

Laserowe usuwanie izolacji z drutów nawojowych

Obecnie większość światowych firm motoryzacyjnych wprowadza do swojej oferty samochody elektryczne. Jednym z istotnych problemów w branży motoryzacyjnej jest jakość połączeń elektrycznych. Jest to szczególnie ważne w przypadku drutów nawojowych stosowanych w statorach silników elektrycznych, gdzie wytwarzane są silne pola magnetyczne. Wiąże się to z dużym transferem prądu elektrycznego z baterii do cewek, dlatego wszelkie straty na złączach muszą być minimalizowane. W artykule został poruszony temat usuwania izolacji z końcówek drutów nawojowych o różnych średnicach w celu odsłonięcia powierzchni miedzi. Ma to zapewnić lepszy kontakt pomiędzy zaciskiem a drutem lub grupą drutów nawojowych, w przypadku których nie stosuje się lutowania.

Miedziane druty pokryte izolacją lub miedziane druty emaliowane są od wielu lat stosowane do nawijania cewek w różnego rodzaju elektromagnesach i silnikach. Połączenie elektryczne z drutem emaliowanym nie stwarzało zazwyczaj problemu, gdyż emalia odparowywała podczas lutowania, odsłaniając miedziany drut. Obecne trendy w łączeniu przewodów lub grup przewodów idą w stronę połączeń wykonywanych metodą ultradźwiękową [1] lub poprzez zagniatanie w ramach wspólnej końcówki przewodu. Na rys. 1 przedstawiono przykład statora silnika samochodu elektrycznego oraz końcówkę służącą do zagniatania grupy przewodów.

Chcąc minimalizować straty przesyłu prądu związane z połączeniami, zaczęto stosować selektywne usuwanie emalii z drutów w celu zwiększenia kontaktu elektrycznego na złączach. Od wielu lat stosuje się metody konwencjonalne usuwania izolacji – mechaniczną oraz chemiczną. Metoda mechaniczna polega na automatycznym zeszkrobaniu lakierniczym urządzeniem przypominającym obracającą się ostrzałkę [2]. Natomiast metoda chemiczna wykorzystuje solne kąpiele w NaOH czy KOH lub po prostu emalia jest wypalana w płomieniu. Jednakże metody te mają wiele wad, np.: mechaniczne zniszczenie przewodu miedzianego, proces jest powolny, mała precyzja oraz słaba jakość końcowa. Ponadto chemiczne usuwanie emalii często następuje w wysokich temperaturach (około 300–400°C), w których wydzielanie się trujących oparów jest trudne do opanowania [3]. Wypalanie natomiast pozostawia zwęglone pozostałości, które także trzeba dodatkowo usunąć. Wraz z rozwojem technologii laserowej opracowano urządzenia do laserowego usuwania emalii z drutów nawojowych [4].

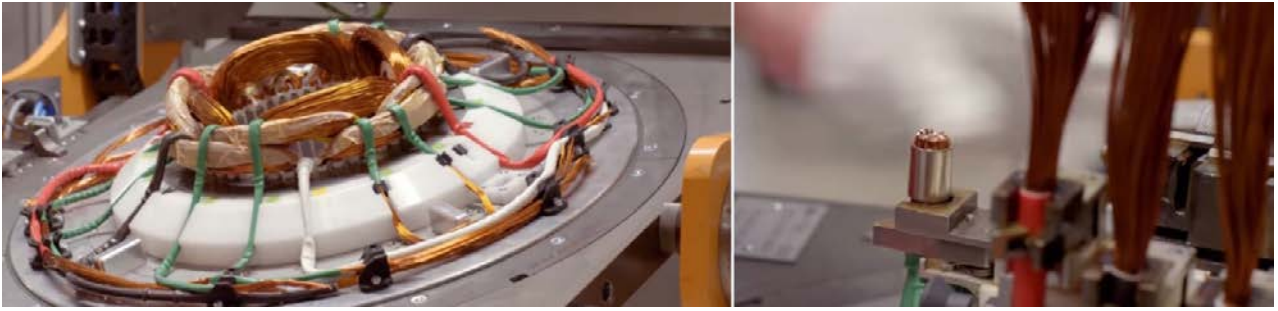
Laserowe usuwanie izolacji

Metoda laserowa usuwania izolacji z drutów nawojowych jest procesem złożonym. Mamy tutaj do czynienia z oddziaływaniem laserowym z dwoma materiałami. Procesy takie, jak absorpcja promieniowania w danym materiale, czy też jego właściwości termiczne mają istotne znaczenie na jakość tego procesu. Kluczo-

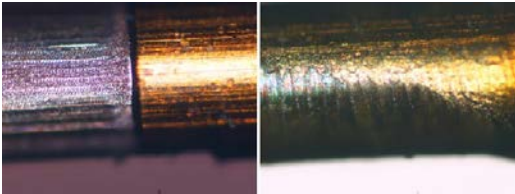
TEKST: DR INŻ. **Robert Barbucha**

Zakład Zastosowań Techniki Plazmowej i Laserowej, Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, Instytut Maszyn Przepływowych PAN im. Roberta Szwalskiego w Gdańsku, www.lasercenter.pl
 napisz do autora: brobert@imp.gda.pl

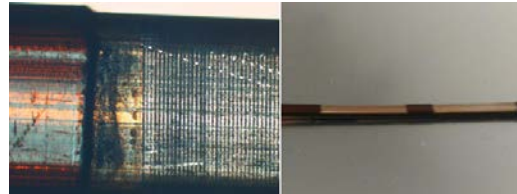
zdjęcia: R. Barbucha



Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3

1. Montaż uzwojeń w silniku elektrycznym oraz zgrupowanie końcówek z zagniatania
2. Po lewej – kolor srebrny to miedź, kolor brązowo-pomarańczowy to emalia, po prawej widać złobienia w emalii wykonane metodą mechaniczną
3. Przykład nie do końca usuniętej izolacji z drutu prostokątnego wraz z kreskami po laserze UV

wym parametrem lasera w usuwaniu izolacji z drutów okazuje się absorpcja promieniowania w materiale, z którego jest wykonana izolacja. W większości przypadków jest to polimer typu poliuretan, poliamid czy poliester. Typ użytego polimeru zależy od maksymalnej temperatury topnienia, jaką może on wytrzymać. Wraz ze wzrostem indeksu termicznego można wyróżnić pięć typowych polimerów [5]:

- usieciowany poliuretan (130°C),
- usieciowany poliuretan z poliimidem (155°C),
- poliesterimid (155°C),
- poliesterimid z dodatkiem powłoki z poliamidu imidowego (200°C),
- poliamidoimid (220-250°C).

Dodatkowo w zależności od grubości przewodu miedzianego grubość emalii waha się od 20 do 100 μm . Podobnie, jak w przypadku innych materiałów polimerowych, zdawałoby się, że oczywistym wyborem lasera do usuwania izolacji będzie laser CO_2 , którego promieniowanie o długości 10,6 μm absorbuje się zdecydowanie lepiej niż w przypadku laserów o krótszych długościach fali. Co więcej, miedź i inne metale kolorowe odbijają promieniowanie lasera CO_2 . Okazuje się jednak, że jeżeli grubość emalii maleje do wartości $\frac{1}{4}$ długości fali lasera, absorpcja maleje do zera. Wynika stąd, że po laserowym usuwaniu izolacji przy długości fali 10,6 μm nadal na drucie miedzianym pozostaje cienka powłoka o grubości 2-3 μm . Ten fakt powoduje, że konieczne jest wykorzystanie innych zjawisk, które umożliwią pozbycie się emalii z miedzianego drutu. Lasery o krótszych długościach fal (poniżej 1 μm) mają

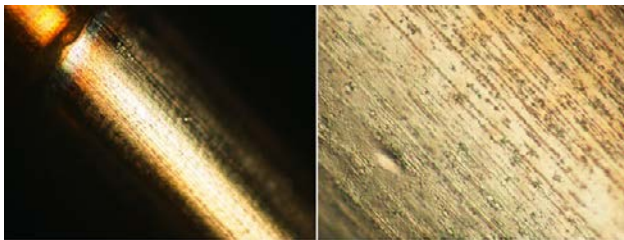
porównywalnie mniejszą absorpcję w polimerach, natomiast większą – w metalach. Dlatego możliwe jest wykorzystanie zjawiska fali uderzeniowej, wytworzonej przy generacji plazmy powstałej po oddziaływaniu impulsu laserowego z metalem. Fala ta jest zdolna do oderwania emalii z drutu z dużą prędkością. Dodatkowo powierzchnia metalu jest czyszczona z tlenków, co znacząco poprawia właściwości drutu przed kolejnymi operacjami. Na rys. 2 przedstawiono porównanie granicy usuniętej emalii na drucie miedzianym dla metody laserowej oraz metody mechanicznej.

Testy z wykorzystaniem lasera CO_2

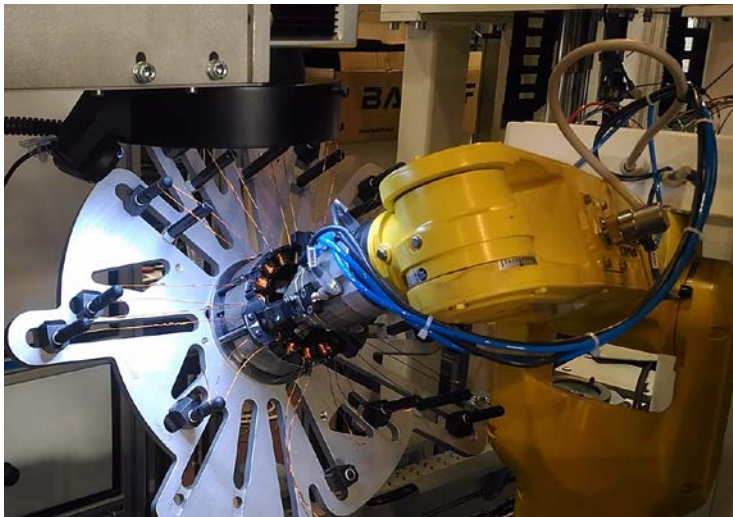
Prace związane z wykonaniem testów usuwania izolacji z drutów nawojowych zostały wykonane na zlecenie firmy integratorskiej związanej z firmą z przemysłu motoryzacyjnego. Do testów wybrano różne rodzaje drutów o różnych średnicach. Tak, jak się spodziewano w przypadku lasera CO_2 , pomimo stosunkowo szybkiego usuwania całkiem grubych izolacji z drutów, ostatecznie pozostawała cienka warstwa izolująca miedź. Na rys. 3 przedstawiono przykład drutu o przekroju prostokątnym 1,5 x 5 mm, gdzie jest widoczny kawałek warstwy izolującej. Aby całkowicie usunąć izolację, konieczne jest dodatkowe zastosowanie drugiego typu lasera – lasera UV.

Testy z wykorzystaniem lasera UV

Biorąc pod uwagę fakt, że nie uda się całkowicie usunąć izolacji z drutu przy pomocy lasera CO_2 , testy przeprowadzono z wykorzystaniem impulsowego lasera na ciele stałym ❖



Rys. 4



Rys. 5

4. Granica między izolacją na drucie a miedzią – laser UV całkowicie usuwa izolację

5. Robot przemysłowy z dedykowaną platformą do mocowania statora silnika elektrycznego pod systemem laserowym do zdejmowania izolacji z drutów nawojowych

generującego promieniowania ultrafioletowe o długości 355 nm. Firmie zależało na stosunkowo krótkim czasie usuwania izolacji głównie z drutu o średnicy 0,5 mm na długości 15 mm. Wiązka lasera UV w ognisku charakteryzuje się plamką o bardzo małej średnicy. W przypadku zastosowanej soczewki ogniskującej plamka wynosiła około 20 μm . Przetestowano dwa sposoby usuwania izolacji poprzez pokrycie obszaru drutu równoległymi i przylegającymi do siebie ścieżkami znakowania wzdłuż oraz w poprzek drutu. Z uzyskanych pomiarów krótsze czasy były notowane w przypadku usuwania izolacji wzdłuż drutu. Po optymalizacji procesu udało się uzyskać wysoką jakość powierzchni miedzi po usunięciu izolacji (rys. 4). Wartość rezystancji na wyczyszczonym odcinku miedzi dała wynik $< 1 \text{ m}\Omega$.

Pewnym problemem jest usunięcie izolacji po całym obwodzie drutu. Konieczny jest jego obrót o 120 stopni i wykonanie procesu usuwania izolacji z 3 stron drutu, co znacząco wydłuża cały proces. Jednakże biorąc pod uwagę parametry lasera (moc 8W), możliwe było uzyskanie całkowitego czasu usunięcia izolacji z drutu o średnicy 0,5 mm na długości 15 mm poniżej 3 sekund, co było wystarczające w urządzeniu na linii produkcyjnej. W celu obrotu drutów z trzech stron wykorzystano ramię robota przemysłowego, na którym był umieszczony rotor silnika elektrycznego z rozciągniętymi drutami. Usuwanie izolacji wykonywała głowica galvanometryczna zintegrowana wraz z kamerą CCD i oświetlaczem. Na rys. 5 przedstawiono docelowy układ zamontowany na linii produkcyjnej.

Wnioski

W celu całkowitego usunięcia izolacji z drutów nawojowych konieczne jest wykorzystanie zoptymalizowanego urządzenia znakującego z laserem ultrafioletowym. W przypadku stosunkowo grubych powłok emalii na drutach można wykorzystać laser CO_2 jako narzędzie wstępnej obróbki. Natomiast końcową cienką warstwę należy wykonać laserem, który, wykorzystując zjawisko wytwarzania plazmy na powierzchni metalu, pozwoli na utworzenie fali uderzeniowej, która odwrwie pozostałą na drucie cienką warstwę izolacji. □

Piśmiennictwo

1. *Ultrasonic wire welding*. <https://www.telsonic.com/en/metal-welding/wire-splicing-termination/> [dostęp: 15.12.2018 r.].
2. *Eraser RT2S Magnet Wire Stripper*. <https://www.eraser.com/products/wire-cable-strippers/wheel-strippers/rt2s-magnet-wire-stripper/> [dostęp: 15.12.2018 r.].
3. *Eraser DSP8 Stripping Pot*. <https://www.eraser.com/products/wire-cable-strippers/chemical-wire-stripping/dsp8-stripping-pot/> [dostęp: 15.12.2018 r.].
4. Patent nr EP1641572B1: *Laserowe usuwanie warstwy lub powłoki z podłoża*. Spectrum Technologies PLC.
5. Davies J., Dickinson R.P., Hawkins J.: *Developments In Laser Stripping Of Enamel Wire*. Wire and Cable Technology International, s. 1- 3, July/August 2016.