

Wpływ parametrów zgrzewania wibracyjnego na jakość złączy z poliamidu 66

Aleksandra Węglowska¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.239

Streszczenie: Badano wpływ parametrów zgrzewania wibracyjnego na budowę obszaru zgrzewania złączy z poliamidu 66. Przeprowadzono obserwacje mikroskopowe z zastosowaniem mikroskopu optycznego oraz badania metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC). Określano wpływ amplitudy drgań (a), docisku zgrzewania (p_z) oraz czasu zgrzewania (t_z) na temperaturę topnienia oraz zawartość fazy krystalicznej w zgrzeinie oraz w materiale podstawowym złączy. Wytrzymałość mechaniczną połączeń z PA 66 oceniano w statycznej próbie rozciągania.

Słowa kluczowe: zgrzewanie wibracyjne, złącza z PA 66, stopień krystaliczności, struktura złączy, wytrzymałość złączy na rozciąganie.

Effect of vibration welding parameters on the quality of joints made of polyamide 66

Abstract: The aim of the study was to investigate the effect of vibration welding parameters on the structure of welding region in polyamide 66 joints. The quality of joints was examined under an optical microscope using polarized light. Differential scanning calorimetry (DSC) was used to study the influence of welding parameters: vibration amplitude (a), welding pressure (p_z) and weld time (t_z) on the melting temperature and the crystalline phase content in the weld as well as the base material of the joints. For low welding pressure and amplitude values, an amorphous phase was dominant in the welding region (Fig. 6a), while for higher values of these parameters an increase in the crystalline phase content was observed (Fig. 7). The mechanical strength of PA 66 joints was evaluated using a static tensile test (Table 3). Maximum tensile strength was in the range of 70 to 77 % of the value for the base material.

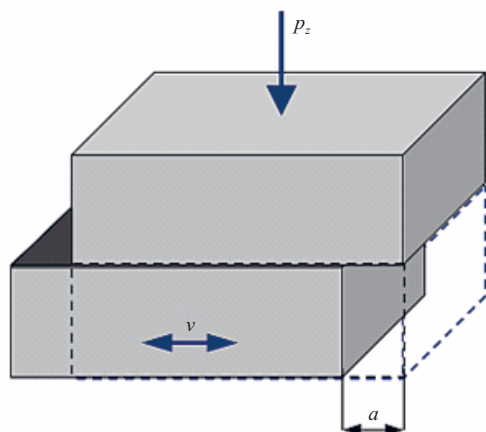
Keywords: vibration welding, joints of PA 66, degree of crystallinity, joint structure, tensile strength of joints.

Zgrzewanie wibracyjne to jeden z najbardziej powszechnych sposobów łączenia elementów wykonanych z termoplastycznych tworzyw polimerowych, zarówno o strukturze częściowo krystalicznej, jak i amorficznej. Metoda ta znalazła zastosowanie zwłaszcza w produkcji seryjnej, np. w przemyśle motoryzacyjnym do zgrzewania: zderzaków samochodowych, elementów desek rozdzielczych, obudów reflektorów; a także w produkcji przedmiotów codziennego użytku, takich jak: obudowy żelazek, elementy zmywarek do naczyń, obudowy elektronarzędzi itp. [1]. W procesie zgrzewania wibracyjnego wykorzystuje się zjawisko tarcia powierzchni elementów w obszarze ich łączenia, powodujące nagrzewanie, aż do chwili uzyskania temperatury topnienia oraz stanu uplastycznienia tworzywa [2–4]. Zasadnicza różnica pomiędzy konwencjonalną metodą obrotowego zgrzewania tarcowego a metodą zgrzewania wibracyjnego

wynika z rodzaju ruchu wykonywanego przez jeden ze zgrzewanych elementów. Podczas zgrzewania wibracyjnego jeden ze zgrzewanych elementów wykonuje ruch liniowy posuwisto-zwrotny, określane mianem drgań wibracyjnych o określonej, stałej częstotliwości oraz wybranej amplitudzie drgań. Proces jest realizowany z odpowiednim dociskiem wywieranym na elementy zgrzewane (rys. 1).

Do głównych parametrów procesu zgrzewania wibracyjnego zalicza się: amplitudę drgań a , czas zgrzewania t_z , docisk zgrzewania p_z , częstotliwość drgań n , skrócenie elementów s . Skrócenie elementów s to suma odcinków skrócenia zgrzewanych elementów (próbek), jakiemu ulegają one podczas procesu zgrzewania, odpowiadająca grubości warstwy tworzywa wyciśniętego do rąbka zgrzeiny. Prędkość zgrzewania v stanowi iloczyn amplitudy i częstotliwości drgań. Opisana technika może być wykorzystywana do łączenia elementów wykonanych z termoplastycznych tworzyw polimerowych nie-napełnianych oraz napełnianych i wzmacnianych, np. talkiem, włóknami szklanymi itp. Badania procesu zgrzewania wibracyjnego różnych gatunków termoplas-

¹⁾ Instytut Spawalnictwa, Zakład Technologii Zgrzewania i Inżynierii Środowiska, ul. Bł. Czesława 16-18, 44-100 Gliwice, e-mail: aleksandra.weglowska@is.gliwice.pl



Rys. 1. Parametry procesu zgrzewania wibracyjnego: a – amplituda drgań, p_z – docisk zgrzewania, v – prędkość ruchu posuwisto-zwrotnego w zaznaczonym kierunku

Fig. 1. Parameters of vibration welding process: a – amplitude, p_z – welding pressure, v – speed of the reciprocating movement in the marked direction

tycznych tworzyw polimerowych są prowadzone w wielu jednostkach badawczych na świecie [5–8]. Na podstawie wyników oceny wpływu parametrów zgrzewania na wytrzymałość mechaniczną oraz strukturę złączy z niewzmacnianych tworzyw polimerowych: PA 66, PA 6 oraz polipropylenu, jak również ich kompozytów z dodatkiem włókien szklanych w ilości 30 % mas. stwierdzono, że właściwości mechaniczne złączy są zależne od budowy obszaru zgrzewania [5, 7, 9–11]. Wykorzystując, prowadzone w spolaryzowanym świetle przechodzącym, badania mikroskopowe złączy z PA 6, autorzy publikacji [10, 12] zidentyfikowali w zgrzeinie kilka charakterystycznych obszarów, mianowicie: warstwę wewnętrzną o niejednoznacznie zdefiniowanym rodzaju struktury, warstwę sferolitów oraz pasmo zdeformowanej fazy krystalicznej przechodzące w materiał podstawowy złącza, w którym występuje struktura sferolityczna. Obszar zgrzewania na zewnątrz złącza jest otoczony wypływką. Zespół autorów [10] przedstawił wyniki badań wpływu siły docisku zgrzewania na zmiany w budowie zgrzeiny z PA 66. W przypadku zastosowanych trzech wartości siły docisku zgrzewania stwierdzono, że im większa jest jej wartość, tym szerokość obszaru zgrzewania (zgrzeiny) jest mniejsza i trudniej w niej wyodrębnić poszczególne obszary. Na podstawie badań wytrzymałości w próbie rozciągania oceniono, że największą wytrzymałością charakteryzowały się złącza wykonane w warunkach małych wartości docisku zgrzewania. Podobne wyniki otrzymali autorzy [7], badający proces zgrzewania wibracyjnego PA 66, według których najbardziej korzystne ze względu na wytrzymałość złączy jest zgrzewanie w warunkach małych wartości docisku zgrzewania, pozwala to bowiem na uzyskanie zgrzeiny o wielowarstwowej budowie.

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę wpływu wybranych parametrów zgrzewania wibracyjnego na

temperaturę oraz stopień krystaliczności obszaru zgrzewania, a także zależności budowy obszaru zgrzewania od parametrów procesu, przedstawionej w postaci obrazów mikrostruktur zgrzein złączy uzyskanych w przypadku różnych zestawów parametrów zgrzewania. Wyniki badań DSC oraz mikroskopowych analizowano w odniesieniu do wytrzymałości połączeń, badanej w statycznej próbie rozciągania. Szeroki zakres prezentowanych w niniejszym opracowaniu wyników badań, stanowi nowość na tle wyników prezentowanych przez innych naukowców.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

W badaniach zastosowano poliamid 66, o nazwie handlowej Tecamid 66, produkt firmy Ensinger. Tworzywo to, w grupie niemodyfikowanych poliamidów, cechuje największa sztywność, twardość oraz odporność na pęcznienie. PA 66 charakteryzuje się następującymi właściwościami: gęstość = 1,13–1,15 g/cm³, wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 70$ MPa (próbki kondycjonowane w temp. 23 °C i wilgotności 50 %), moduł Younga $E = 1300–2000$ MPa, wydłużenie przy zerwaniu kondycjonowanego PA 66 > 50 %, temperatura topnienia 225–260 °C, temperatura pracy ciągłej 100 °C i chwilowej 170 °C. PA 66 jest stosowany do produkcji obciążonych mechanicznie i termicznie części maszyn. Jest tworzywem dobrze poddającym się zgrzewaniu i spawaniu różnymi metodami.

Proces zgrzewania

Kształtki z PA 66, o wymiarach 10,0 × 33,0 × 56,0 mm, wycięto z płyty o grubości nominalnej 10,0 mm i zgrzewano doczołowo. Powierzchnia zgrzewania $S = 330,0$ mm², przed procesem zgrzewania była frezowana oraz oczyszczana alkoholem etylowym. Kształtki mocowano sztywno w oprzyrządowaniu zgrzewarki. Wykorzystywane w badaniach zestawy parametrów zgrzewania (tabela 1) dobrano na podstawie doświadczenia zdobytego w przeprowadzonych wcześniej badaniach procesu zgrzewania wibracyjnego. W przypadku każdego zestawu parametrów wykonano po trzy złącza.

Stanowisko do zgrzewania wibracyjnego

Badania procesu zgrzewania prowadzono w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach, wykorzystując zgrzewarkę wibracyjną firmy Branson typ M112-H, wyposażoną w zbudowany w Instytucie przyrząd pomiarowy VibRecord, umożliwiający z częstotliwością próbkowania do 10 kHz i w czasie do 20 s, rejestrację parametrów zgrzewania: amplitudę drgań a , skrócenie s oraz docisk zgrzewania p_z . Stanowisko było wyposażone w oprzyrządowanie górne, zamocowane w ruchomym zespole przesuwającym się wzdłuż szyn.

Tabela 1. Wybrane parametry zgrzewania wibracyjnego PA 66
Table 1. Selected vibration welding parameters for PA 66

$p_z = 1,35, \text{ MPa}$		$p_z = 2,58, \text{ MPa}$		$p_z = 3,87, \text{ MPa}$	
$a, \text{ mm}$	$t_z, \text{ s}$	$a, \text{ mm}$	$t_z, \text{ s}$	$a, \text{ mm}$	$t_z, \text{ s}$
1,0	7,0	1,0	7,0	1,0	5,5
	8,0		7,5		6,0
	9,0		8,0		6,5
1,2	5,5	1,2	4,0	1,2	3,5
	6,5		4,5		4,5
	7,5		5,5		5,0
1,6	3,5	1,6	2,5	1,6	2,5
	4,0		3,0		3,0
	5,0		3,5		3,5

wającym, oraz dolne, zamocowane na głowicy wibracyjnej. Podczas procesu zgrzewania głowica wibracyjna wprawia w ruch liniowy posuwisto-zwrotny dolne oprzyrządowanie wraz z zamocowaną próbką. Widok stanowiska badawczego oraz próbek mocowanych w oprzyrządowaniu zgrzewarki przedstawiono na rys. 2.

Do najważniejszych parametrów pracy zgrzewarki zalicza się: częstotliwość drgań $n = 240 \text{ Hz}$, amplitudę drgań $a = 0,7\text{--}1,8 \text{ mm}$, siłę docisku zgrzewania $F_t \leq 253 \text{ daN}$, powierzchnię zgrzewania $S \leq 30 \text{ cm}^2$, masę dolnego narzędzia $\leq 2,5 \text{ kg}$.

Metodyka badań

Jakość złączy z PA 66 oceniano na podstawie obserwacji mikroskopowych, prowadzonych w świetle przechodzącym spolaryzowanym, z wykorzystaniem mikroskopu laboratoryjnego Nikon Eclipse E200. Próbkę do badań (cienkie folie) o grubości 10–15 μm , pobierano za pomocą mikrotomu Thermo Finesse Me+ firmy ElektroMed, z materiału podstawowego nieobjętego oddziaływaniem termicznym oraz z obszaru zgrzewania obejmującego zgrzeinę. Obserwacje mikroskopowe prowadzono wzdłuż powierzchni złącza, ustawionej podczas zgrzewania równoległe do kierunku drgań. Na podstawie tych obserwacji określono wpływ parametrów zgrzewania na: ciągłość materiałową w obszarze zgrzewania, grubość warstwy uplastycznionego tworzywa oraz budowę strukturalną zgrzeiny.

Temperaturę topnienia oraz stopień krystaliczności próbek wyznaczono stosując metodę różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC), zgodnie z normą PN-EN ISO 11357-1.

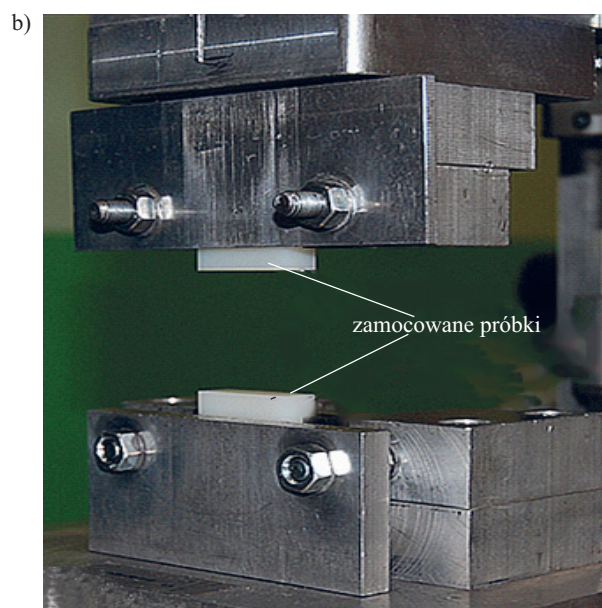
Właściwości mechaniczne złączy oceniano podczas statycznego rozciągania, za pomocą maszyny wytrzymałościowej INSTRON 4210, wg przyjętej metodyki.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Analiza termiczna DSC

Wyznaczone metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej wartości temperatury topnienia i stopnia krystaliczności materiału podstawowego – PA 66 oraz materiału z obszaru zgrzewania złączy zestawiono w tabeli 2. Rys. 3 i 4 przedstawiają krzywe topnienia badanych próbek.

Wykazano, że temperatura topnienia tworzywa w obszarze zgrzewania, w przypadku wszystkich badanych



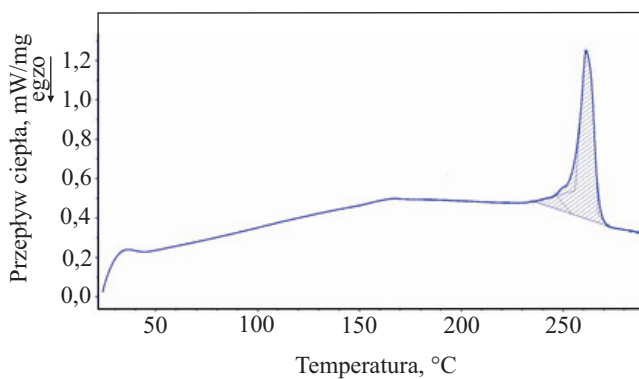
Rys. 2. a) Stanowisko do zgrzewania wibracyjnego: 1 – zespół przesuwający z oprzyrządowaniem górnym, 2 – głowica wibracyjna z oprzyrządowaniem dolnym, 3 – pulpit sterujący, 4 – układ sterowania, 5 – przyrząd pomiarowy VibRecord; b) widok próbek zamocowanych w oprzyrządowaniu

Fig. 2. a) View of the vibration welding stand: 1 – moveable set with an upper tooling, 2 – vibration head with a lower tooling, 3 – control desk, 4 – control system, 5 – VibRecord device; b) view of the samples fixed in the tooling

T a b e l a 2. Wyniki analizy termicznej DSC próbek materiału podstawowego oraz obszaru zgrzewania złączy z PA 66

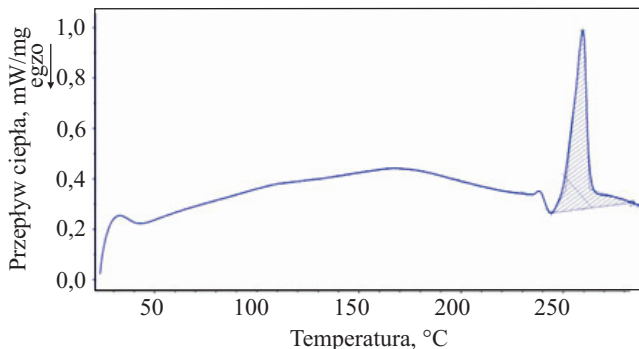
T a b l e 2. Results of DSC thermal analysis (melting temperature and degree of crystallization) of the base material PA 66 and the welding area of PA 66 joints

Nr próbki	p_z , MPa	a , mm	t_z , s	Temperatura topnienia, °C	Stopień krystaliczności, %
01 – materiał podstawowy PA 66	–	–	–	261,3	25,99
3 – zgrzeina	1,35	1,6	5,0	259,7	23,52
4 – zgrzeina	2,58	1,0	7,0	260,1	18,30
6 – zgrzeina	–	1,6	3,5	259,2	25,72
7 – zgrzeina	3,87	1,0	6,5	259,5	19,53
9 – zgrzeina	–	1,6	3,5	260,1	22,64



Rys. 3. Krzywa topnienia próbki materiału podstawowego PA 66 (nr 01 z tabeli 2)

Fig. 3. The melting curve for base material PA 66 (sample no 01 from Table 2)



Rys. 4. Krzywa topnienia materiału próbki nr 7 (por. tabela 2)

Fig. 4. The melting curve for the material from sample no 7 (see Table 2)

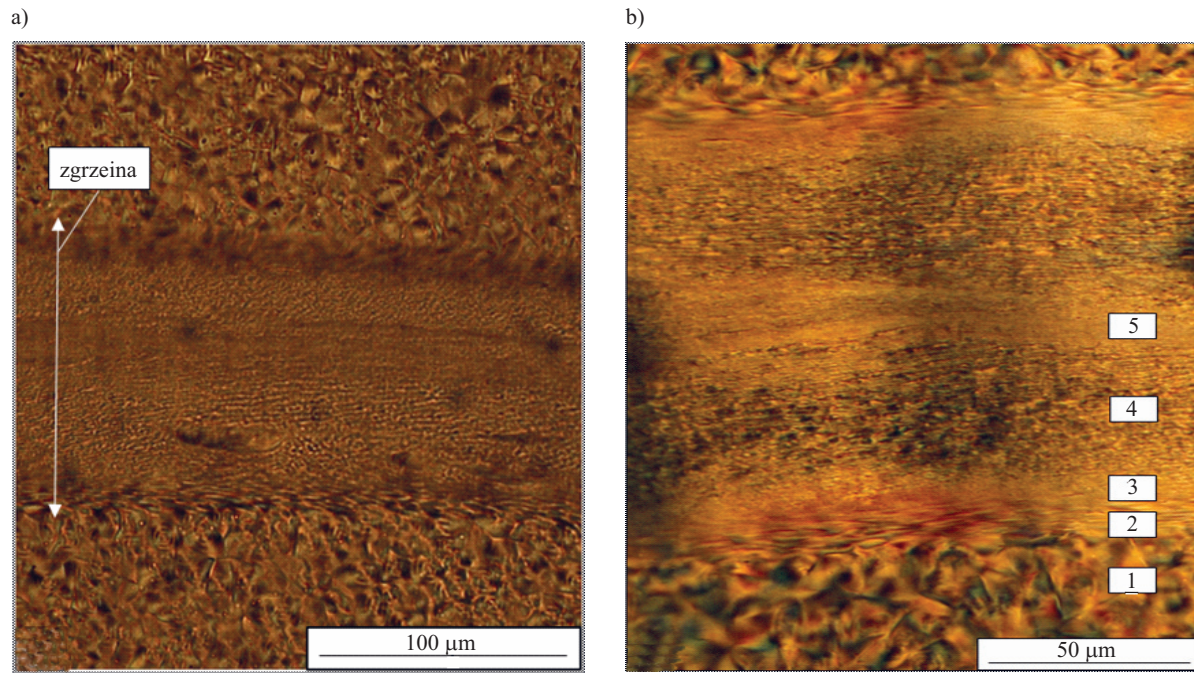
złączy, jest zbliżona do wartości temperatury topnienia materiału podstawowego i wynosi średnio 261,3 °C. Zawartość fazy krystalicznej w zgrzeinie zależy od parametrów zgrzewania, zwłaszcza od wartości amplitudy drgań oraz docisku zgrzewania. Największą zawartością fazy krystalicznej charakteryzowały się złącza wykonane przy docisku zgrzewania $p_z = 2,58$ MPa i amplitudzie drgań $a = 1,6$ mm. Stopień krystaliczności równy 25,72 % odpowiadał wartości stopnia krystaliczności (26 %) materiału podstawowego. Podczas zgrzewania z mniejszą

amplitudą drgań, $a = 1,0$ mm, stopień krystaliczności materiału zgrzeiny był mniejszy i wynosił 18,30 % i 19,53 % w przypadku zgrzewania z dociskiem, odpowiednio, 2,58 MPa i 3,87 MPa.

Badania mikroskopowe

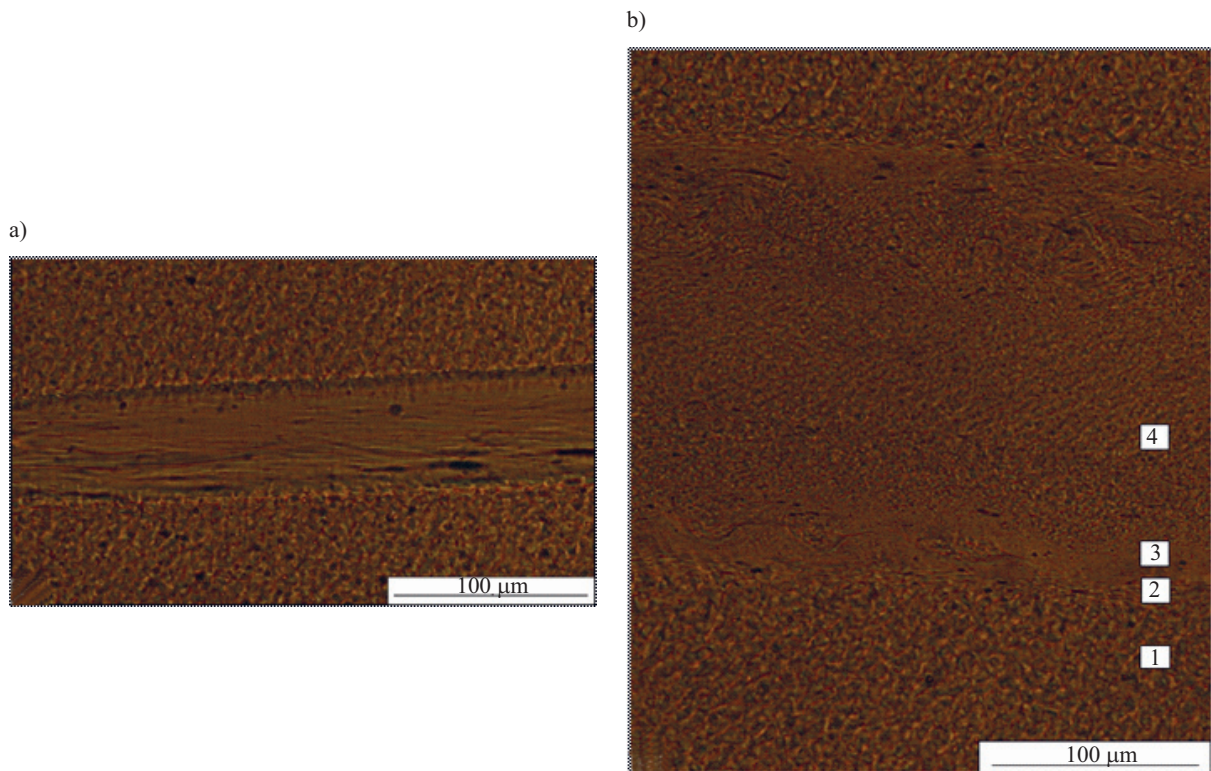
Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że we wszystkich badanych złączach została zachowana ciągłość materiałowa w obszarze zgrzewania. Na rys. 5 przedstawiono fragmenty mikrostruktury złącza wykonanego w warunkach określonych parametrami zgrzewania: $a = 1,0$ mm, $p_z = 2,58$ MPa, $t_z = 7,0$ s.

Analizując budowę obszaru zgrzewania złączy (rys. 5b), w zgrzeinie można zidentyfikować charakterystyczne obszary. Pierwszy obszar (1) stanowi materiał podstawowy, charakteryzujący się dobrze rozwiniętą uporządkowaną strukturą sferolityczną. W drugim obszarze (2) materiał PA 66 uległ odkształceniu cieplno-mechanicznemu – jest widoczna warstwa zdeformowanych, odkształconych sferolitów. Trzecia (3), cienka warstwa tworzywa wykazuje strukturę amorficzną. Czwarty obszar (4) można scharakteryzować jako warstwę zrekrystalizowaną, ze słabo rozwiniętą strukturą sferolityczną (sferolity są małe) i dużym udziałem struktury amorficznej. Obszar znajdujący się w centralnej części złącza (5) stanowi warstwę wewnętrzną struktury (prawdopodobnie amorficznej), której nie można jednoznacznie określić. Jest to warstwa materiału, znajdująca się w bezpośrednim styku zgrzewanych materiałów. Szerokość obszaru zgrzewania (zgrzeiny) w przypadku opisanego złącza wyniosł ok. 0,14 mm. Po zastosowaniu docisku zgrzewania $p_z = 1,35$ MPa, przy amplitudzie drgań $a = 1,0$ mm, w budowie obszaru zgrzewania nastąpiła zmiana (rys. 6a). W środkowej części złącza można wyróżnić jedynie warstwę wewnętrzną o strukturze amorficznej, następnie występuje warstwa zdeformowanych sferolitów oraz przejście do materiału podstawowego. Szerokość obszaru zgrzewania (zgrzeiny) jest bardzo mała i wynosi ok. 0,06 mm, co prawdopodobnie jest skutkiem zastosowanego mniejszego docisku zgrzewania. Złącza wykonane w takich warunkach charakteryzowały się małą wytrzymałością, a ze względu na wąską zgrzeinę, nie można było określić stopnia krystaliczności metodą DSC.



Rys. 5. a, b) Fragmenty mikrostruktury złączy z PA 66, wykonanych metodą zgrzewania wibracyjnego: $a = 1,0$ mm, $p_z = 2,58$ MPa, $t_z = 7,0$ s

Fig. 5. a, b) Fragments of the microstructure of PA 66 joins made by vibration welding method: $a = 1.0$ mm, $p_z = 2.58$ MPa, $t_z = 7.0$ s

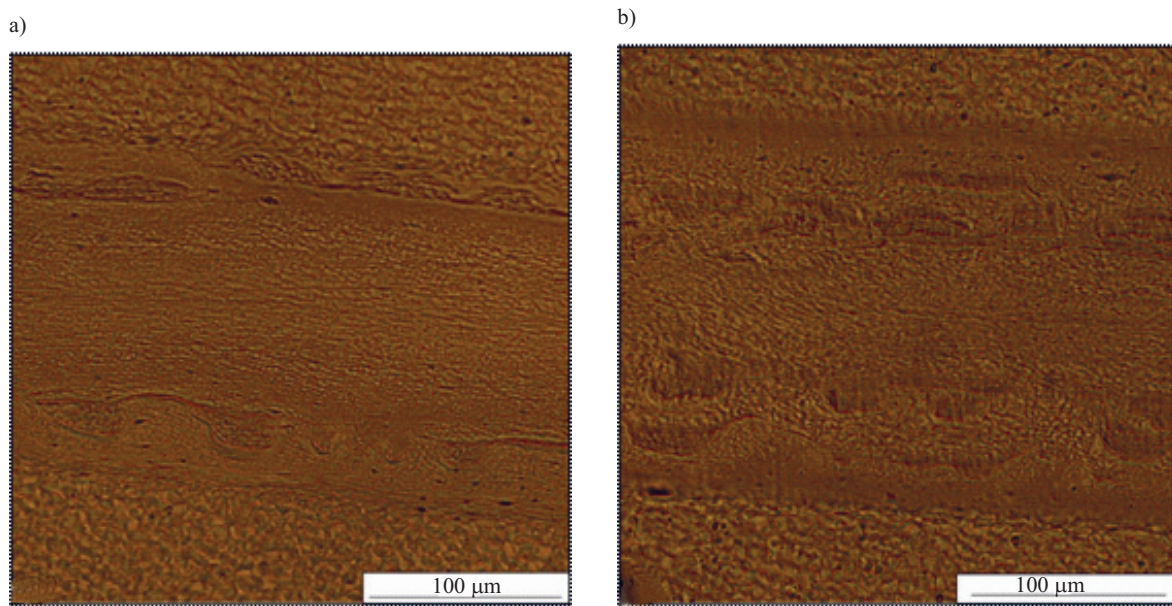


Rys. 6. Fragmenty mikrostruktury złączy z PA 66, wykonanych metodą zgrzewania wibracyjnego: a) $a = 1,0$ mm, $p_z = 1,35$ MPa, $t_z = 7,0$ s; b) $a = 1,6$ mm, $p_z = 1,35$ MPa, $t_z = 5,0$ s

Fig. 6. Fragments of the microstructure of PA 66 joints made by vibration welding method: a) $a = 1.0$ mm, $p_z = 1.35$ MPa, $t_z = 7.0$ s; b) $a = 1.6$ mm, $p_z = 1.35$ MPa, $t_z = 5.0$ s

Zwiększenie amplitudy drgań (przy takim samym docisku zgrzewania) powoduje zmianę w budowie strukturalnej zgrzeiny (rys. 6b). W środkowej części złącza pojawia

się warstwa (4) ze słabo rozwiniętą strukturą sferolityczną (małe sferolity), dalej występuje cienka warstwa tworzywa o strukturze bezpostaciowej (3) oraz warstwa zde-



Rys. 7. Fragmenty mikrostruktury złączy z PA 66 wykonanych metodą zgrzewania wibracyjnego z amplitudą drgań $a = 1,6$ mm i w czasie zgrzewania $t_z = 3,5$ s, w warunkach różnego docisku zgrzewania: a) $p_z = 2,58$ MPa, b) $p_z = 3,87$ MPa

Fig. 7. Fragments of the microstructure of PA 66 joints made by vibration welding method with the amplitude $a = 1.6$ mm and welding time $t_z = 3.5$, with the different weld pressures: a) $p_z = 2.58$ MPa, b) $p_z = 3.87$ MPa

formowanych sferolitów (2), która uległa odkształceniom cieplno-mechanicznym, przechodząc w materiał podstawowy (1). W środkowej części zgrzeiny nie wyróżnia się natomiast warstwy bezpostaciowej. Zwiększenie amplitudy drgań wpłynęło na poszerzenie obszaru zgrzewania tworzywa (zgrzeiny) do 0,21 mm.

Zwiększenie docisku zgrzewania do 2,58 MPa oraz 3,87 MPa, przy stałej amplitudzie drgań $a = 1,6$ mm, sprzyja dynamice procesu, w krótszym czasie tworzywo na powierzchni zgrzewanych próbek osiąga temperaturę topnienia. Budowa zgrzeiny (rys. 7) jest podobna do przedstawionej na rys. 6b, przy czym warstwa sferolitów (4) w obszarze przejścia w warstwę bezpostaciową (3) jest nieregularna. W zgrzeinie występuje również wąski obszar sferolitów, które uległy odkształceniu mechanicznemu (2), nie występuje natomiast w środkowej części

warstwa bezpostaciowa. Szerokość zgrzeiny w przypadku złącza wykonanego przy amplitudzie $a = 1,6$ mm i sile docisku $p_z = 2,58$ MPa, wyniosła 0,17 mm, zastosowanie docisku zgrzewania $p_z = 3,87$ MPa zwiększyło szerokość zgrzeiny do 0,20 mm.

Wytrzymałość złączy

Wartości wytrzymałości uzyskane w statycznej próbie rozciągania złączy zestawiono w tabeli 3. W odniesieniu do zastosowanych parametrów zgrzewania obliczono średnią wytrzymałość na rozciąganie $R_{mśr}$ oraz odchylenie standardowe σ .

Największą wytrzymałość połączeń z PA 66 uzyskano w przypadku zgrzewania z dociskiem $p_z = 1,35$ MPa, wynosi ona ok. 77 % wartości wytrzymałości materiału pod-

T a b e l a 3. Wytrzymałość na statyczne rozciąganie złączy z PA 66, wykonanych metodą zgrzewania wibracyjnego

T a b l e 3. Tensile strength of joints made of PA 66 using vibration welding method

$p_z = 1,35, \text{ MPa}$				$p_z = 2,58, \text{ MPa}$				$p_z = 3,87, \text{ MPa}$			
$a, \text{ mm}$	$t_z, \text{ s}$	$R_{mśr}, \text{ MPa}$	σ	$a, \text{ mm}$	$t_z, \text{ s}$	$R_{mśr}, \text{ MPa}$	σ	$a, \text{ mm}$	$t_z, \text{ s}$	$R_{mśr}, \text{ MPa}$	σ
1,0	7,0	34,6	3,1	1,0	7,0	46,7	3,6	1,0	5,5	40,3	1,0
	8,0	39,2	3,0		7,5	45,8	0,6		6,0	40,9	1,1
	9,0	50,3	2,0		8,0	49,4	2,0		6,5	43,2	1,1
1,2	5,5	42,7	3,5	1,2	4,0	28,8	6,1	1,2	3,5	42,2	0,7
	6,5	53,8	4,6		4,5	42,0	2,1		4,5	44,3	2,5
	7,5	53,5	2,6		5,5	47,1	6,2		5,0	44,8	0,7
1,6	3,5	43,6	2,4	1,6	2,5	43,1	4,7	1,6	2,5	40,1	0,7
	4,0	52,7	1,3		3,0	44,7	2,5		3,0	44,2	2,3
	5,0	53,0	2,3		3,5	53,4	2,6		3,5	44,3	2,4

stawowego, najmniejszą natomiast w przypadku zgrzewania z dociskiem $p_z = 3,87$ MPa (ok. 64 % wartości R_m materiału PA 66). Wyniki te potwierdzają dane uzyskane w innych jednostkach badawczych, wskazujących, że wytrzymałość złączy jest tym większa im mniejszy jest docisk zgrzewania. Stwierdzono również, że wydłużanie czasu zgrzewania z zachowaniem docisku zgrzewania oraz amplitudy drgań, wpływa na wzrost wytrzymałości złączy. Zjawisko to jest szczególnie wyraźne, gdy zgrzewanie realizuje się z małym dociskiem ($p_z = 1,35$ oraz $2,58$ MPa). Zauważono również, że w przypadku danego docisku zgrzewania zwiększanie amplitudy drgań skracca czas zgrzewania, konieczny do uzyskania złączy o dużej wytrzymałości.

WNIOSKI

Analizując wpływ czasu zgrzewania na proces tworzenia się złączy z PA 66 zauważono, że dla danej wartości docisku zgrzewania i amplitudy drgań zastosowanie zbyt krótkiego czasu zgrzewania prowadzi do uzyskania złączy charakteryzującego się budową amorficzną w obszarze zgrzewania (zgrzewanie w warunkach $t_z = 7,0$ s, $a = 1,0$ mm, $p_z = 1,35$ MPa), a zgrzeina takich złączy jest bardzo wąska (0,06 mm). W przypadku zwiększenia amplitudy drgań do 1,6 mm i zachowaniu takiej samej wartości docisku, jest możliwe uzyskanie złączy o wielowarstwowej budowie strukturalnej zgrzeiny, już po czasie zgrzewania $t_z = 5,0$ s. Badania metodą DSC wykazały, iż zgrzeina takich złączy wykazuje dużą zawartość fazy krystalicznej (ok. 23,52 %). Z kolei zwiększenie docisku zgrzewania ($p_z = 2,58$ MPa), już przy małej amplitudzie drgań ($a = 1,0$ mm) prowadzi do otrzymania zgrzeiny o budowie warstwowej ze średnią zawartością fazy krystalicznej (ok. 18,3 %), zwiększenie zaś amplitudy drgań do 1,6 mm wpływa korzystnie na zwiększenie udziału fazy krystalicznej do ok. 25,72 %, po czasie zgrzewania $t_z = 3,5$ s. Stwierdzono, że istnieje zależność pomiędzy zawartością fazy krystalicznej a wytrzymałością złączy. Złącza charakteryzujące się większym stopniem krystaliczności obszaru zgrzewania wykazują lepsze właściwości mechaniczne wyznaczone w statycznej próbie rozciągania. Wykazano, że dla każdego z zastosowanych docisków zgrzewania oraz dla każdej wartości amplitudy drgań, wydłużanie czasu zgrzewania wpływa na wzrost wytrzymałości złączy. Ponadto, w przypadku danej wartości docisku zgrzewania, im większa jest wartość amplitudy drgań, tym krótszy jest czas wymagany do uzyskania złączy o dużej wytrzymałości.

Analiza wyników badań właściwości złączy z PA 66 pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

– W warunkach prawidłowo dobranych parametrów zgrzewania (docisk, amplituda drgań, czas zgrzewania), uzyskuje się obszar zgrzewania próbek z PA 66 charakte-

ryzujący się ciągłością materiałową. Zgrzeina ma budowę wielowarstwową, składającą się w dużej części z drobnoziarnistej struktury sferolitycznej.

– Zastosowanie zbyt krótkiego czasu zgrzewania (bez względu na wartość zastosowanej amplitudy drgań i docisku zgrzewania) prowadzi do otrzymania materiału zgrzeiny wykazującego amorficzną budowę oraz małą wytrzymałość na rozciąganie.

– Zawartość fazy krystalicznej w zgrzeinie w największym stopniu zależy od zastosowanej amplitudy drgań. Większym stopniem krystaliczności charakteryzują się zgrzeiny złączy wykonanych z większą amplitudą drgań, niezależnie od wartości docisku zgrzewania.

– Wytrzymałość złączy zależy od zawartości fazy krystalicznej w zgrzeinie. Największą wytrzymałością charakteryzowały się złącza o zawartości fazy krystalicznej wynoszącej 23,52 i 25,72 %, uzyskane w warunkach docisku zgrzewania, odpowiednio, $p_z = 1,35$ i $2,58$ MPa i amplitudy drgań $a = 1,6$ mm.

Badania wykonano w ramach projektu badawczego nr 2011/01/N/ST8/07213, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

LITERATURA

- [1] Stokes V.K.: *J. Mater. Sci.* **2000**, 35, 2393, <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004788812627>
- [2] Stokes V.K.: *Polym. Eng. Sci.* **1988**, 28, 718, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760281104>
- [3] Stokes V.K.: *Polym. Eng. Sci.* **1988**, 28, 728, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760281105>
- [4] Stokes V.K., Poslinski A.J.: *Polym. Eng. Sci.* **1995**, 35, 441, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760350510>
- [5] Tsang K.Y., DuQuesnay D.L., Bates P.J.: *Composites: Part B* **2008**, 39, 396, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.01.012>
- [6] LeBlanc V., Baylis B., Qi L., Watt D: *SPE ANTEC Tech. Papers* **2001**, 1229.
- [7] Bates P.J., Mah J.C., Liang H.: *SPE ANTEC Tech. Papers* 2001, 3460.
- [8] Bates P.J., Dyck C., Osti M.: *Polym. Eng. Sci.* **2004**, 44, 760, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20068>
- [9] Tsang K.Y., DuQuesnay D.L., Bates P.J.: *Polym. Eng. Sci.* **2005**, 45, 935, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20351>
- [10] Grewell D.A., Benatar A., Park J.B.: „Plastics and Composites Welding Handbook”, Wydawnictwo HANSER, 2003.
- [11] Chung Young-Mi, Kamal M.R.: *Polym. Eng. Sci.* **2008**, 48, 240, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20830>
- [12] Krisham Ch., Toussant D., Benatar A.: *SPE ANTEC Tech. Papers* **2004**, 1241.
- [13] Seatchling H: „Tworzywa sztuczne. Poradnik”, WNT, Warszawa 2000, str. 446.

Otrzymano 11 II 2013.