

*mł. bryg. dr inż. Ryszard CHYBOWSKI*  
*Zakład Elektroenergetyki, Katedra Techniki Pożarniczej, SGSP*  
*mgr Michał BEDNAREK, Katedra Nauk Ścisłych, SGSP*  
*dr Monika KARBARZ, Katedra Nauk Ścisłych*  
*Zakład Fizyki i Chemii, SGSP*

## **OCENA AWARYJNEJ PRACY ZESTYKU ZA POMOCĄ ZMODYFIKOWANEJ FARBY OGNIOPRONNEJ**

### **Słowa kluczowe:**

farba ogniochronna, termoindykator, zestyk

### **Wprowadzenie**

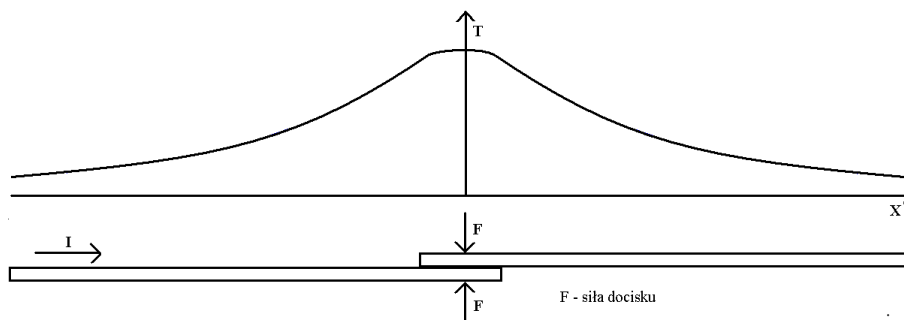
Zestyki w urządzeniach elektrycznych są bardzo ważnym elementem toru prądowego. Od ich prawidłowej pracy zależy bezawaryjne działanie aparatury i instalacji elektrycznej. Dużo awarii, w tym i pożarów jest powodowanych nadmierną rezystancją zestyku. Zwiększona wartość rezystancji w przypadku, gdy przez zestyk przepływa prąd, powoduje zwiększenie ilości wydzielanego ciepła, a w niektórych przypadkach przekroczenie dopuszczalnych wartości przyrostów temperatury. Nadmierna temperatura wpływa ujemnie nie tylko na zestyk, ale również na sąsiednie elementy. W technice pożarniczej stosowane są tzw. czujniki temperaturowe do sygnalizacji przekroczenia dopuszczalnej temperatury. Wprowadzenie podobnych rozwiązań w instalacjach elektrycznych jest praktycznie nierealne z uwagi nie tylko na bardzo dużą liczbę zestyków ale i zagrożenie zwarciami czy porażeniami. Ze względu na zakres dopuszczalnych temperatur bezpośrednia ocena pracy zestyku jest możliwa za pomocą termowizji lub odpowiednich wskaźników, tzw. termoindykatorów.

W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania zmodyfikowanej farby ogniochronnej jako indykatora temperatury. Pokazano również wynik badań eksperymentalnych na modelach zestyków pokrytych powłokami wytworzonej mieszaniny.

### **Awaryjna praca zestyków**

Awaryjna praca zestyku wystąpi w przypadku nadmiarowej rezystancji złącza dwóch metali tworzących zestyk. Rezystancja złącza składa się z rezystancji przejścia oraz z rezystancji warstw nalotowych. Rezystancja przejścia jest spowodowa-

na zagęszczeniu strug prądowych w okolicy miejsca styczności. Rezystancja warstw nalotowych (tlenków, siarczków, węglan) jest spowodowana reakcjami chemicznymi zachodzącymi na powierzchni styków. Istnieje kilka empirycznych zależności pozwalających oszacować rezystancję zestyku [1]. Praktyka pokazuje, że rezystancja zestyku jest funkcją wielu zmiennych między innymi siły docisku i czasu. Przy obciążeniach prądem ciągłym toru prądowego zawierającego zestyk, po pewnym czasie przepływu prądu temperatura toru ustala się. Ciepło wydzielające się w torze prądowym jest odprowadzane z powierzchni bocznej tego elementu do otaczającego środowiska. Z kolei ciepło wydzielające się w miejscu styczności jest odprowadzane najpierw wzdłuż toru prądowego, następnie z powierzchni bocznej do otoczenia. W wyniku tego w pobliżu zestyku powstaje charakterystyczny rozkład temperatury pokazany na rys. 1.



*Rys. 1. Ustalony rozkład temperatury prostego toru prądowego zawierającego zestyk nierozłączny*

Przedstawiony na rys. 1 przebieg jest uzależniony od rezystancji zestyku oraz od wartości prądu w torze prądowym. Przy większej rezystancji zestykowej i przy tej samej wartości prądu wydzieli się więcej ciepła, co spowoduje wzrost temperatury w otoczeniu zestyku. W praktyce pomiar temperatury w miejscu styczności nie jest możliwy, choć byłby to najlepszy wskaźnik prawidłowości pracy zestyku. Możliwy jest natomiast pomiar spadku napięcia na zestyku i sprawdzenie, czy ten spadek nie przekracza pewnych wartości krytycznych wyznaczonych dla różnych materiałów stykowych [1].

Temperatura toru prądowego poza miejscem styczności maleje wykładniczo. Ten fakt pozwala na oszacowanie maksymalnej temperatury powierzchni elementów stykowych w przypadku braku możliwości dostępu do zewnętrznej powierzchni styków.

### **Metody oceny awaryjnej pracy zestyku**

Awaryjna praca zestyku powoduje powstanie anomalii termicznej. Wizualne stwierdzenie tego faktu jest niemożliwe ze względu na zakres zmian temperaturowych. Pomiar temperatury za pomocą termopar lub innych przyrządów jest prak-

tycznie mało realny z uwagi na obecność napięcia na elementach przewodzących. Idealnym urządzeniem przy tego typu pomiarach jest kamera termowizyjna, która umożliwia bezkontaktowy pomiar temperatury. Kamery termowizyjne mają rozdzielczość na poziomie 0,1K, podczas gdy istotne wady zestyków to przyrosty temperaturowe rzędu kilkunastu lub kilkudziesięciu kelwinów. Badania termowizyjne zestyków mają jednak wady. Główny problem polega na konieczności obciążenia zestyku odpowiednim prądem w czasie badania. Otoczenie zestyku musi być w trakcie badania w polu widzenia kamery, najlepiej z podobnymi elementami podobnie obciążonymi. Minimalne obciążenie badanego zestyku musi wynosić 30% [2].

W pracy [3] zaprezentowano bezinwazyjną metodę oceny stanu i jakości trudnodostępnych zestyków z wykorzystaniem zjawiska nieliniowej zależności napięciowo-prądowej pomiędzy uszkodzonymi zestykami. Ta metoda wymaga stałoprądowego wymuszenia o stosunkowo dużej mocy oraz zapewnienia odpowiedniej powierzchni dla aparatury pomiarowej. Do badań w instalacjach powszechnego użytku ta metoda jest nieprzydatna.

W pracy [4] opisano termoindykatory w badaniach między innymi zestyków. Termoindykatory to czujniki reagujące zmianą koloru na zmiany temperatury. Na rynku dostępne są termoindykatory odwracalne i nieodwracalne. Termoindykatory nieodwracalne to wskaźniki dwustanowe jednorazowego użytku. Ze względu na prostotę wykonania (naklejka), brak zapotrzebowania energii na działanie oraz względnie niską cenę są stosowane w wielu krajach do monitorowania pracy wielu urządzeń w tym i elektrycznych. Jednak większość tego typu termoindykatorów wykazuje, niestety, słabą przyczepność do metalu [4].

### **Farby ogniochronne jako termoindykatory**

Farby ogniochronne są to farby opóźniające zapalenie się pokrytych nimi materiałów palnych lub zapobiegające gwałtownemu przegrzaniu się konstrukcji metalowych [5]. Rozróżnia się farby zawierające substancje chemiczne łatwo rozkładające się w podwyższonej temperaturze z wydzieleniem niepalnych gazów oraz tworzące powłoki pęczniejące pod wpływem ciepła. W pierwszym przypadku odcinany jest dostęp tlenu z powietrza. W drugim przypadku pod wpływem temperatury pokrycie staje się plastyczne i wydzielają się obojętne chemicznie gazy. Powłoka przekształca się w porowatą warstwę 30–50-krotnie przekraczającą grubość początkową. Miękka półpłynna warstwa ulega zwęgleniu i została się tworząc izolację cieplną. Farbami ogniochronnymi zabezpiecza się różne przedmioty, konstrukcje drewniane i stalowe.

Dokładny skład chemiczny tych farb chroniony jest patentami i nie jest udostępniany przez sprzedawców tych produktów. Początek rozkładu termicznego ogniochronnych farb wynosi około 200°C. Wartość ta wynika z potrzeby ochrony przeciwpożarowej. Bezpośrednie zastosowanie takich farb do oceny zestyków jest

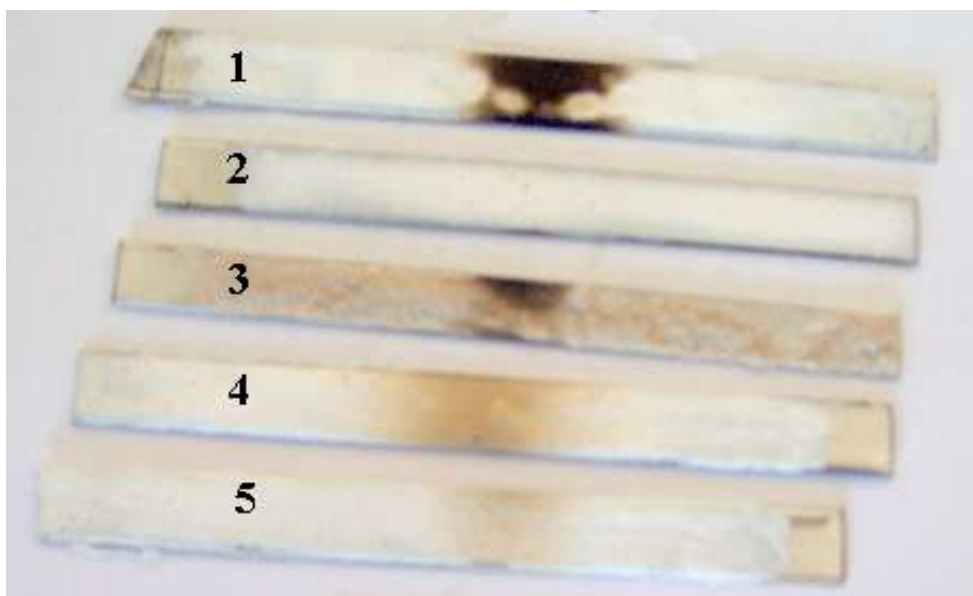
niecelowe z uwagi na niższą temperaturę występującą w torze prądowym przy awaryjnej pracy zestyku. Dla większości farb ogniochronnych rozcieńczalnikiem jest woda. Umożliwia to łatwe wprowadzenie do ich składu substancji rozpuszczalnych w wodzie, które będą reagować rozkładem termicznym w znacznie niższych temperaturach. Rozkład tak zmodyfikowanej farby umożliwi wizualne stwierdzenie przegrzania zestyku. Farby ogniochronne cechuje dobra przyczepność do podłoża bez względu na stopień rozcieńczenia, niektóre z nich mają ponad 20-letnią trwałość.

### Badania eksperymentalne

W badaniach wykorzystano farby ogniochronne firmy svt Brandschutz typu Pyro-safe Flammotect-A oraz Pyro-safe Flammoplast KS1. Farby te są stosowane w energetyce do zabezpieczania kabli. Charakteryzują się one bardzo dobrą przyczepnością nie tylko do tworzyw sztucznych, ale również i metali. Rozcieńczalnikiem tych farb jest woda. Podstawowym kryterium doboru dodatku do wyżej wymienionych farb była jego temperatura rozkładu termicznego. Rozkład termiczny zmodyfikowanej farby powinien umożliwić wizualne stwierdzenie przegrzania powierzchni zestyku lub jego otoczenia przewodzącego prąd. W badaniach termograficznych według [2] zaobserwowanie przyrostu temperatury powyżej 50 K kwalifikuje zestyk do natychmiastowej naprawy. Uwzględniając dopuszczalną długotrwałą ciepłoodporność materiału izolacyjnego klasy Y, która wynosi 90°C [1], można obliczyć pożądaną górną granicę reakcji termoindykatora. Wskazana byłaby również reakcja na niższe temperatury z uwagi na możliwość wykrywania mniej groźnych przegrzań zestyków.

Wytypowano następujące materiały: fruktozę, sacharozę, pył bawełniany, pył paździerzowy. Badania wstępne miały na celu dobór odpowiedniego dodatku oraz określenie najlepszego składu procentowego zmodyfikowanej farby. Wytworzono kilkugramowe próbki farb o różnym składzie procentowym dodatków. Następnie nałożono je na stalowe prostokątne płytki o wymiarach 1cm × 10 cm. Przygotowano po trzy identyczne próbki o tym samym składzie procentowym. Farbę nakładano pędzlem na jedną stronę płytki, drugą stronę zaczerwiono. Zaczernienie wykonano ze względu na wykorzystanie promieniowania laserowego do punktowego podgrzewania płytek. Eksperymentalnie dobrano moc wiązki laserowej i czas ekspozycji. Przyjęto, że wartości tych parametrów mają powodować wystąpienie na powierzchni płytki temperatury przekraczającej 140°C. Pomiar temperatury wykonywano kamerą termowizyjną Flir Thermacam SC640. Ustalono moc  $P = 10$  W i czas ekspozycji  $t = 180$  s. Uzyskano dobrą powtarzalność pomiarów. Wyniki oddziaływania wiązki laserowej na niektóre blaszki pokazano na rys. 2. Ze wstępnych badań wynikało, że najodpowiedniejszą mieszaniną jest farba Flammotect A z dodatkiem 33% fruktozy. W związku z tym wytworzono większą ilość mieszanki o takim składzie i pokryto nią modele zestyków. Model zestyku

był wykonany z typowej złączki do przewodów elektrycznych o przekroju  $16 \text{ mm}^2$ . Do złączki z obydwu stron były przykręcone druty miedziane albo aluminiowe o przekroju  $10 \text{ mm}^2$  i długości około 10 cm z każdej strony. Jedna strona złączki była zaczerniona z uwagi na zastosowanie lasera jako źródła ciepła. Druga strona złączki i druty były pokryte zmodyfikowaną farbą. Eksperymentalnie dobrano moc wiązki laserowej o wartości  $P = 10 \text{ W}$  i czas oddziaływania  $t = 600 \text{ s}$ . Wyniki eksperymentu przedstawiono na rys. 3.

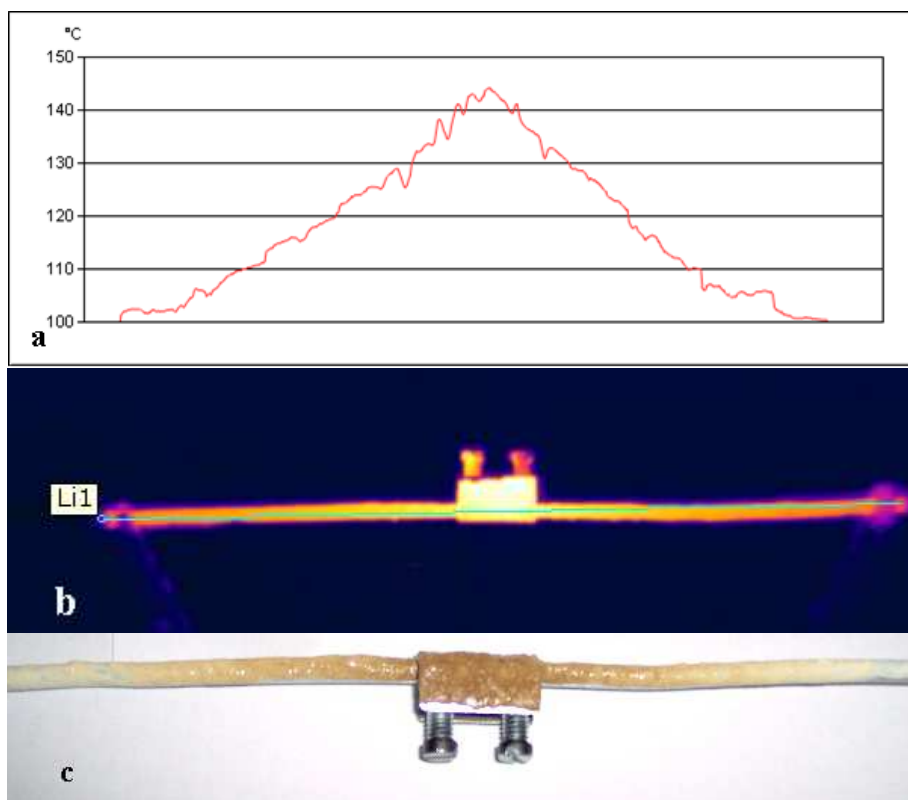


*Rys. 2. Wyniki wstępnych badań różnie zmodyfikowanych farb*

- 1 - Flammoplast KS z 33% sacharozy, 2 - Flammotect A z 13% pyłu bawełnianego,  
3 - Flammoplast KS z 13% pyłu paździerzowego, 4 - Flammotect A z 9% fruktozy,  
5 - Flammotect A z 9% sacharozy

Rozkład następuje przy temperaturach przekraczających  $110^\circ\text{C}$ . Dodatkowym efektem rozkładu zmodyfikowanej farby jest wyraźny, charakterystyczny zapach karmelu towarzyszący rozkładowi fruktozy. Można traktować ten efekt jako dodatkowy wskaźnik informujący o przegrzaniu zestyku.

Z rys. 3c można wnioskować o temperaturze na powierzchni złączki. Widać wyraźne obszary karmelizacji fruktozy i w przybliżeniu można określić temperaturę złączki. Na tej podstawie można ustalić stopień obniżenia temperatury rozkładu zmodyfikowanej farby ogniochronnej. Pomiar temperatury wzdłuż toru prądowego wykonano kamerą termowizyjną. Rys. 3a ilustruje rozkład temperatury wzdłuż linii Li1 widocznej na termogramie z rys. 3b.



**Rys. 3.** Przykładowe wyniki przegrzania złączki z drutami aluminiowymi a) rozkład temperatury wzdłuż toru prądowego modelowanego zestyku, b) termogram modelu zestyku, c) widok złączki po skończonej próbie

### Wnioski

Badania eksperymentalne wykazały możliwość zmodyfikowania farby Flamotect A stosowanej w zabezpieczeniach przed pożarami kabli tak, aby uzyskać termoindikator do ostrzegania przed nadmiernym nagraniem zestyku. Z kilku wybranych dodatków fruktoza okazała się najlepszą do zastosowania w tym celu. Wytworzony w ten sposób indykator nie tylko wzrokowo informuje o zagrożeniu, towarzyszący łatwo rozróżnialny zapach pomaga w wykryciu możliwości awarii. Nie bez znaczenia jest cena tego typu indykatora. Z jednego kilograma farby ogniochronnej można uzyskać setki tego typu wskaźników. Ze względu na prostotę umieszczenia takiego termoindikatora na powierzchni zestyku (malowanie pędzlem) można kontrolować pracę bardzo małych zestyków. Według wielu badań farby ogniochronne dla kabli nie wpływają na ich obciążalność. Dodatek fruktozy nie zmienia znacząco tej właściwości w odniesieniu do części przewodzącej prąd.

Należy podkreślić, że farba Flammotect-A ma aprobatę techniczną do zastosowań zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych. Dodatek fruktozy może znacząco wpłynąć na zachowanie się mieszaniny w warunkach zewnętrznych, dlatego termoindykatora zrobionego tej farby należy używać tylko do zastosowań wewnętrznych.

Z uwagi na reakcję tak wytworzonego termoindykatora tylko na chwilową wartość temperatury, brak jest możliwości oceny, czy przegrzanie zestyku wystąpiło na skutek prądu ciągłego czy zwarciovego.

## **S U M M A R Y**

*Ryszard CHYBOWSKI*

*Michał BEDNAREK*

*Monika KARBARZ*

## **THE EVALUATION OF CONTACT WORK FAILURES USING THE FIRE RESISTANT PAINT**

The article presents the test results of thermoindicator made on the base of fire resistant paint. The proposed thermoindicator has got many advantages proved by the test results.

## **PIŚMIENNICTWO**

1. Poradnik inżyniera elektryka. WNT, Warszawa 1997.
2. W. Adamczewski: Badania termograficzne w elektroenergetyce. *Laboratorium Przemysłowe* 2008, nr 6.
3. S. Kulas: Ocena jakości zestyków wielkopądowych w eksploatacji. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 2008, nr 7/8.
4. B. Miedziński i inni: Termoindykatory w układach oceny jakości pracy silnopądowych złączy stykowych i wybranych urządzeń elektrycznych. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 2008, nr 7/8.
5. M. Abramowicz, R. Adamski: Bezpieczeństwo pożarowe budynków. SGSP, Warszawa 2002.

