

# Zastosowanie polikrystalicznych ogniw krzemowych jako elastycznych pokryć fotowoltaicznych

Stanisław Maleczek, Marcin Szczepaniak, Wojciech Malicki, Kazimierz Drabczyk

## 1. Wstęp

Zaproponowane elastyczne pokrycie fotowoltaiczne [1, 4] (EPF) jest formą pośrednią pomiędzy sztywnym krzemowym ogniwem fotowoltaicznym a fotowoltaiką organiczną i cienko-warstwową, 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 zdefiniowany 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 pokryciu. 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 odciążenia zadanej długości EPF bez utraty właściwości elektrycznych.

**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 polikrysta-

liczne 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 w praktycznie w każdej sytuacji kryzysowej, może być wykorzystane np. jako element dachów namiotów lub jako wyposażenie osobiste żołnierza.

Słowa kluczowe: ogniwa słoneczne, system magazynowania energii, fotowoltaika

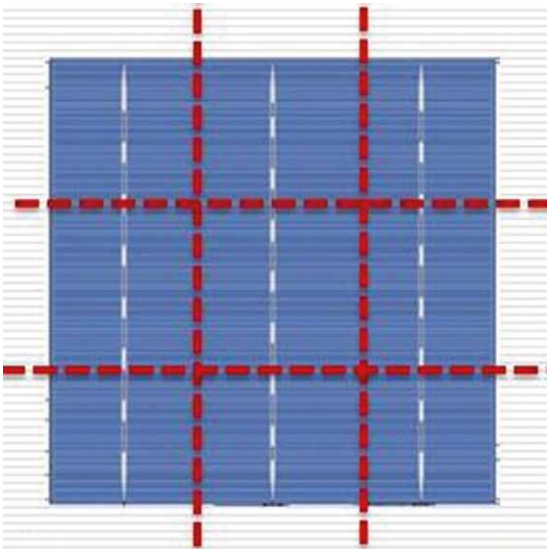
## 🇬🇧 APPLICATION OF POLYCRYSTALLINE SILICON CELLS AS ELASTIC PHOTOVOLTAIC COVERS

**Abstract:** The dependence of modern military equipment on electricity means that their efficiency and reliability depend very much on the continuity of electricity supply and its quality. The solution to reduce the risk of power loss may be the flexible solar cover implemented under the „GEKON - Generator of Ecological Concepts” program. Dynamic development of renewable sources causes a significant drop in their prices and improvement of their energy efficiency. The aforementioned advantages mean that conventional power sources (eg power generating sets) in the above-mentioned cases can be replaced by alternative sources. The essence of the project is to construct an innovative elastic photovoltaic cover made based on polycrystalline silicon cells. The project defined: the method of cutting individual

cells into smaller plates, selection of a flexible substrate, arrangement of tiles and the solution of the method of making connections between them, as well as the concept of a system of accumulating energy integrated with the cover. The results of basic coverage tests in the field of electrical measurements, electroluminescence and thermoemission are presented. Based on the work carried out, a model of flexible photovoltaic cover was made which is the basis for further project implementation. This solution is intended to provide a large autonomy in practically every crisis situation, it can be used, for example, as an element of tent roofs or as a soldier's personal equipment

Keywords: solar cells, energy storage system, photovoltaics





Rys. 4. Przykład cięcia ogniw

lub trzy łańcuchy ogniw, połączone ze sobą równolegle. Dzięki takiemu połączeniu możliwe jest uzyskanie odpowiedniego napięcia i wydajności prądowej modułu.

W rozwiązaniu modelowym ogniwa słoneczne zostały połączone w sposób szeregowo-równoległy – rys. 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.

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

- z podkładką stabilizującą;
- ze szkłem zabezpieczającym przednią stronę ogniw;
- bez dodatkowych zabezpieczeń.

Proces laminacji przedstawiono na rysunku 6.

Architektura EPF była następująca:

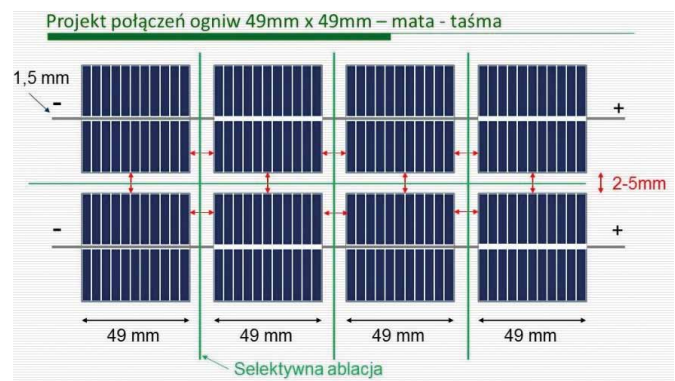
- tkanina / EVA / krzemowe ogniwo słoneczne / EVA / folia do laminacji;
- PET / EVA / krzemowe ogniwo słoneczne / EVA / folia do laminacji;
- tkanina / EVA / krzemowe ogniwo słoneczne / EVA / szkło hartowane.

#### 4. Badania modelu pokrycia

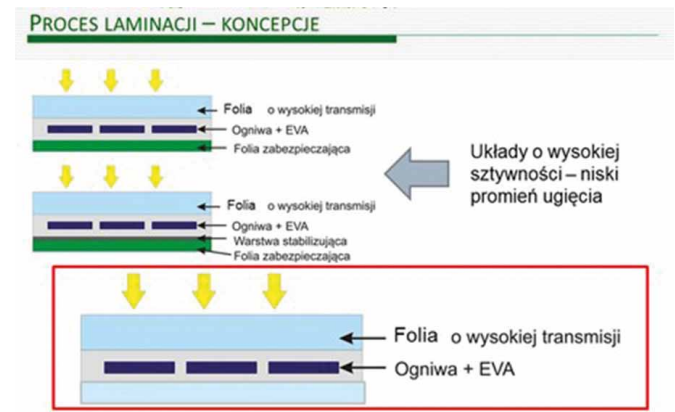
Badania [3, 5] miały na celu sprawdzenie parametrów elektrycznych wytworzonych próbek elastycznych pokryć fotowoltaicznych. W celu realizacji powyższych założeń przeprowadzono trzy etapy badań, obejmujące:

- analizę parametrów elektrycznych EPF przed i po uszkodzeniach mechanicznych;
- analizę jakości wykonania EPF metodą elektroluminescencji;
- analizę jakości wykonania EPF metodą termoemisji.

Po wstępnym zweryfikowaniu parametrów elektrycznych próbek w pierwszym etapie badań poddano je 50-krotnemu zginaniu, po czym ponownie zmierzono ich parametry



Rys. 5. Przykładowy wariant modelu pokrycia fotowoltaicznego



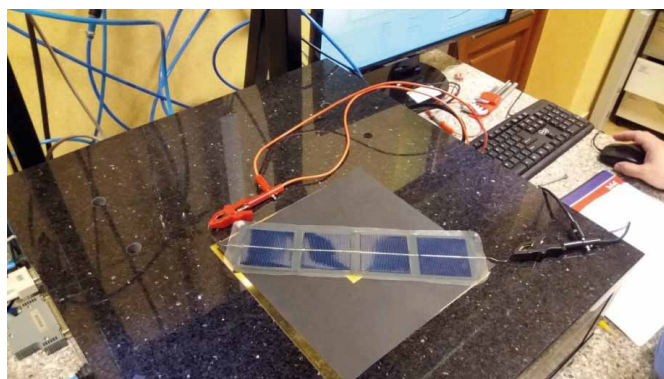
Rys. 6. Koncepcja procesu laminacji

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 zwarciovowy ogniwa oraz sprawność). Przykładową próbkę elastycznego pokrycia (oznaczoną symbolem EPF\_02) wykonano na tkaninie nośnej MP144/I (tkanina poliamidowa, biel surowa), przy zastosowaniu kopolimeru EVA (kopolimer etylenu i octanu winylu), ogniw fotowoltaicznych oraz folii do laminacji. Próbka ta nie posiada dodatkowych zabezpieczeń. Podłoża elastyczne (tkaniny) zostały wykonane przez firmę Lubawa SA.

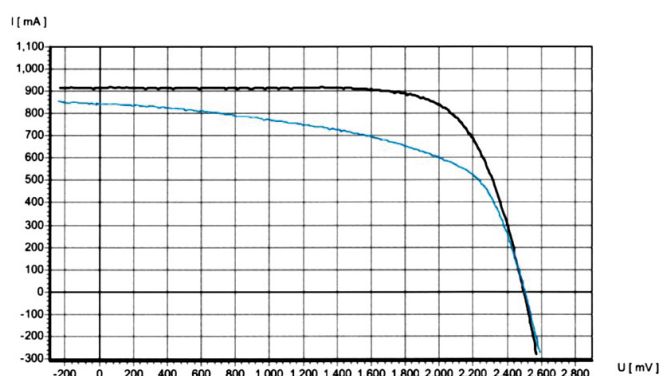
Badania charakterystyk prądowo-napięciowych EPF wykonywano na stanowisku do badań ogniw fotowoltaicznych – rys. 7.

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

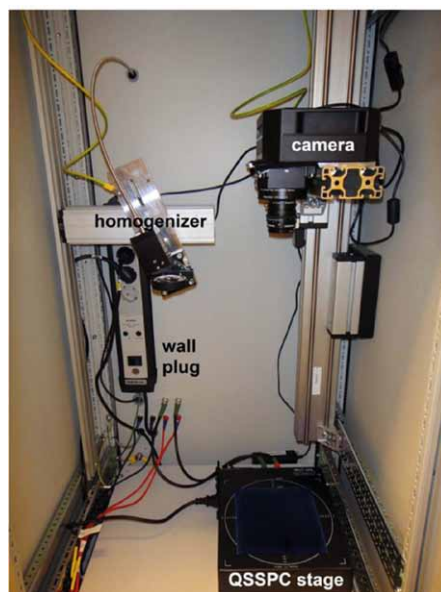




Rys. 7. Badania elektryczne elastycznego pokrycia



Rys. 8. Badania elektryczne elastycznego pokrycia



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



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

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 w warunkach produkcyjnych.

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

Próbka pokrycia fotowoltaicznego na czas pomiaru jest umieszczona w komorze pomiarowej i zasilana w kierunku



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

przewodzenia napięciem stałym o parametrach zbliżonych do wydajności fotowoltaicznej. Rozkład elektroluminescencji na powierzchni próbki sprawdzano kamerą. Uszkodzone fragmenty próbki nie generowały promieniowania, co na zobrażeniu przedstawiono jako ciemny odcień szarości – rys. 10.

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 obrazowaniu przedstawiono jako ciemny odcień fioleto – rys. 12.

Metodami elektroluminescencji, jak i termoemisji 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 korzystna 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 – rys. 13.

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.

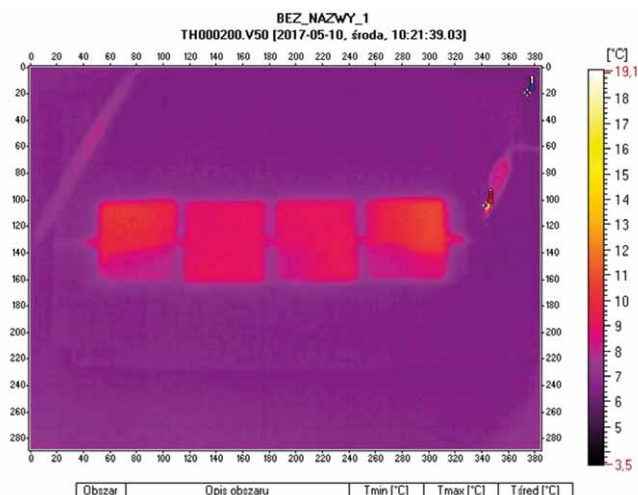
Podstawowy wariant EPF (jeden segment), w wersji produkcyjnej, charakteryzuje się następującymi parametrami:

- 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 umożliwiającą pobór prądu ograniczony parametrami akumulatorów.

## 6. Podsumowanie

Elastyczne pokrycie fotowoltaiczne przeznaczone jest do budowy awaryjnego źródła zasilania bądź wytworzenia generatora prądu elektrycznego w miejscu nieposiadającym żadnej



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



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




Rys. 14. Prototyp elastycznego pokrycia fotowoltaicznego



infrastruktury energetycznej. Podstawowym odbiorcą elastycznych pokryć fotowoltaicznych (EPF) mogą być Siły Zbrojne RP, a także instytucje takie, jak: Policja, Straż Graniczna, Służby Ratownicze oraz 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.

### 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.

 dr inż. Stanisław Maleczek, dr inż. Marcin Szczepaniak,  
inż. Wojciech Malicki – Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej;  
Kazimierz Drabczyk – Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej  
PAN

artykuł recenzowany