

**Stanisław Maleczek, Marcin Szczepaniak, Wojciech Malicki**  
**Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej, Wrocław**  
**Kazimierz Drabczyk, Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków**

## **ZASTOSOWANIE POLIKRYSTALICZNYCH OGNIW KRZEMOWYCH JAKO ELASTYCZNYCH POKRYĆ FOTOWOLTAICZNYCH**

### **APPLICATION OF POLYCRYSTALLINE SILICON CELLS AS ELASTIC PHOTOVOLTAIC COVERS**

**Streszczenie:** Uzależnienie współczesnych urządzeń wojskowych od energii elektrycznej powoduje, że ich skuteczność i niezawodność zależy w bardzo dużym stopniu od ciągłości dostarczania energii elektrycznej oraz jej jakości. Rozwiązaniem zmniejszającym zagrożenie braku ciągłości zasilania może być elastyczne pokrycie fotowoltaiczne realizowane w ramach programu „GEKON - Generator Koncepcji Ekologicznych”. Dynamiczny rozwój źródeł odnawialnych powoduje znaczący spadek ich cen oraz polepszenie ich efektywności energetycznej. Wymienione zalety powodują, że konwencjonalne źródła prądu (np.: zespoły prądotwórcze) w określonych wyżej przypadkach mogą być zastępowane przez źródła alternatywne.

Istotą projektu jest skonstruowanie innowacyjnego elastycznego pokrycia fotowoltaicznego wykonanego w oparciu o polikrystaliczne ogniwa krzemowe. W ramach projektu określono: sposób cięcia pojedynczych ogniw na mniejsze płytki, dobór elastycznego podłoża, rozmieszczenie płytek oraz rozwiązanie metody wykonania połączeń pomiędzy nimi, a także koncepcję systemu gromadzenia energii zintegrowanego z pokryciem. Przedstawiono wyniki podstawowych badań pokrycia w zakresie pomiarów elektrycznych, elektroluminescencji oraz termoemisji. W oparciu o zrealizowane prace wykonano model elastycznego pokrycia fotowoltaicznego będącego bazą do dalszej realizacji projektu. Takie rozwiązanie ma na celu zapewnić dużą autonomię praktycznie w każdej sytuacji kryzysowej, może być wykorzystane np. jako element dachów namiotów lub jako wyposażenie osobiste żołnierza.

**Abstract:** The dependence of modern military equipment on electricity means that their efficiency and reliability depend largely on the continuity of electricity supply and its quality. The solution to reduce the risk of power loss may be the flexible photovoltaic coating implemented under the "GEKON – Generator of Ecological Concepts" program. Dynamic development of renewable energy sources causes a significant drop in their prices and improvement of their energy efficiency. The aforementioned advantages mean that conventional power sources (e.g. power generating sets) in the above-mentioned cases can be replaced with alternative sources. The essence of the project is to design and construct an innovative elastic photovoltaic coating based on polycrystalline silicon cells. The project defined the following: the method of cutting individual cells into smaller plates, selection of a flexible substrate, arrangement of tiles and the solution of the issue of making connections between individual tiles, as well as the concept of an energy accumulating system integrated with the coating. The results of basic coating tests in the field of electrical measurements, electroluminescence and thermionic emission are presented. Based on the work carried out, a model of flexible photovoltaic coating was manufactured which is the basis for further project implementation. This solution is intended to provide significant autonomy practically in every crisis situation, as it can be used, for example, as an element on tent roofs or as part of soldier's personal equipment.

**Słowa kluczowe:** ogniwa słoneczne, system magazynowania energii, fotowoltaika

**Keywords:** solar cells, energy storage system, photovoltaics

### **1. Wstęp**

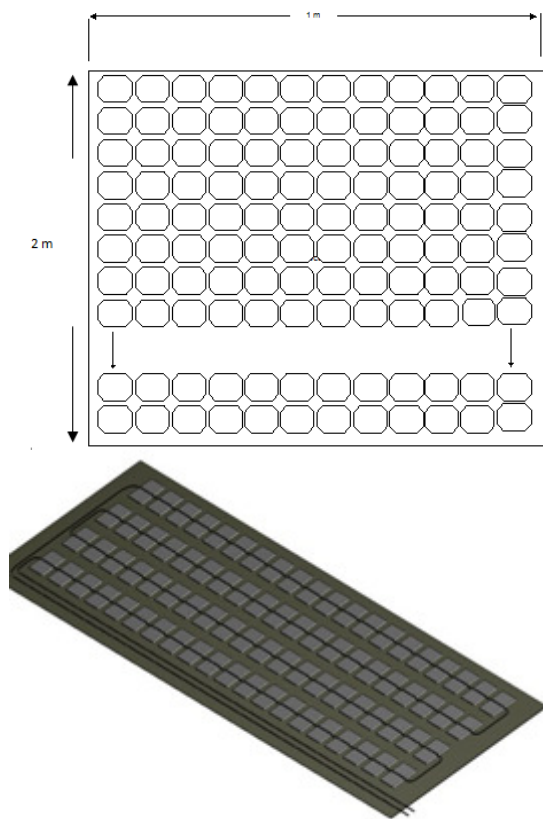
Zaproponowane elastyczne pokrycie fotowoltaiczne [1] [4] (EPF) jest formą pośrednią pomiędzy sztywnym krzemowym ogniwem fotowoltaicznym, a fotowoltaiką organiczną i cienkwarstwową, w aspektach elastyczności, trwałości oraz sprawności ogniwa. EPF cechuje się dobrą elastycznością (odpornością mechaniczną

na wielokrotne zginanie), wysoką sprawnością (16,64 % dla ogniwa EPF\_02) oraz wieloletnim okresem użytkowania (około 15-20 lat). Podstawową zaletą takiego rozwiązania jest możliwość zwijania (np. na bębnie) i rozwijania na dowolnej powierzchni, łatwa obsługa oraz lekka konstrukcja.

Innowacyjny charakter zaproponowanego źródła zasilania zdeterminowany został poprzez zastosowanie elastycznego materiału z wbudowanymi ogniwami fotowoltaicznymi o małych wymiarach. Elastyczność EPF wynika zarówno z właściwości samego materiału podłoża, jak również ze sposobu rozmieszczenia i rodzaju ogniw fotowoltaicznych. Podstawową trudnością w wykonaniu EPF, którą udało się pokonać, było zapewnienie odpowiednich właściwości mechanicznych pokrycia. Problem ten został rozwiązany poprzez zastosowanie odpowiedniej struktury warstwowej pokrycia. Zaproponowane pokrycie EPF cechuje się nie tylko znaczną elastycznością umożliwiającą jego rolowanie, ale co jest również bardzo istotne z punktu widzenia przyszłych użytkowników, możliwością odcięcia zadanej długości EPF bez utraty własności elektrycznych.

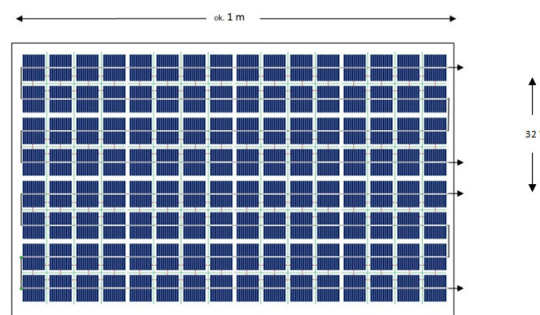
## 2. Koncepcja elastycznego pokrycia

Koncepcja [1] [4] konstrukcji EPF zakłada wykonanie modułu z ogniw fotowoltaicznych na podłożu elastycznym. Przewiduje się uzyskanie wyrobu o szerokości około 100 cm i długości około 200 cm, zawierającego do 20 ogniw w szeregu - rysunek 1.



Rys. 1. Wstępna koncepcja EPF

W powyższej koncepcji nie przewiduje się rozmieszczenia urządzeń peryferyjnych w obrębie podłoża baterii fotowoltaicznej. Niezbędne urządzenia będą podłączane osobno za pomocą wyprowadzeń dołączonych na powierzchni podłoża baterii fotowoltaicznej. W celu uzyskania wymaganego poziomu energii elektrycznej przewiduje się różne sposoby łączenia poszczególnych ogniw w grupy (tzw. baterie cząstkowe). W założeniu napięcie obwodu otwartego baterii nie powinno przekroczyć 48V DC. Jedną z koncepcji przedstawia połączenie szeregowo czterech szeregów ogniw (po 16 ogniw), tworzących grupę o napięciu obwodu otwartego około 32 V i prądzie zwarcia około 0,6 A - rysunek 2.



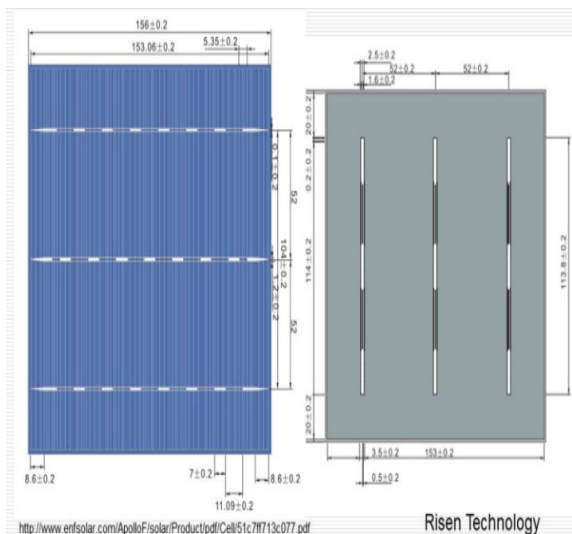
Rys. 2. Koncepcja połączenia szeregowego grupy ogniw

Możliwe jest również wytworzenie grup z połączonych równolegle czterech szeregów po 16 ogniw, co pozwoli zwiększyć prąd jednej grupy do około 2 A przy napięciu obwodu otwartego około 9 V. Poszczególne grupy zostaną połączone szeregowo dając baterię o napięciu około 36 V. Różne warianty połączenia ogniw wymagać będą opracowania sposobu łączenia elektrycznego grup ogniw oraz wyprowadzeń pozwalających łączyć utworzone grupy z urządzeniami peryferyjnymi.

## 3. Model elastycznego pokrycia

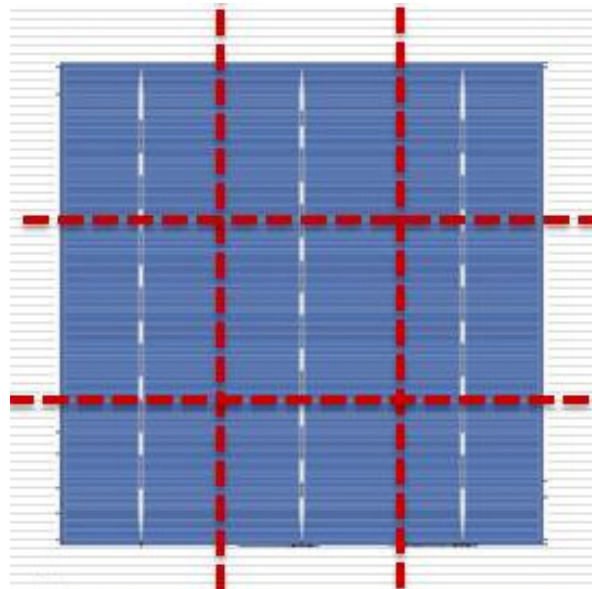
Panele słoneczne najczęściej wykonywane są na podłożu sztywnym, jednak nie we wszystkich aplikacjach możliwe jest użycie takiego rozwiązania. Niektóre zastosowania wymagają paneli na podłożach elastycznych (np. poszycia namiotów, ubrania, elementy dekoracyjne itp.). Dobór właściwego podłoża jest szczególnie istotny, gdyż wpływa bezpośrednio na właściwości mechaniczne i środowiskowe (zastosowanie, tryb, czas i możliwe warunki pracy, charakter obsługi oraz transport). Uwzględniając powyższe wymagania do wykonania modelu

EPF zastosowano tkaniny poliamidowe powleczone kauczukiem chloroprenowym. Konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną zachodzi w krzemowym ogniwie fotowoltaicznym poprzez wykorzystanie półprzewodnikowego charakteru złącza typu p-n, w którym pod wpływem energii słonecznej następuje przemieszczanie się ładunków elektrycznych. To z kolei powoduje pojawienie się różnicy potencjałów, czyli napięcia elektrycznego. Typowe ogniwo słoneczne z krystalicznego krzemu o wymiarach ok. 10 × 10 cm lub 15 cm × 15 cm wytwarza nominalne napięcie około 0,5 V. Poprzez szeregowe i równoległe połączenie ogniw słonecznych można otrzymać baterie słoneczne o oczekiwanej mocy i napięciu. W wyniku przeprowadzonej analizy ustalono, że optymalne będą ogniwa z trzema elektrodami „zbierającymi” o wymiarach 156 mm × 156 mm - rysunek 3. Ogniwa te zostaną pocięte na dziewięć mniejszych ogniw przy pomocy piły laserowej - rysunek 4.



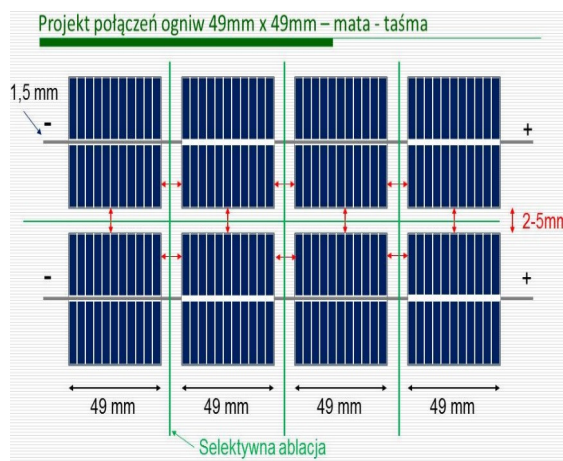
Rys. 3. Krzemowe ogniwo słoneczne z trzema elektrodami zbierającymi

W produkcji przemysłowej stosuje się łączenie tzw. maszynowe ogniw w łańcuchy. Lutowanie modułów ręcznie odbywa się na specjalne zamówienie. W standardowych modułach łączy się szeregowo od 36 do 216 ogniw, z których tworzy się dwa lub trzy łańcuchy ogniw, połączone ze sobą równoległe. Dzięki takiemu połączeniu możliwe jest uzyskanie odpowiedniego napięcia i wydajności prądowej modułu.



Rys. 4. Przykład cięcia ogniw

W rozwiązaniu modelowym ogniwa słoneczne zostały połączone w sposób szeregowo-równoległy - rysunek 5. Montaż poszczególnych ogniw i modułów słonecznych odbywa się za pomocą taśmy z miedzi ocynowanej z wykorzystaniem techniki lutowania miękkiego. Funkcję elastycznego podłoża pełnią tkaniny poliamidowe gumowane.

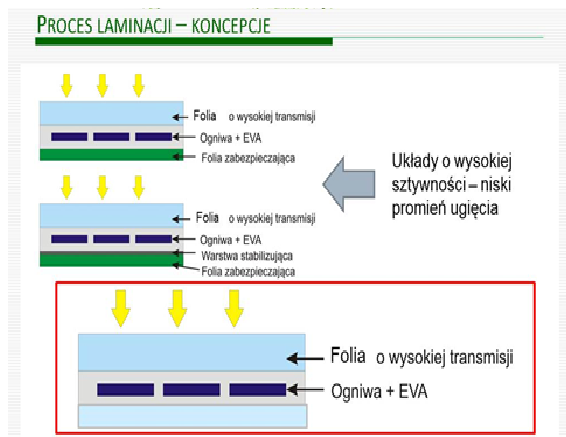


Rys. 5. Przykładowy wariant modelu pokrycia fotowoltaicznego

W kolejnym etapie przeprowadzonych prac polutowano ogniwa słoneczne i poddano je procesowi laminacji uwzględniającym następujące trzy warianty:

- z podkładką stabilizującą,
- ze szkłem zabezpieczającym przednią stronę ogniwa,
- bez dodatkowych zabezpieczeń.

Proces laminacji przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Konceptcja procesu laminacji

Architektura EPF była następująca:

- tkanina / EVA / krzemowe ogniwo słoneczne / EVA / folia do laminacji,
- PET / EVA / krzemowe ogniwo słoneczne / EVA / folia do laminacji,
- tkanina / EVA / krzemowe ogniwo słoneczne / EVA / szkło hartowane.

#### 4. Badania modelu pokrycia

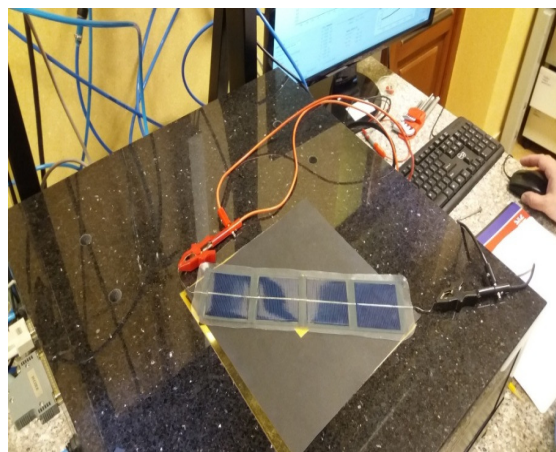
Badania [3] [5] miały na celu sprawdzenie parametrów elektrycznych wytworzonych próbek elastycznych pokryć fotowoltaicznych. W celu realizacji powyższych założeń przeprowadzono trzy etapy badań obejmujące:

- analizę parametrów elektrycznych EPF przed i po uszkodzeniach mechanicznych,
- analizę jakości wykonania EPF metodą elektroluminescencji,
- analizę jakości wykonania EPF metodą termemisji.

Po wstępnym zweryfikowaniu parametrów elektrycznych próbek w pierwszym etapie badań poddano je 50-krotnemu zginaniu, po czym ponownie zmierzono ich parametry elektryczne. Badania te pozwoliły na określenie, która z wytworzonych próbek cechuje się najlepszą odpornością na narażenia mechaniczne. Parametrem oceny wpływu zastosowanego materiału bazowego na zwiększenie odporności pokrycia fotowoltaicznego EPF na narażenia mechaniczne był spadek wartości sprawności. W wyniku pomiarów wyznaczono charakterystyki prądowo - napięciowe  $I = f(U)$  oraz parametry elektryczne (napięcie obwodu otwartego, prąd zwarciaowy ogniwa oraz sprawność). Przykładową próbkę elastycznego pokrycia (oznaczoną symbolem EPF\_02) wyko-

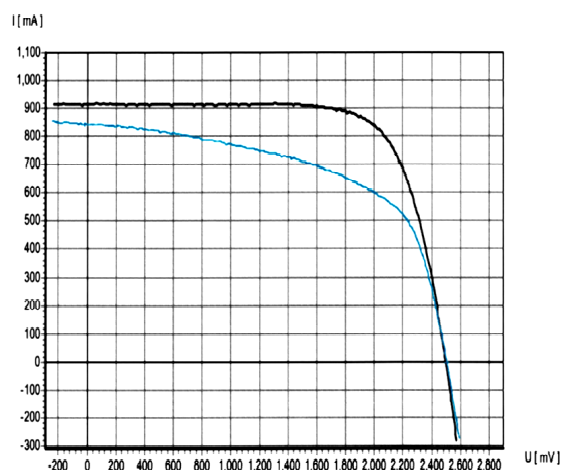
nano na tkaninie nośnej MP144/I (tkanina poliamidowa, biel surowa), przy zastosowaniu kopolimeru EVA (kopolimer etylenu i octanu winylu), ogniw fotowoltaicznych oraz folii do laminacji. Próbką ta nie posiada dodatkowych zabezpieczeń. Podłoża elastyczne (tkaniny) zostały wykonane przez firmę Lubawa S.A.

Badania charakterystyk prądowo-napięciowych EPF wykonywano na stanowisku do badań ogniw fotowoltaicznych - rysunek 7.



Rys. 7. Badania elektryczne elastycznego pokrycia

W wyniku badania otrzymano charakterystykę prądowo-napięciową określającą parametry elektryczne próbki, jak przedstawiono dla ogniwa EPF\_02 na rysunku 8.

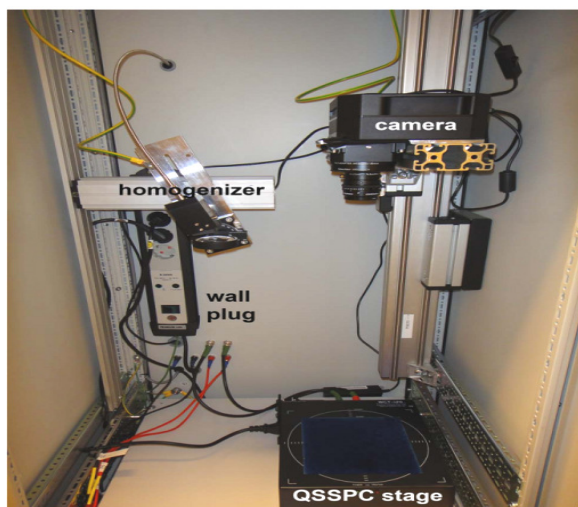


Rys. 8. Badania elektryczne elastycznego pokrycia

Podczas procesu produkcyjnego bardzo istotną kwestią jest badanie jakości wykonania elastycznego pokrycia fotowoltaicznego po procesie laminacji. Jest to szczególnie istotne, gdyż na tym etapie powstaje najwięcej defektów.

Badanie jakości pokrycia wykorzystujące metodę elektroluminescencji jest bardzo dokładne, komplikuje ono jednak proces produkcyjny ze względu na stosunkowo długi czas ekspozycji próbki i konieczność zapewnienia braku oświetlenia w trakcie badania. W związku z tym wydawało się zasadnym wprowadzenie innej, prostszej metody o mniejszej dokładności, ale wystarczającej do wykrycia wadliwych produktów. Taką metodą jest badanie z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Kontrola pokrycia odbywa się w standardowym oświetleniu linii produkcyjnej. Na czas pomiaru segment pokrycia EPF jest zasilany w kierunku przewodzenia napięciem stałym o parametrach zbliżonych do wydajności fotowoltaicznej. Rozkład temperatury na powierzchni segmentu jest sprawdzany kamerą termalną. Uszkodzone fragmenty pokrycia mają niższą temperaturę niż fragmenty ogniwa nieuszkodzone (sprawne). Metoda ta jest szybka i może się sprawdzić się w warunkach produkcyjnych.

Badanie jakości wykonania próbki z wykorzystaniem zjawiska elektroluminescencji [6] wykonano na stanowisku przedstawionym na rysunku 9.



Rys. 9. Widok systemu wraz z kamerą i homogenizerem wiązki laserowej

Próbka pokrycia fotowoltaicznego jest na czas pomiaru umieszczona w komorze pomiarowej i zasilana w kierunku przewodzenia napięciem stałym o parametrach zbliżonych do wydajności fotowoltaicznej. Rozkład elektroluminescencji na powierzchni próbki sprawdzano kamerą. Uszkodzone fragmenty próbki nie generowały promieniowania, co na zobrazowaniu przedstawiono jako ciemny odcień szarości - rysunek 10.

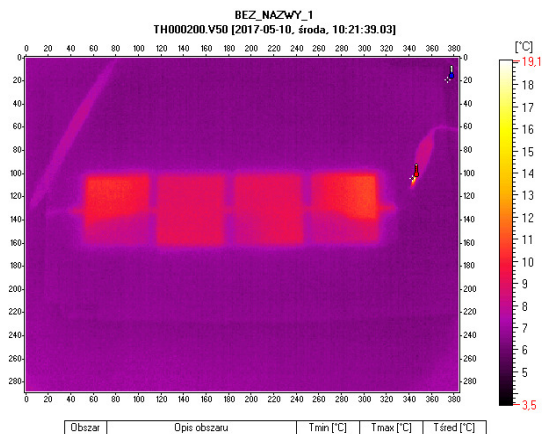


Rys. 10. Obraz elektroluminescencji pokrycia EPF\_02 i EPF\_05



Rys. 11. Stanowisko do badań ogniw słonecznych z wykorzystaniem kamery termowizyjnej

Podobnie jak w przypadku badania EPF metodą elektroluminescencji próbka fotowoltaicznego pokrycia w czasie pomiaru jest zasilana w kierunku przewodzenia napięciem stałym o parametrach zbliżonych do wydajności fotowoltaicznej. Rozkład termemisji na powierzchni próbki sprawdzano kamerą termalną. Uszkodzone fragmenty próbki nie generowały promieniowania, co na zobrazowaniu przedstawiono jako ciemny odcień fioleto - rysunek 12.

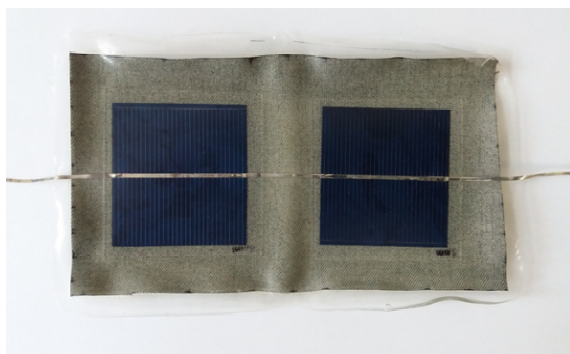


Rys. 12. Obraz termalny pokrycia EPF\_02 i EPF\_05

Metodami elektroluminescencji, jak i termemisji przebadano kilkanaście pokryć EPF na różnych podłożach. Wyniki badań pozwoliły stwierdzić, iż rodzaj stosowanej tkaniny nośnej w elastycznym pokryciu fotowoltaicznym ma niezwykle istotny wpływ na wartość sprawności EPF po uszkodzeniach mechanicznych. Uszkodzenia mechaniczne występować mogą w całym cyklu życia elastycznego pokrycia fotowoltaicznego, to jest:

- w czasie magazynowania,
- transportu,
- instalacji na miejscu pracy,
- obsługi w trakcie użytkowania.

Najbardziej korzystną z perspektywy ochrony ogniw fotowoltaicznych przed uszkodzeniami mechanicznymi okazała się próbka EPF\_05 wykonana na tkaninie nośnej MP144/I, przy zastosowaniu kopolimeru EVA, ogniwa fotowoltaicznego, folii do laminacji oraz szkła hartowanego o grubości 1 mm - rysunek 13.



Rys. 13. Próbka EPF\_05 – widok z przodu

W tym przypadku nie stwierdzono w obrazach elektroluminescencji uszkodzeń po poddaniu narażeniom mechanicznym. Główną przyczyną tak dobrej ochrony ogniw jest zastosowanie cienkiej warstwy szkła hartowanego, jako przedniej warstwy elastycznego pokrycia fotowoltaicznego.

### 5. Prototyp elastycznego pokrycia

Jako pierwsze prototypowe rozwiązanie elastycznego pokrycia fotowoltaicznego przyjęto wariant bez układów gromadzenia energii przedstawiony na rysunku 14.

Podstawowy wariant EPF (jeden segment), w wersji produkcyjnej, charakteryzuje się następującymi parametrami:



Rys. 14. Prototyp elastycznego pokrycia fotowoltaicznego

- napięcie wyjściowe: 36 V,
- maksymalna moc: 30 W,
- wymiary (dł× szer× wys): 1,6×0,5 ×1,5 mm,
- masa: ok. 1,9 kg,
- dobra elastyczność, wysoka sprawność oraz wieloletni okres użytkowania,
- może być produkowane o dowolnej długości, co umożliwia łączenie segmentów w celu zwiększenia mocy sumarycznej.

Przy realizacji rozwiązania EPF zawierającego magazyny energii [2] przewidziano zintegrowanie grup akumulatorów z elastycznym podłożem zawierającym ogniwa słoneczne. Do tego celu wybrano akumulatory litowo-jonowe LFP typu „pouch”, których cechą charakterystyczną jest niewielka grubość. Do grupy składającej się z 8 ogniw dedykowany byłby regulator ładowania i akumulator. Każda grupa 8 ogniw stanowiłaby autonomiczny element baterii fotowoltaicznej zaopatrzonej we własny regulator ładowania i akumulator litowo-jonowy. Połączenie grup, jak przedstawiono na rysunku 14 pozwoli uzyskać segment stanowiący źródło energii o wartości napięcia wyjściowego rzędu 32 V i umożliwiający pobór prądu ograniczony parametrami akumulatorów.



Rys. 14. Prototyp grupy 8 ogniw fotowoltaicznych

## 6. Podsumowanie

Elastyczne pokrycie fotowoltaiczne przeznaczone jest do budowy awaryjnego źródła zasilania, bądź wytworzenia generatora prądu elektrycznego w miejscu nie posiadającym żadnej infrastruktury energetycznej. Podstawowym odbiorcą elastycznych pokryć fotowoltaicznych (EPF) mogą być Siły Zbrojne RP, a także instytucje, takie jak: Policja, Straż Graniczna, Służby Ratownicze, a także odbiorca indywidualny. Osiągniętym efektem projektu jest wytworzenie prototypu EPF, jak również opracowanie procesów technologicznych. W ramach realizacji wykonano trzy prototypy, jako wersje przedprodukcyjne EPF. Pierwszy wariant zawiera tylko ogniwa słoneczne, dwa pozostałe wyposażone są dodatkowo w układy gromadzenia energii. Dzięki zastosowaniu układów gromadzenia energii możliwe jest wykorzystanie pokrycia jako źródła prądu elektrycznego przy braku światła słonecznego. Popyt na proponowane rozwiązanie EPF w dużej mierze zdeterminowany będzie przez stosunkowo łatwy montaż i nieskomplikowany sposób użytkowania tego typu urządzeń.

## 7. Literatura

- [1]. Drabczyk K., Maleczek S., Stoga D., Koncepcja quasi-elastycznych mozaikowych baterii słonecznych, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* 54(2013).
- [2]. Drabczyk K., Maleczek S., Stoga D., Koncepcja pozyskiwania i magazynowania energii na powierzchni z wykorzystaniem quasi-elastycznych mozaikowych baterii słonecznych, *Elektronika* 8(2015).
- [3]. Maleczek S., Malicki W., Drabczyk K., Cebrat A., Badanie elastycznych paneli fotowoltaicznych w aspekcie zastosowań militarnych, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* 55 (2014).
- [4]. Drabczyk K., Maleczek S., Panek P., Quasi-elastyczne mozaikowe taśmy fotowoltaiczne, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* 55(2014).
- [5]. Drabczyk K., Maleczek S., Badanie układów warstw zabezpieczających i kontaktów elektrycznych do zastosowań w quasi elastycznych taśmach fotowoltaicznych, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* 56(2015).
- [6]. Lipiński M., Kulesza G., Starowicz Z., „Obrazowanie luminescencyjne do charakteryzacji ogniw i modułów fotowoltaicznych”, *Elektronika*, 8(2014).