

Katarzyna Kaczorek-Chrobak, MScEng, MPhil

Thesis entitled: *Electric cables used in buildings – dependency of fire properties on constructional and material parameters*

Supervisor: Jadwiga Fangrat, BEng, PhD, DSc, Assoc. Prof.

ABSTRACT

A significant number of cables of different materials and construction is used extensively in building objects increasing their fire load and, therefore, strongly influencing safety in the case of fire. Electric cables and electrical installations constructed from them, despite being important elements of fire safety, are not taken into account in the general analysis of the fire safety of buildings and are usually not assessed as potential fire risks. One of the tasks in the field of counteracting fire hazards in buildings should be to reduce the risk of fires caused by short circuits in electrical installations. In the event of fire, the process of fire propagation involving electric cables should be taken into account, which, due to the way cables are installed in buildings, can transfer fire over long distances from the origin of the fire and across storeys through installation shafts.

The scientific problem of the doctoral dissertation is to determine the impact of significant constructional and material parameters of electric cables on their fire properties by establishing the qualitative, and possibly also quantitative, relationships between these parameters.

The aim of the presented work was to investigate the effect of material and constructional parameters on the fire properties of electrical cables, such as heat release, smoke generation, range of flame spread and amount of toxic fire effluents under various ventilation conditions. To the best of the author's knowledge, such systematic research has not been published so far. The presented study is original and fills the scientific gap regarding the constructional and material parameters of electric wires and cables, which influence their fire properties.

In order to investigate the relationship between the constructional-material parameters of cables and their fire properties, eighty three cables (eighty nine cable samples) were examined by means of a standard experimental method. The selection of cable samples included the presence of one distinctive parameter. The conclusions drawn from the experiments were as follows: (1) construction, the number of conductors and the presence of armour or concentric metallic conductors improve fire properties by forming a barrier against flame penetration through the

cable; (2) the use of copper conductors resulted in decreasing fire parameters compared to cables with aluminium conductors (peakHRR_{av} parameter almost four times lower for copper cables); (3) construction materials based on plasticised poly(vinyl chloride) (PVC) significantly reduce the fire properties of cables compared to halogen-free materials (LSOH) (peakHRR_{av} parameter more than 17 times higher for fully halogenated cables), which is due to the decomposition process of the material; (4) no clear relationship between the fire parameters and cable parameter χ was found. The χ parameter was developed to improve the monotonicity of the reaction to the fire test results obtained and has been used in the selection of cable samples for testing within the same cable family so far.

As the investigation showed a significant impact of the number of metallic barriers (conductors) on flame penetration into the inner layers of electric cables and the volume of non-metallic materials on the fire properties of cables, a parameter related to the volume of effective non-combustible content Ω was proposed. The new Ω parameter depends on the non-metallic non-combustible components volume to non-metallic combustible components volume ratio and the effective area of heat transfer within the cable. Increasing Pearson's correlation factors (close to -1) were obtained for THR_{1200s} and TSP_{1200s} parameters as a function of the Ω parameter rather than the χ parameter.

In order to examine the amount of fire/combustion gases under ventilation-controlled fires, a simple PVC-based copper electric wire widely used in buildings was studied by means of a Steady State Tube Furnace. A reference pure polymer unplasticised PVC and additionally pure LDPE were also tested. Decreasing CO₂ yields at different ventilation conditions for the PVC-based copper electric wire were obtained in comparison to three times higher yields for pure PVC and two times for LDPE than those received for the tested wire at the same ventilation conditions, which confirms the insignificant contribution of the hyperventilation effect to humans during a cable fire. To the contrary, four times higher values of toxic CO yields were obtained for the tested wire rather than for the reference polymer and pure LDPE. The maximum value of CO yield (0.57 g/g) was obtained in the case of 5 l/min of primary airflow, which decreased with increasing ventilation. The measured yields of hydrocarbons were similar to the reference values except for the equivalence ratio $\phi = 0.27$. The corrosive and toxic HCl occurring in fire effluents from the studied wire was independent of the ventilation conditions tested. The reaction between copper and the HCl compound and inorganic fillers and HCl decreased HCl content in fire effluents.

Analysis using Quintiere's theory showed that the cone calorimeter method can be used in numerical modelling of the cable burning process, and its use can significantly facilitate and reduce the number of cable fire tests, without adversely affecting the final results.

Summarising, the analysis of the impact of cable construction is an important element from the point of view of the fire safety of buildings. In the course of the study, it was found that factors such as the shape, number and material used for conductor formulation, as well as the types of materials from which the non-metallic elements of the cables are made, and the presence of armour or concentric conductors significantly influence the fire properties of cables, such as heat release, smoke generation, range of fire spread and fire effluent toxicity, largely reducing the fire properties of cables. The experiments enabled the development of a new cable parameter Ω , which is a better predictive indicator of cable flammability than the standard and commonly used parameter χ . In addition, it was found that it is possible to replace large geometric scale fire tests with a simpler cone calorimeter method by applying Quintiere's theory of electric cables.

Key words: *construction of electric cables; fire behaviour of electric cables; reaction to fire of electric cables; fire safety of buildings; cable parameters; Quintiere's theory of electric cables*

A handwritten signature in cursive script, reading "Uweel Chabel". The signature is written in dark ink and is positioned to the right of the key words section.

mgr inż. Katarzyna Kaczorek-Chrobak

Tytuł pracy: *Kable elektryczne stosowane w budynkach - zależność właściwości ogniowych od parametrów konstrukcyjno-materiałowych*

Promotor: dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, prof. ITB

STRESZCZENIE

W obiektach budowlanych stosuje się kable wykonane z użyciem różnych materiałów konstrukcyjnych polimerowych, co zwiększa ich obciążenie ogniowe, a zatem znacząco wpływa na bezpieczeństwo pożarowe budynków. Kable elektryczne i wykonane z nich instalacje elektryczne, pomimo iż są istotnymi elementami bezpieczeństwa pożarowego obiektów budowlanych, nie są brane pod uwagę w ogólnej analizie bezpieczeństwa pożarowego budynków i zwykle nie podlegają ocenie pod kątem potencjalnego zagrożenia pożarowego. Tymczasem jednym z zadań w zakresie przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym w budynkach powinno być zmniejszenie ryzyka pożarów wywołanych zwarciami w instalacjach elektrycznych. Natomiast, w przypadku wystąpienia pożaru, należy mieć na uwadze proces rozprzestrzeniania się ognia z udziałem kabli elektrycznych, który ze względu na sposób instalacji kabli w budynkach, może przenosić ogień na duże odległości od miejsca zainicjowania pożaru oraz pomiędzy kondygnacjami budynku poprzez szyby instalacyjne.

Problem naukowy niniejszej rozprawy stanowi określenie wpływu istotnych parametrów konstrukcyjno-materiałowych kabli na ich właściwości ogniowe poprzez ustalenie zależności jakościowych, a w miarę możliwości również ilościowych, między tymi wielkościami.

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej było wyodrębnienie istotnych czynników związanych z konstrukcją kabli elektrycznych, wpływających na określone właściwości pożarowe, takie jak wydzielanie ciepła, wytwarzanie dymu, długość zniszczenia i ilość toksycznych produktów spalania w różnych warunkach wentylacji pomieszczeń. Zgodnie z najlepszą wiedzą autorki takie systematyczne badania nie zostały dotychczas opublikowane. Przedstawione badania są oryginalne i wypełniają lukę badawczą w aspekcie rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych kabli i przewodów elektrycznych, wpływających na ich właściwości ogniowe.

W celu wyodrębnienia parametrów konstrukcyjnych kabli, które istotnie zmieniają ich właściwości ogniowe poddano analizie osiemdziesiąt trzy kable elektryczne (osiemdziesiąt dziewięć próbek kabli) o różnej konstrukcji i zastosowanych materiałach. Zbadano je stosując między innymi standardową metodę badawczą opisaną w normie EN 50399. Dobór próbek kabli uwzględniał obecność jednej determinującej cechy konstrukcyjno-materiałowej. Wnioski z wykonanych badań były następujące: (1) konstrukcja, liczba żył roboczych i obecność pancerza lub metalicznej żyły koncentrycznej poprawiają właściwości ogniowe, poprzez wytworzenie bariery przed przenikaniem płomienia w głąb wewnętrznych warstw kabla; (2) zastosowanie żył roboczych miedzianych powoduje obniżenie parametrów ogniowych w porównaniu z kablami z żyłami aluminiowymi (uzyskano do 4 razy niższy parametr $peakHRR_{av}$ dla kabla z żyłami miedzianymi); (3) materiał konstrukcyjny na bazie plastyfikowanego poli(chlorku winylu) (PVC) znacznie pogarsza właściwości ogniowe kabli w stosunku do materiałów bezhalogenowych (LSOH) (parametr $peakHRR_{av}$ był ponad 17 razy wyższy dla kabla na bazie materiałów halogenowych), co wynika z procesu dekompozycji termicznej tworzywa; (4) nie stwierdzono wyraźnego związku między parametrami związanymi z właściwościami ogniowymi kabli elektrycznych a standardowym parametrem kablowym χ , poprawiającym monotoniczność uzyskanych wyników badań ogniowych kabli i stosowanym dotychczas w doborze próbek do badań w obrębie tej samej rodziny kablowej.

W związku z faktem, iż przeprowadzone badania wykazały znaczny wpływ liczby żył roboczych jako barier metalicznych dla penetracji płomienia do warstw wewnętrznych kabli elektrycznych i objętości części niemetalicznych na właściwości ogniowe kabli, zaproponowano parametr związany z efektywną objętością elementów niemetalicznych palnych Ω . Parametr Ω zależy od stosunku objętości elementów niepalnych niemetalicznych do objętości elementów palnych niemetalicznych kabla oraz efektywnej powierzchni wymiany ciepła w obrębie budowy kabla. Znacznie wyższe bezwzględne współczynniki korelacji Pearson'a (bliskie -1) uzyskano dla parametrów THR_{1200s} i TSP_{1200s} w funkcji parametru Ω niż parametru χ .

W celu ilościowego oznaczenia ilości gazów uzyskanych w warunkach kontrolowanych wentylacją, badaniom poddano prosty przewód elektryczny z izolacją na bazie poli(chlorku winylu) (PVC) stosowany powszechnie w budownictwie oraz jako próbkę referencyjną czysty nieplastyfikowany poli(chlork winylu) oraz polietylen o niskiej gęstości (najprostszy z polimerów) zgodnie z metodą badawczą o nazwie Steady State Tube Furnace. Trzykrotnie niższe wydajności CO_2 w różnych warunkach wentylacji uzyskano dla badanego

kabla w porównaniu z referencyjnym czystym polimerem nieplastyfikowanym poli(chlorkiem winylu) oraz dwukrotnie niższe w porównaniu z czystym polietylenem, co potwierdza nieznaczny wpływ efektu hiperwentylacji na człowieka podczas palenia się kabli. Natomiast w przypadku wydzielania CO, uzyskano czterokrotnie wyższe wartości wydajności dla badanego kabla w porównaniu z czystymi polimerami. Maksymalną wartość wydajności CO (0,57 g/g) uzyskano w przypadku przepływu powietrza wynoszącego 5 l/min i wartość ta zmniejszała się wraz ze wzrostem stopnia wentylacji. Zmierzone wydajności węglowodorów były podobne do wartości referencyjnych, z wyjątkiem współczynnika równoważności $\phi = 0,27$. Wydzielanie żrącego i toksycznego chlorowodoru (HCl) podczas spalania kabla elektrycznego jest niezależne od warunków wentylacyjnych. Reakcja korozji między miedzią i HCl oraz między wypełniaczami nieorganicznymi i HCl zmniejszyła zawartość tego gazu w wydzielanym dymie.

Analiza z wykorzystaniem teorii Quintiere'a wykazała, iż metoda kalorymetru stożkowego może być stosowana w modelowaniu numerycznym procesu spalania kabli, a jej zastosowanie może znacznie ułatwić i zmniejszyć liczbę badań ogniowych kabli, bez negatywnego wpływu na wyniki końcowe. Jednakże kable w tym przypadku należy traktować jako materiały stałe kompozytowe.

Reasumując, analiza wpływu budowy kabli jest istotnym elementem z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego obiektów budowlanych. W toku pracy nad rozprawą doktorską stwierdzono, iż czynniki takie jak ilość, kształt i materiał, z którego wykonane są żyły robocze oraz rodzaje materiałów, z których wykonane są elementy niemetaliczne kabli, a także obecność pancerza lub żyły koncentrycznej w kablach istotnie wpływają na właściwości ogniowe, takie jak wydzielanie ciepła, wytwarzanie dymu, długość zniszczenia oraz wydzielanie toksycznych produktów spalania. Przeprowadzone eksperymenty umożliwiły opracowanie nowego parametru Ω , który okazał się być lepszym wskaźnikiem predykcyjnym palności kabli niż znormalizowany i szeroko stosowany obecnie parametr χ . Ponadto ustalono, iż możliwe jest zastąpienie metod badawczych prowadzonych w dużej skali geometrycznej prostszą metodą kalorymetru stożkowego poprzez zastosowanie teorii Quintiere'a dla kabli elektrycznych.

Słowa kluczowe: konstrukcja kabli elektrycznych, właściwości ogniowe kabli elektrycznych, reakcja na ogień kabli elektrycznych, bezpieczeństwo pożarowe obiektów budowlanych, parametr kablowy, teoria Quintiere'a dla kabli elektrycznych

Herivel-Choques