1,34	0,75
Politetrafluoroetylen	1,05	0,95
Polichlorek winylu	1,34	0,75



# Wpływ żyły

- Na procesy zachodzące na powierzchni międzyfazowej miedź-polimer mogą mieć wpływ następujące czynniki:
- emisja wodoru z polimeru,
- efekt termiczny (powierzchnia izolacji ulega ogrzaniu na skutek konwersji energii radiacyjnej w ciepłą zachodzącą w żyłę),
- zmiany korozyjne.
- ze wstępnych badań wynika, że powyższe negatywne zjawiska można ograniczyć, a nawet wyeliminować ograniczając efekty cieplne w żyłę miedzianej poprzez sterowanie parametrami wiązki elektronów oraz intensywnością chłodzenia.



# Efekt termiczny



Ze względu na znaczne różnice gęstości metalowych żył i organicznych powłok izolacyjnych, ilość zaabsorbowanej energii, a więc i efekty radiacyjne w strefach powłok znajdujących się w cieniu metalowych przewodów są ograniczone. Jednocześnie w strefach bocznych, po obu stronach żyły obserwuje się zwiększone pochłanianie energii w wyniku oddziaływania elektronów wtórnych, rozpraszanych na żyłę o wysokiej gęstości elektronowej.

Wpływ efektów rozproszenia jest tym większy, im wyższa jest gęstość elektronowa materiału żyły. Dlatego dla kabli o określonym przekroju żył wykonanych z aluminium należy oczekiwać relatywnie mniejszego rozrzutu dawek niż dla kabli o żyłę miedzianej, zgodnie ze stosunkiem gęstości elektronowych (w przybliżeniu stosunkiem ciężarów właściwych) obu metali.



# Przewody i kable



Skład izolacji	Zawartość / phr
PE	100
Hydral	25
Tlenek cynku	5
Silany	10
Antyutleniacz	2
TMPTMA/TMAC	1- 5





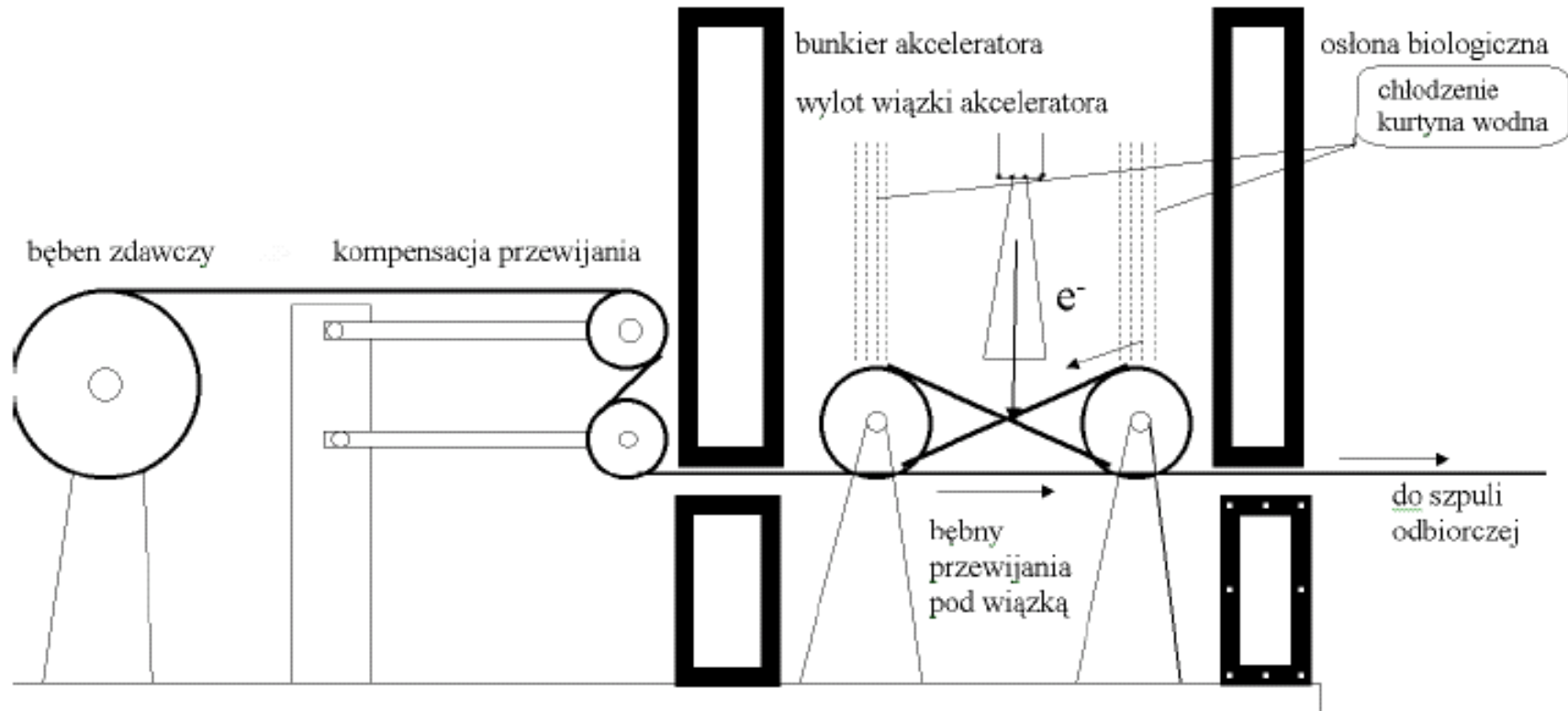


# Przewody i kable

- Środki opóźniające palenie – antypireny
- Hydral (hydrat tlenku glinu) w podwyższonej temperaturze uwalnia wodę.
- Silan – czynnik sprzęgający antypiren z matrycą polimerową
- TMPTMA (trimetylolopropanu trimetakrylan) – monomer wielofunkcyjny zwiększający efektywność sieciowania



# Urządzenie do przewijania przewodów pod wiązką



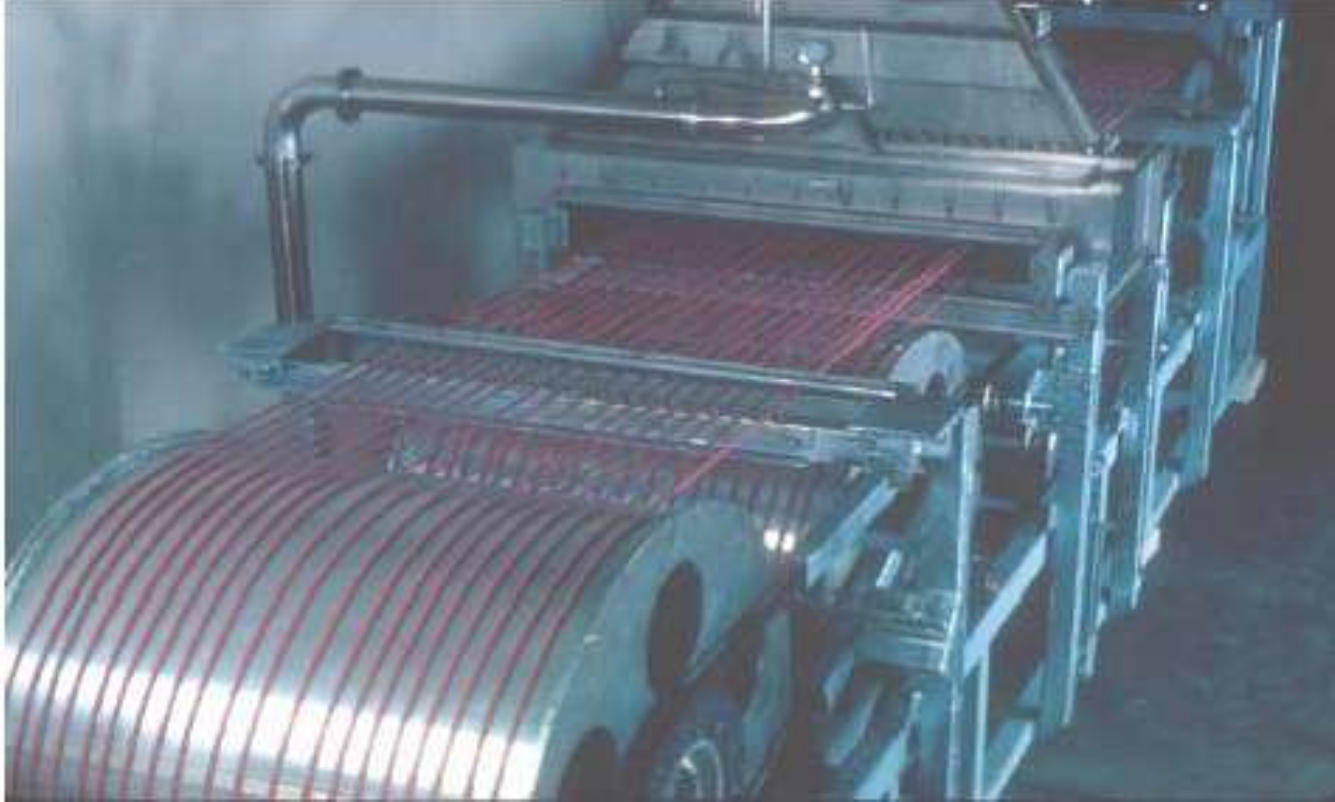
**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



# Przewody i kable



Transport kabli pod oknem akceleratora. Niewielkie skręcenie kabla pod wiązka umożliwia homogeniczne napromieniowanie



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



# Zestaw urządzeń do prowadzenia procesu ciągłego sieciowania



- Układ sterowniczy
- Stanowisko zdawcze
- Kompensatory
- Przewijarka
- Stanowisko odbiorcze
- Układ bezpieczeństwa
- Automatycznie sprzężone sterowanie akceleratora i urządzenia do przewijania
- Układ chłodzenia skorelowany z mocą akceleratora, szybkością przewijania przewodów, liczbą nawojów na bębnie



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



# Założenia wstępne

- Energia wiązki elektronów 0,7 – 2,0 MeV
- Moc wiązki 20 kW
- Szerokość przemiataania wiązki 800 mm
- Szerokość bębnow przewijarki – 700-750 mm
- Prędkość liniowa transportu kabla pod wiązką elektronów - ok. 2000 mm/min
- Liczba przejść kabla pod wiązką elektronów – ok.70 razy dla kabla o średnicy ok. 5 mm
- Dawka sieciująca 100 - 140 kGy, dawka średnia ok. 120 kGy
- Gęstość materiału izolacji ok. 0,95 g/cm<sup>3</sup>
- Zestaw urządzeń do prowadzenia procesu ciągłego



# Układ sterująco-kontrolny spełnia kilka funkcji:



- zasilanie w energię wszystkich urządzeń,
- regulowanie szybkości obrotowej i synchronizowanie zespołu odwijania, zespołu przewijania pod wiązką akceleratora oraz zespołu nawijania na szpulę odbiorczą,
- utrzymywanie stałej szybkości przewijania kabla,
- zabezpieczanie urządzeń przed awarią w nieprzewidzianych sytuacjach, np. zablokowania się kabla w urządzeniu,
- synchronizacja przesuwu kabla ze sterowaniem mocą wiązki z akceleratora w celu zapewnienia równomiernej mocy dawki na jednostkę długości kabla podczas całego procesu technologicznego oraz zapewnienie powtarzalności i odtwarzalności warunków napromieniowania wiązką elektronów.



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



# Dozymetria



- Rozkład dawek pochłoniętych będzie oznaczany spektrofotometrycznie przy użyciu dozymetrów foliowych z polichlorku winylu ( $\lambda_{\max}=398$  nm) lub trójoctanu celulozy. Błąd wskazań mieści się w granicach 5%.
- Aby uzyskać pełny obraz rozkładu dawki należy stosować różne położenia folii dozymetrycznych – na powierzchni, w strefach położonych za metalową żyłą i w strefach bocznych. Innym sposobem wykonania pomiaru jest ciasne owinięcie folii dozymetrycznej wokół przewodu. Przy takim sposobie postępowania po rozwinięciu folii można uzyskać obraz rozkładu dawki na powierzchni izolacji/powłoki.



# Ocena stopnia usieciowania



Zawartość frakcji żelowej, która pośrednio wskazuje na stopień usieciowania tworzywa jest oznaczana za metodą ekstrakcji we wrzącym ksylenie wg normy PN-EN-579 w aparacie Soxhlet'a. Sucha pozostałość oznaczana jest grawimetrycznie.

W przypadku materiałów zawierających napełniacze (np. sadzę) ich zawartość jest oznaczana przed napromieniowaniem, gdyż wspólnie z frakcją żelową będą one pozostawały po ekstrakcji we frakcji nierozpuszczalnej. Zawartość sadzy może być również oznaczana metodą analizy termogravimetrycznej.

Efekt znacznej stabilności termicznej uzyskuje się zwykle gdy stopień usieciowania tworzywa wynosi 60-80%,



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO





# Charakterystyka produktu



Powinny zostać przeprowadzone badania materiałowe usieciowanej izolacji oraz stan powierzchni międzyfazowej żyła – izolacja, oznaczone właściwości termiczne, chemiczne, mechaniczne i elektryczne usieciowanej izolacji, dotyczące następujących parametrów:

- praca w temperaturach od -40 do 125 °C,
- odporność na oleje (test oleju IRM 902 w temperaturze 100 °C przez 72 h),
- odporność na benzyny (test oleju IRM 903 w temperaturze 70 °C przez 168 h),
- wydłużenie i wytrzymałość izolacji  $\pm 30\%$  wartości przed starzeniem cieplnym,
- Nie rozprzestrzenianie płomienia, przykładowo wg norm PN-EN 60332-1-2:205, PN-EN 50266-2-4, IEC 60332-2-24,
- temperatura pracy długotrwałej 90 °C, podczas zwarcia 125 °C



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



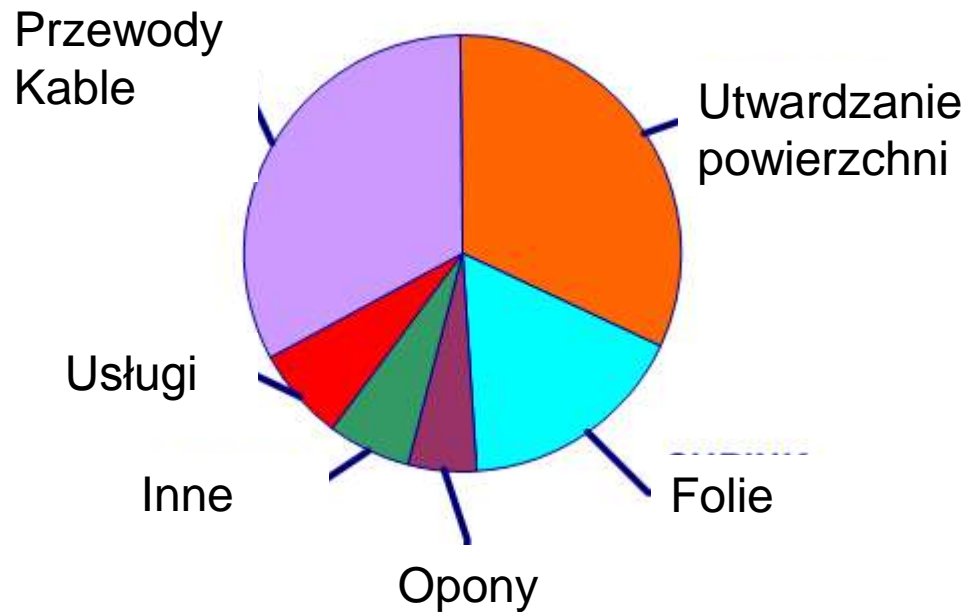
# Zasięg wiązki elektronów



Zastosowanie	Energia elektronów	Penetracja
Utwardzanie powierzchni	80 – 300 keV	0,4 mm
Folia	300 – 800 keV	2 mm
Przewody i kable	0,4 – 3 MeV	5 mm
Sterylizacja	3 – 10 MeV	38 mm



# Techniki radiacyjne



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO

