

Eksperymentalne badanie wpływu zjawiska fali stojącej na jakość zgrzewu materiałów termoplastycznych w metodzie zgrzewania wysoką częstotliwością

Streszczenie. W odniesieniu do dielektryków polarnych metoda zgrzewania tworzyw sztucznych polem elektrycznym wysokiej częstotliwości jest obecnie najskuteczniejszą metodą pod względem prędkości zgrzewania, wydajności procesu, oraz jakości otrzymywanych połączeń. Niemniej jednak, producenci maszyn opartych na tej zasadzie działania muszą brać pod uwagę efekty falowe, które mają bezpośredni wpływ na proces zgrzewania, a które nie występują w innych metodach zgrzewania. Efekt fali stojącej, będący jednym z takich efektów, ma bezpośredni wpływ na proces zgrzewania tworzyw sztucznych. W pracy przedstawiono metody wizualizacji tego efektu i badanie jego wpływu na jakość zgrzewu.

Abstract. Considering polar dielectric materials, the high frequency electric field welding method of plastics is the most effective in terms of welding speed, efficiency of the process, and quality of the weld seam. However, the manufacturers of the machines working on this principles should take into account the wave effects, which affect the welding process and do not occur in other welding methods. The standing wave effect, being one of these effects have a direct impact on the welding process of plastic materials. The paper presents the study of this effect influence on the weld seam quality, and some methods of visualisation are described. (*Experimental investigation on influence of standing wave effect in high frequency welding method on the seam quality of thermoplastic materials*).

Słowa kluczowe: zgrzewanie tworzyw termoplastycznych, wysoka częstotliwość, zjawisko fali stojącej, wytrzymałość zgrzewu.

Keywords: welding of thermoplastics, high frequency, standing wave effect, strength of the weld seam

Wstęp

Ze względu na szerokie zastosowanie tworzyw termoplastycznych we współczesnym przemyśle, kluczowe znaczenie mają badania nad metodami ich przetwarzania. Szczególną uwagę należy zwrócić na zgrzewanie tworzyw termoplastycznych, jako jedną z najczęściej stosowanych metod. Istnieje wiele metod przetwarzania tworzyw sztucznych opisanych w licznych przeglądach [1, 2], wśród których wyróżnia się metoda zgrzewania wysoką częstotliwością ze względu na szybkość procesu i jakość otrzymywanych zgrzewów.

Podstawy fizyczne procesu zgrzewania wysoką częstotliwością częściowo figurują w zakresie teorii elektromagnetyzmu. Ciepło niezbędne do zgrzewania termoplastu wydziela się bezpośrednio w zgrzewanym materiale i jest skutkiem dyssypacji energii w trakcie procesów polaryzacyjnych w strukturze molekularnej materiału, które odbywają się przy każdej zmianie kierunku pola elektrycznego. Charakterystyką prędkości zmian kierunku pola elektrycznego jest częstotliwość pracy urządzenia zgrzewającego, ograniczona pasmem ISM – najczęściej jest to 27,12 MHz lub 40,68 MHz. Ze względu na fizykę procesu, do efektywnego zgrzewania metodą wysokiej częstotliwości dedykowane są materiały, które posiadają grupy polarne w strukturze molekularnej, co przekłada się na wysokie wartości stałej elektrycznej ϵ i tangensa kąta strat $\tan \delta$. Takimi materiałami są: polichlorek winylu (PVC), poliuretan (PU), politereftalan etylenu (PET) oraz wiele innych.

Opis fizyczny zgrzewania tworzyw termoplastycznych wysoką częstotliwością w przypadku ogólnym jest złożonym problemem interdyscyplinarnym: do precyzyjnego opisu procesu należy stosować zagadnienia z elektromagnetyzmu, termodynamiki oraz mechaniki. W związku z tym istnieje dużo zjawisk, które należy brać pod uwagę podczas projektowania zgrzewarek dielektrycznych. Ważnym jest również zrozumienie, że zjawiska elektromagnetyczne występujące w zgrzewarkach wysokiej częstotliwości mogą skutkować zjawiskami termicznymi, które z kolei mogą w istotny sposób wpływać na proces zgrzewania i na jakość otrzymanych zgrzewów. Jednym z takich zjawisk jest efekt fali stojącej – przedmiot niniejszej pracy.

Głębokość wnikania fali elektromagnetycznej

Rozkład pola elektrycznego ma duży wpływ na rozkład temperatury w zgrzewanym materiale. To podkreśla niezbędność oszacowania wpływu zjawisk, które występują podczas zgrzewania termoplastów równoległe ze zjawiskiem fali stojącej. W celu obserwacji tego efektu oraz determinacji jego wpływu na jakość zgrzewu konieczna jest eliminacja, albo co najmniej oszacowanie wpływu współistniejących z nim zjawisk. Jednym z nich, które może mieć wpływ na rozkład pola, jest tłumienie pola elektrycznego przez zgrzewany materiał.

Głębokość wnikania fali elektromagnetycznej do materiału opisuje się wzorem:

$$(1) \quad 1/\alpha = \frac{\lambda_0}{2\pi} \left[\frac{2}{\kappa'(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \right]^{1/2}$$

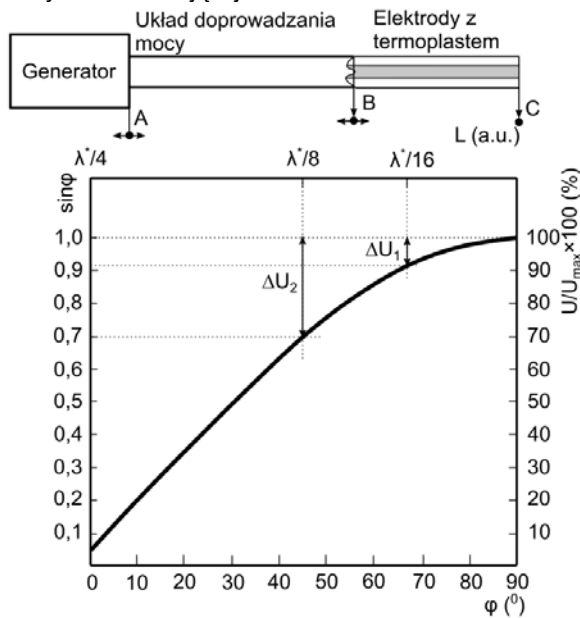
gdzie: $1/\alpha$ – odległość tłumienia, na której amplituda pola zmniejsza się do $1/e=0,368$ od swojej wartości przy powierzchni, λ_0 – długość padającej fali, $\kappa'=\epsilon'/\epsilon_0$ i $\tan \delta=\epsilon''/\epsilon'$ – zespolone współczynniki dielektryczne materiału.

Analiza wzoru (1) w przypadku częstotliwości 27,12 MHz pokazuje, że głębokość wnikania pola jest bardzo duża relatywnie do grubości materiału, i nie może wnosić widocznego wkładu do niejednorodności pola elektrycznego. Ponadto pozwala to stwierdzić, że niejednorodności pola powiązane z tłumieniem mogą być pominięte w niniejszej pracy poświęconej badaniu zjawiska fali stojącej.

Zjawisko fali stojącej

Innym zjawiskiem falowym, które ma bezpośredni wpływ na jednorodność pola na długości elektrody, jest efekt fali stojącej. Zjawisko to jest powszechnie znane w inżynierii radiowej oraz w budowie długich linii zasilania i polega na tym, że w niedopasowanej do obciążenia długiej linii transmisyjnej, wymiary której są rzędu długości fali, pojawiają się lokalne maksima i minima napięcia. W

rzeczywistości układ doprowadzenia energii wysokiej częstotliwości w zgrzewarkach dielektrycznych jest analogiczny do długiej linii transmisyjnej otwartej [3]. Rozkład napięcia w takim układzie jest schematycznie pokazany na rysunku 1. Na końcu linii długiej, który to w przypadku urządzenia zgrzewającego jest końcem elektrod (punkt C), powstaje maksimum napięcia. Wraz z oddalaniem się od końca elektrody napięcie maleje i osiąga minimum w środkowej części jej długości, gdzie zwykle jest wykonane połączenie elektryczne (punkt B). To minimum w środku długości elektrody jest istotne z punktu widzenia stosowanej technologii zgrzewania, ale trzeba zaznaczyć, że układ doprowadzania energii też jest częścią linii długiej (między punktami A i B), i może zawierać sekcje z jeszcze niższym napięciem. Symetria elektrody względem połączenia elektrycznego powoduje, iż maksima napięcia powstają na obu końcach elektrody. Różnica napięcia między końcem a środkiem elektrody (ΔU_1 i ΔU_2) jest zależna od długości fali w układzie długości elektrod; osiąga wartość maksymalną, gdy odległość od połączenia zasilającego jest równa $\frac{1}{4}$ długości fali. Z uwagi na fakt, iż zgrzewarki dielektryczne pracują w trybie niedopasowanym, ze względu na zależne od temperatury parametry dielektryczne wsadu, wartość minimum zależy od współczynnika fali stojącej w układzie.



Rys. 1 Przykładowy rozkład napięcia w układzie transmisji energii w zgrzewarce dielektrycznej (L – długość linii transmisyjnej, U – napięcie, φ – faza, λ^* – długość fali w ośrodku).

Eksperyment

Głównym zagadnieniem opisującym generację, transport i rozkład ciepła w zgrzewanym materiale jest niestacjonarne równanie transportu ciepłego z wewnętrznymi źródłami ciepła:

$$(2) \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = \Omega \nabla^2 T + \frac{P}{\rho c}$$

gdzie: T – temperatura, τ – czas, Ω – współczynnik przewodnictwa temperaturowego, ρ – gęstość, c – ciepło właściwe i P – gęstość mocy wewnętrznych źródeł ciepła.

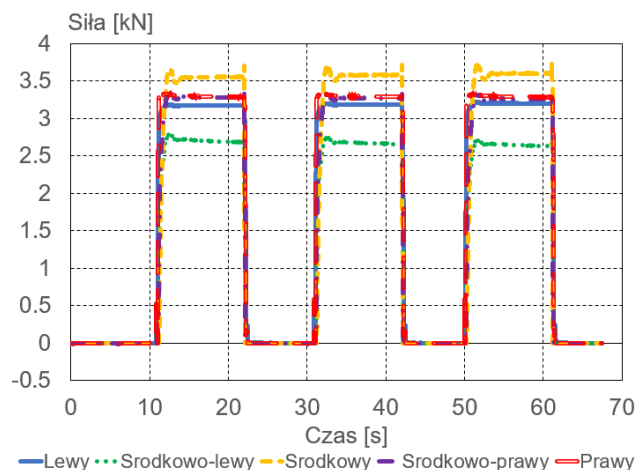
Generacja ciepła w materiale jest włączona w równanie (2) poprzez gęstość mocy P , którą z kolei opisuje się równaniem:

$$(3) \quad P = \frac{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'(T) t g \delta(T) U^2}{d^2}$$

gdzie: f – częstotliwość, ε_0 – przenikalność elektryczna próżni, $\varepsilon'(T)$ – zależna od temperatury część rzeczywista przenikalności elektrycznej materiału, $t g \delta(T)$ – zależny od temperatury współczynnik strat dielektrycznych, d – odległość między elektrodami zgrzewającymi.

Zależność (3) charakteryzuje moc strat ciepłych w płaskim kondensatorze, przy czym parametrami odpowiedzialnymi za rozkład pola elektrycznego wzdłuż elektrod są napięcie z uwzględnionym efektem fali stojącej oraz odległość pomiędzy elektrodami. Z tego wynika, że w celu obserwacji, jaki wpływ ma zjawisko fali stojącej na jakość zgrzewu, należy zminimalizować wpływ wkładu materiału zgrzewanego wynikającego z różnic odległości pomiędzy elektrodami. Warto również pamiętać o zależnych od temperatury parametrach dielektrycznych, których wartości wzrastają wraz ze wzrostem temperatury, co z kolei powoduje zwiększenie mocy generowanego ciepła w obszarach o większej temperaturze, a to skutkuje wzmacnieniem wpływu efektu fali stojącej na rozkład temperatury.

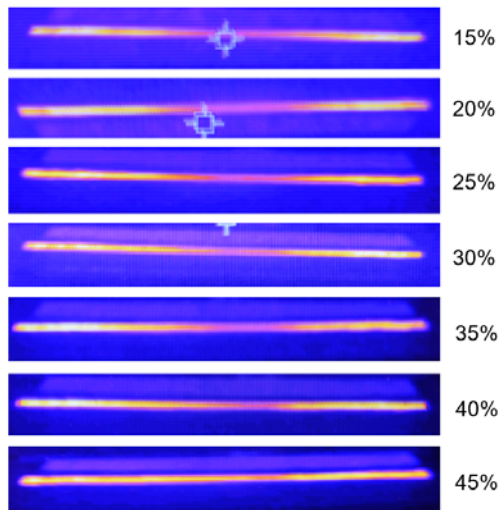
Badane urządzenie zgrzewające posiadało prasę dociskającą górną elektrodę o wymiarach 150x50 mm z siłą 15 kN do materiału, dlatego konwencjonalne metody pomiaru odległości okazały się mało użytecznymi. W celu minimalizacji różnic odległości pomiędzy elektrodami na ich długości została wykonana specjalna procedura poziomowania elektrod. Zastosowano pięć identycznych czujników tensometrycznych do pomiaru siły docisku w pięciu punktach na całej długości elektrody. Dostosowując położenie odpowiednich elementów poziomujących maszyny osiągnięto równomierność docisku względem wartości otrzymanych z czujników tensometrycznych. Wyniki pomiaru siły docisku po procedurze poziomowania są zaprezentowane na rysunku 2.



Rys. 2 Wyniki pomiaru rozkładu siły docisku przy użyciu czujników tensometrycznych po procedurze poziomowania elektrody (w legendzie zaznaczono pozycje czujników).

Po procedurze poziomowania zostały wykonane zgrzewy dwóch warstw materiału termoplastycznego elastomeru poliuretanowego (TPU, typ TPU2007) przy różnych ustawieniach maszyny zgrzewającej. Zgrzewy różniły się wskaźnikiem sprzężenia wyrażonym w procentach, który w rzeczywistości zależał od pojemności kondensatora sprzęgającego generator z obciążeniem w postaci elektrod i wsadu dielektrycznego. Badanie wstępne,

które pozwoliło szybko zwizualizować rozkład temperatury wzdłuż elektrody oraz zweryfikować obecność wpływu zjawiska fali stojącej, zostało przeprowadzone przy użyciu kamery termowizyjnej. Zdjęcia wykonywano dwie sekundy po zakończeniu zgrzewania, tuż po podniesieniu przasy urządzenia. Rozkład temperatury otrzymany z kamery termowizyjnej dla zgrzewów o czasie zgrzewania 5 s, i dla różnych współczynników sprzężenia, są pokazane na rys. 3.



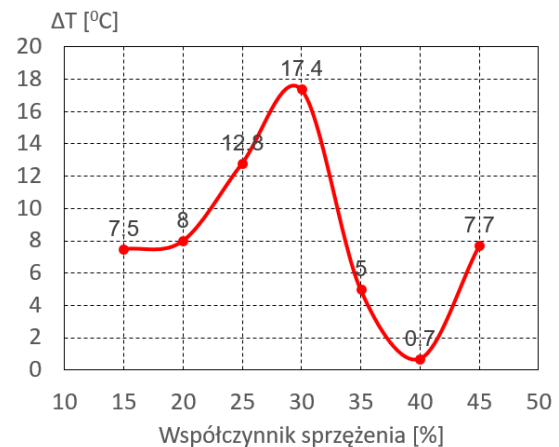
Rys. 3 Zdjęcia zgrzewów wykonane kamerą termowizyjną (z prawej strony jest zaznaczony wskaźnik sprzężenia w procentach).

Na rysunku 3 dobrze widać, że rozkład temperatury nie jest jednorodny: w środku długości elektrody występuje minimum, co potwierdza obecność zjawiska fali stojącej. Przy wyższych wartościach wskaźnika sprzężenia rozkład temperatury jest bardziej jednorodny, niż przy niższych. Może być to powiązane z tym, że przy wyższym wskaźniku sprzężenia do materiału dostarczana jest większa moc, co powoduje osiągnięcie temperatury płynięcia również w środkowej części długości zgrzewu. Jednocześnie na końcach długości zgrzeiny temperatura płynięcia zostaje osiągnięta wcześniej, a nadwyżka energii cieplnej powoduje kontynuację transformacji fazowej materiału, a nie jego dalsze nagrzewanie (ciepło utajone przemiany w przejściach fazowych pierwszego rodzaju). Ponadto, współczynnik strat dielektrycznych wzrasta wraz ze wzrostem temperatury [4], aż nie osiągnie maksimum w temperaturze płynięcia, po czym następuje zmniejszenie prędkości nagrzewania się materiału zgodnie ze wzorem (3).

W celu sprawdzenia wyżej opisanej koncepcji przeprowadzono pomiary temperatury używając termometru na podczerwień. Pomiar temperatury materiału został wykonany w dwóch punktach odpowiadających środkowi i końcu elektrody. Wartości temperatur mierzone w czasie rzeczywistym były rejestrowane w trybie automatycznym, co pozwoliło zredukować błędy powiązane z czasem reakcji operatora. Zaprezentowano wyniki pomiarów w postaci zależności różnicy temperatur pomiędzy dwoma punktami kontrolnymi od współczynnika sprzężenia (rys. 4).

Zależność przedstawiona na rysunku 4 wykazuje najpierw wzrost różnicy temperatury, powiązany z szybszym wzrostem parametrów dielektrycznych w gorących obszarach, co z kolei skutkuje szybszym nagrzewaniem się materiału. Maksimum pojawia się w momencie, gdy energii dostarczonej do materiału jest wystarczająco dużo do osiągnięcia temperatury płynięcia w

punkcie pomiarowym na końcu zgrzewu, po czym różnica temperatur zaczyna ulegać redukcji. Kolejny wzrost różnicy temperatur może być powiązany z zakończeniem przemiany fazowej i dalszym nagrzewaniem się materiału na końcu długości zgrzewu w czasie, gdy temperatura w środku osiąga wartości temperatury płynięcia.

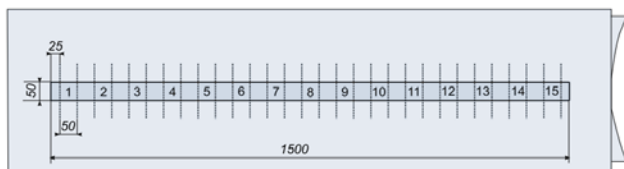


Rys. 4 Zależność różnicy temperatur między środkiem a końcem zgrzewu od współczynnika sprzężenia.

Przedstawiona metodyka pozwala na pomiar temperatury wyłącznie powierzchni zgrzanego materiału, tuż po podniesieniu przasy, co nie pozwala na całkowite uniknięcie odpływu ciepła z powierzchni przed pomiarem samego zgrzewu. W takich pomiarach często stosuje się termopary [5], ale ich skuteczność nie została jeszcze sprawdzona w badaniach na maszynach zgrzewających o większej mocy. Dlatego, biorąc pod uwagę wszystkie wady metodyki pomiaru temperatury zgrzewu termometrem na podczerwień, zostaje ona jedną z niewielu metod użytecznych w danym przypadku.

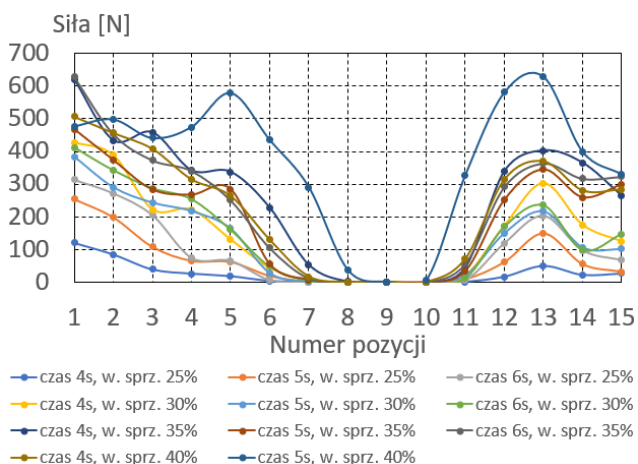
Jednym z najskuteczniejszych sposobów badania jakości zgrzewów jest test na oddzieranie przeprowadzony przy użyciu maszyny wytrzymałościowej [5]. Ten rodzaj testu jest znany i szeroko stosowany w praktyce. Modele zawierające fizyczny opis procesów mechanicznych zachodzących w materiale podczas testu zostały dobrze opisane w pracy [6]. W celu przeprowadzenia badań wytrzymałościowych wykonano zgrzewy dwóch warstw TPU (typ TPU2012). Materiał ten różnił się nieco od materiału wykorzystanego do pomiarów temperatury. Ze względu na szybszy odpływ ciepła został wybrany cieńszy materiał, co odpowiada najbardziej niekorzystnej sytuacji w zgrzewaniu wysokoczęstotliwościowym ze względu na szybkie odprowadzanie ciepła przez elektrody zgrzewające. Z drugiej strony, dla badań bazujących na opisanym wyżej pomiarze temperatury po ukończeniu procesu zgrzewania, grubsza warstwa materiału pozwala na otrzymanie dokładniejszego wyniku: ilość akumulowanej energii cieplnej jest większa niż w przypadku cienkiej warstwy i proces odpływu ciepła przez powierzchnie ma mniejszy wpływ na dokładność wyników.

Próbki do badań wytrzymałościowych zostały wycięte ze zgrzein wykonanych przy różnych współczynnikach sprzężenia i czasach zgrzewania. Z każdego zgrzewu wycięto 15 pasków o szerokości $50 \pm 0,5$ mm, tak jak to pokazano na rysunku 5. Próbki ponumerowano zgodnie z ich pierwotnym umiejscowieniem na długości zgrzeiny, od lewej do prawej (od 1 do 15).



Rys. 5 Schemat numeracji wyciętych ze zgrzeiny próbek.

Na otrzymanych próbkach przeprowadzono badania wytrzymałości na oddzieranie, podczas których mierzono siłę i wydłużenie próbki. Prędkość traweru szczęk maszyny wytrzymałościowej wynosiła 25 mm/min. Na podstawie wyników pomiarów otrzymano zależność maksymalnej siły w trakcie oddzierania od lokalizacji próbki na długości zgrzeiny, co zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6 Wyniki pomiarów maksymalnej siły oddzierania przy różnych parametrach zgrzewania w zależności od lokalizacji na zgrzeinie.

Wyniki przedstawione na rysunku 6 ilustrują, że na skutek zjawiska fali stojącej warstwy materiału, znajdujące się pod środkową częścią długości elektrody, nie zostały zgrzane. Zasięg obszaru, w którym siła oddzierania jest bliska zero, jest zależny od parametrów zgrzewania: im dłuższy jest czas zgrzewania i czym większy jest wskaźnik sprężenia, tym węższy jest ten obszar. Warto zaznaczyć, że w tym przypadku niska jakość połączenia jest skutkiem nieosiągnięcia temperatury płynięcia w środkowej części materiału, na co miał wpływ szybszy odpływ ciepła w porównaniu do grubszego materiału, na którym przeprowadzono badania temperatury. Powoduje to jeszcze większą różnicę prędkości wzrostu temperatury pomiędzy środkiem zgrzeiny a jej krawędzią, ze względu na większą różnicę parametrów dielektrycznych. Skutkuje to zwiększeniem wpływu zjawiska

fali stojącej na jednorodność zgrzeiny wraz ze zmniejszeniem grubości zgrzewanych warstw.

Podsumowanie

W przedstawionej pracy zaprezentowano mechanizm oddziaływania zjawiska fali stojącej na jakość zgrzewu wykonanego metodą wysokiej częstotliwości. Zaproponowano kilka metod eksperymentalnych, pozwalających zwizualizować i ocenić wpływ tego efektu na proces zgrzewania materiału. Otrzymano zależność pomiędzy parametrami zgrzewania (czas trwania zgrzewania i współczynnik sprężenia), a wpływem efektu na wartość siły oddzierania zgrzewu. Ponadto zaobserwowana została korelacja pomiędzy grubością warstw zgrzewanego materiału, a niekorzystnym wpływem efektu na jakość zgrzewu.

Badania przeprowadzono w związku z projektem pn. „Badanie i modyfikacja maszyn ze względu na emisję pola elektromagnetycznego” realizowanym w ramach dofinansowania z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, 2-ga oś priorytetowa „Wsparcie otoczenia i potencjału przedsiębiorstw do prowadzenia działalności B+R+I”, Działanie 2.1 „Wsparcie inwestycji w infrastrukturę B+R przedsiębiorstw”.

Autorzy: mgr Anton Los, Centrum Badawczo Rozwojowe FIAB, ul. Rakietowa 38, 54-615 Wrocław, E-mail: a.los@fiabmachines.com; mgr inż. Dariusz Kobylarz, Centrum Badawczo Rozwojowe FIAB, ul. Rakietowa 38, 54-615 Wrocław, E-mail: d.kobylarz@fiabmachines.com; mgr inż. Gabriela Sobolewska, Centrum Badawczo Rozwojowe FIAB, ul. Rakietowa 38, 54-615 Wrocław, E-mail: g.sobolewska@fiabmachines.com; mgr inż. Paulina Kotula, Centrum Badawczo Rozwojowe FIAB, ul. Rakietowa 38, 54-615 Wrocław, E-mail: p.kotula@fiabmachines.com

LITERATURA

- [1] Anahi Pereira da Costa, Edson Cocchieri Botelho, Michelle Leali Costa, Nilson Eiji Narita, Jose Ricardo Tarpani, A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications, *Journal of Aerospace Technology and Management* 4 (2012), 255-265
- [2] Ali Yousefpour, Mahmoudreza Hojjati, Jean-Pierre Immarigeon, Fusion Bonding/Welding of thermoplastic Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 17 (2004), 303-341
- [3] Z. Urbaniak, Zgrzewanie tworzyw sztucznych, *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa* (1997), 99-120
- [4] Stephanie Hollande, Jean-Louis Laurent and Thierry Lebey, High-frequency welding of an industrial thermoplastic polyurethane elastomer-coated fabric, *Polymer* 39 (1998), 5343-5349
- [5] Yabin Yang, Pan Zeng, Liping Lei, High-frequency dielectric heating and the strength of flexible polymer seams, *Journal of Materials Processing Technology* 215 (2015), 105-113
- [6] Yueguang Wei and John W. Hutchinson, Interface strength, work of adhesion and plasticity in the peel test, *International Journal of Fracture* 93 (1998), 315-333