

Anna RUDAWSKA<sup>1</sup>, Piotr PISKUR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. PL, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: a.rudawska@pollub.pl

<sup>2</sup> mgr inż. Piotr Piskur, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: tuirin@wp.pl

## Wpływu wybranych parametrów technologicznych obróbki mechanicznej na wytrzymałość połączeń klejowych szkła sodowego

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zagadnienia związane z określeniem wpływu wybranych parametrów technologicznych obróbki mechanicznej na wytrzymałości połączeń klejowych szkła sodowego. Przedmiotem badań doświadczalnych były próbki wykonane ze szkła sodowego o grubości 2 mm. Powierzchnie próbek poddano piaskowaniu z wysokości 200, 300 i 400 mm przy stałym ciśnieniu 2 bar. Podczas badania piasek został pozbawiony wszelkich zanieczyszczeń, następnie wysuszony i podzielony na frakcje od 0,3 do 1 mm. W badaniu użyto kleju Loctite 406, natomiast do oczyszczenia powierzchni wykorzystano środek czyszczący firmy Loctite SF 7061. Badaniom wytrzymałościowym poddano próbki połączeń klejowych jednozakładkowych obciążonych na ścinanie. Podczas badań wytrzymałościowych wszystkie próbki zostały zniszczone poza spoiną klejową, co świadczy m.in. o poprawnie przyjętej technologii klejenia analizowanego szkła sodowego.

**Słowa kluczowe:** obróbka mechaniczna, połączenie klejowe, wytrzymałość, szkło sodowe

### INFLUENCE OF THE SELECTED TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF MECHANICAL TREATMENT ON THE SODA GLASS BONDED JOINTS STRENGTH

**Abstract:** The article presents issues related to the designation of selected technological parameters of machining on the strength of adhesive joints sodium glass. The subject of experimental studies were samples of glass with a thickness of 2 mm sodium surfaces of the samples were sandblasted from a height 200, 300 and 400 mm at constant pressure of 2 bar. During the test, the sand was stripped of any impurities, then dried and split into factions from 0.3 to 1 mm. In the study Loctite 406 adhesive was used to bonding and Loctite 7061 SF degreasing agent was used to adherends surface cleaning. The single-lap joints were subjected to strength tests. During the strength tests all the samples were failed away from adhesive layer and the adherends were failed. This result was indicated of correctly sodium glass bonding technology.

**Keywords:** mechanical treatment, bonded joint, strength, sodium glass

## 1. WPROWADZENIE

Kleje dzięki swym licznym właściwościom umożliwiają łączenie ze sobą różnorodnych materiałów [1–4]. W przypadku szkła jest to jedyne wyjście, dzięki któremu można uniknąć nierównomiernych rozkładów naprężeń, które mogą doprowadzić do nagłego uszkodzenia materiału. Dużą zaletą klejenia jest też fakt, iż zapewnia ono dobrą izolację, co często jest stosowane w przypadku konstrukcji, w których wykorzystywany jest badany materiał. Połączenie jest szczelne,

a sam klej nie powoduje zmian w strukturze materiału [1,3]. Należy dokonać właściwego wyboru zarówno samego kleju (rodzaju, właściwości, ilości, sposobu aplikacji), jak również odpowiednio przygotować powierzchnie łączonych elementów [2,4,5]. Ważne jest również przestrzeganie określonych warunków podczas łączenia oraz utwardzania spoiny klejowej. Jest to istotny czynnik mający wpływ na dalszą pracę pojedynczego połączenia, a także całej konstrukcji. W niektórych pracach zamieszczono wyniki badań oraz zalecenia dotyczące wybranych

aspektów klejenia szkła [6,7], a także połączeń klejowych szkła z innymi materiałami [8–12].

W niniejszej pracy skupiono się głównie na analizie wpływu jednego z czynników technologicznych, jakim jest sposób przygotowania powierzchni do procesu klejenia oraz wpływu tej operacji na wytrzymałość połączeń klejowych szkła sodowego. W tym celu wybrano obróbkę mechaniczną poprzez piaskowanie, która umożliwia rozwinięcie rzeczywistej struktury geometrycznej klejonych próbek ze szkła sodowego, a także wyróżnia się dokładnością oraz daje możliwość oczyszczenia trudno dostępnych miejsc.

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1. CHARAKTERYSTYKA ŁĄCZONEGO MATERIAŁU

Do badań wykorzystano próbki wykonane ze szkła sodowego (rys. 1). Jest to najbardziej znany i rozpowszechniony rodzaj szkła.



Rys. 1. Skład chemiczny szkła sodowego

Fig. 1. Chemical composition of soda glass

Charakteryzuje się ono niską temperaturą topnienia. Powstaje poprzez stopienie głównie tlenków: krzemu, wapnia oraz sodu, a następnie ochłodzeniu poniżej temperatury rekrytalizacji. Posiada właściwości mechaniczne takie jak sztywność oraz kruchość i jest odporne na działanie czynników chemicznych [7,8]. Podczas wykonywania próbek wykorzystano taflę szkła o grubości 2 mm (rys. 2). Po cięciu uzyskano wymiary próbek: długość  $100 \pm 2,4$  mm, szerokość  $25 \pm 1,6$  mm.

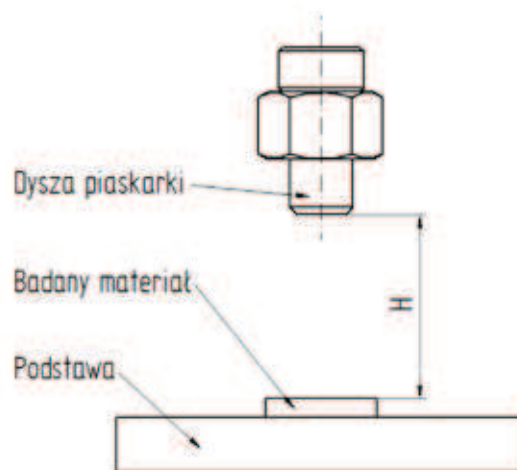


Rys. 2. Widok przygotowanych próbek

Fig. 2. View of the prepared sample

### 2.2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK SZKŁA SODOWEGO DO KLEJENIA

Powierzchnie próbek zostały starannie przygotowane dzięki metodzie piaskowania (rys. 3). Czynnikiem zmiennym była odległość dyszy piaskarki od badanych elementów ( $H$ ), natomiast pozostałe parametry technologiczne pozostały niezienne. Szczegółowe parametry technologiczne dotyczące zastosowanego procesu piaskowania zostały przedstawione na rys. 5 oraz w tabeli 1.



Rys. 3. Schemat piaskowania

Fig. 3. Scheme of sandblasting

Przykładowy wygląd próbek po powyższej obróbce piaskowaniem został przedstawiony kolejno na rys. 4. Na powierzchni próbek przy

piaskowaniu  $H = 200$  mm zauważono liczne wydarcia i obtrącenia świadczące o zbyt mocnej obróbce. W przypadku próbek piaskowanych wysokości 300 mm i 400 mm otrzymano ( w ocenie

wizualnej) strukturę bardziej równomierną, bez śladów uszkodzeń krawędzi próbek. Cechowały się one dużą dokładnością wykonania oraz mniejszym rozwinięciem powierzchni.

**Tabela 1. Parametry technologiczne piaskowania**  
**Table 1. Technological parameters of sandblasting**

Parametry technologiczne	Wartość
Wysokość piaskowania (odległość dyszy piaskarki od powierzchni piaskowanego elementu)	H1 = 200 mm H2 = 300 mm H3 = 400 mm
Grubość ziaren piachu	od 0,3 do 1 mm
Czas piaskowania	3 sek.
Ciśnienie podczas piaskowania	2 bary
Średnica dyszy do piaskowania	5 mm
Zużycie ścierniwa	≈ 60 kg/h



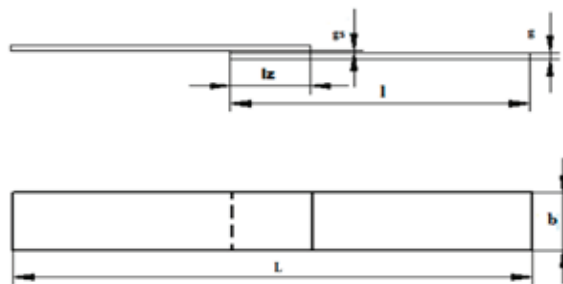
Rys. 4. Wygląd próbek po obróbce piaskowaniem z wysokości 200 mm

Fig. 4. Appearance of samples after sandblasting treatment from a height of 200 mm

Po procesie piaskowania, próbki poddano odtłuszczeniu za pomocą środka odtłuszczającego Loctite SF 7061. Odtłuszczenie polegało na nałożeniu środka odtłuszczającego na piaskowane powierzchnie, a następnie wytarciu suchym ręcznikiem. Zabieg ten powtórzono dwukrotnie. Po trzecim nałożeniu środka pozostawiono próbki do swobodnego wyschnięcia. Dzięki tym czynnościom oczyszczono badaną powierzchnię z wszelkich zanieczyszczeń po piaskowaniu.

### 2.3. OPIS POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Do klejenia próbek szkła sodowego przygotowanych zgodnie z opisaną wcześniej metodą użyto kleju Loctite 406. Jest to jednoskładnikowy klej cyjanoakrylowy o niskiej lepkości. Dzięki szybkiemu utwardzaniu często jest stosowany przy połączeniach wymagających szybkiego ustalenia detali. Podczas wykonywania połączeń na jedną z uprzednio przygotowane powierzchni równomiernie naniesiono odpowiednią ilość kleju, wykorzystując odpowiednio ukształtowany aplikator będący integralną częścią opakowania kleju. Połączenia wykonano, jako jednozakładkowe o wymiarach przedstawionych na rys. 5.



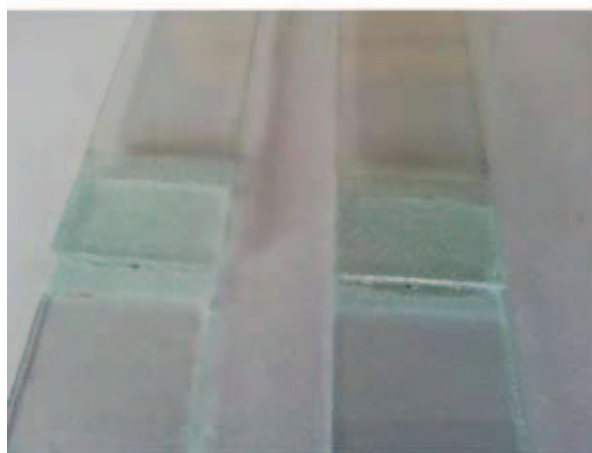
Rys. 5. Schemat połączenia klejowego

Fig. 5. Scheme of adhesive joints

Wymiary geometryczne połączenia wynosiły: długość zakładki  $l_z = 16$  mm, długość próbki  $L = 100$  mm, grubość próbki  $g = 2$  mm, szerokość połączenia  $b = 25$  mm, grubość spoiny klejowej  $g_s = 0,12$  mm.

Podczas łączenia elementów, delikatnymi ruchami usunięto potencjalne pęcherze powietrza. Następnie dzięki odpowiedniemu ustaleniu wzajemnego położenia uniemożliwiono ewentualne przesunięcie się próbek, Nacisk dobrano tak, aby spoina była ciągła i posiadała odpowiednią grubość. Wartość obciążenia przypadająca na jedno połączenie wynosiła 250 g. Ostatnim etapem była kontrola wizualna, która miała na celu wykrycie potencjalnych wad technologicznych, takich jak: pęknięcia szczeliny, ubytki, czy odwarstwienia (rys. 6).

Cały proces, podczas którego były łączone wszystkie próbki był prowadzony przy stałych warunkach. Temperatura w pomieszczeniu laboratoryjnym wynosiła  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ , natomiast wilgotność powietrza była równa  $34 \pm 1\%$ .



Rys. 6. Widok uzyskanych połączeń klejowych  
Fig. 6. View of obtaining adhesive joints

#### 2.4. POMIARY CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI ŁĄCZNYCH ELEMENTÓW I BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Przed procesem klejenia próbki zostały poddane pomiarom wybranych parametrów chro-

powatości powierzchni, zgodnie z normą ISO 11562. Pomiary te zostały wykonane metodą stykową za pomocą profilometru HOMMEL TESTER T1000. Powyższa metoda polega na odwzorowaniu badanej powierzchni poprzez przemieszczanie się ze stałą prędkością wzdłuż mierzonego profilu głowicy z końcówką pomiarową. Następnie, poprzez sygnał elektryczny odczytywane jest pionowe przemieszczenie. Po odpowiednim odfiltrowaniu falistości i błędów kształtu można odczytać wartości liczbowe parametrów chropowatości oraz wygenerować rejestrowany profilogram.

Badania wytrzymałościowe zakładkowych połączeń klejowych szkła sodowego wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150, zgodnie z normą EN DIN 1465, przy wstępnej sile 20 N oraz prędkości rozciągania 5 mm/min. W celu określenia wytrzymałości połączeń klejowych szkła sodowego, przygotowane próbki zamocowano w uchwytach maszyny, stosując specjalne zamocowanie w celu uniknięcia zniszczenia próbek szklanych i poddawano stopniowemu rozciąganiu, aż do momentu ich zniszczenia.

### 3. WYNIKI BADAŃ

#### 3.1. WYNIKI POMIARÓW PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

Struktura powierzchni próbek ze szkła sodowego poddanego piaskowaniu z różnych wysokości została zobrazowana poprzez wydruki profilogramów powierzchni, przedstawione na rys. 7–9. Dla porównania zostały także przygotowane próbki, które zostały poddane tylko operacji odtłuszczenia (rys. 10).

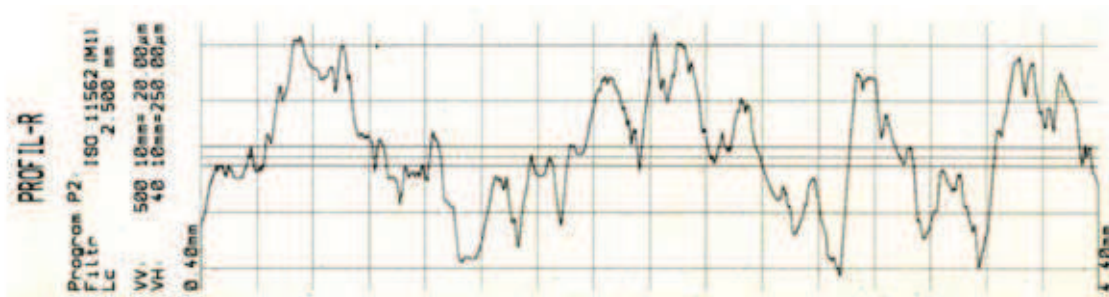
Na podstawie profilogramów powierzchni zamieszczonych na rys. 7–10 zauważono, że największe rozwinięcie powierzchni uzyskano po piaskowaniu z wysokości 200 mm (rys. 7), natomiast najmniejsze po odtłuszczeniu powierzchni (rys. 10). Powierzchni próbki po odtłuszczeniu wykazuje mniejszą



chropowatość w porównaniu z pozostałymi wariantami obróbki. Brak jest na powierzchni wyraźnych wgłębień, co może utrudnić zakotwiczenie się kleju. Na przedstawionym rys. 11 zestawiono wybrane parametry chropowatości powierzchni próbek, które zostały poddane obróbce poprzez piaskowanie z różnych wysokości.

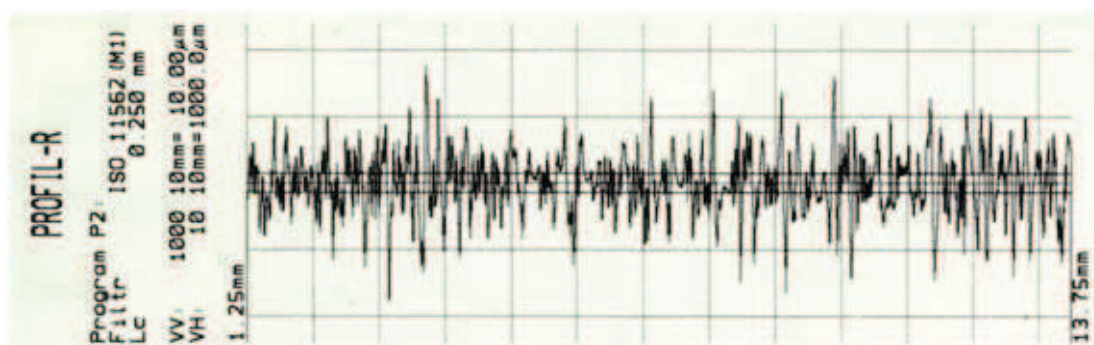
Największą wartość  $R_a$ , która wynosiła  $17,37 \mu\text{m}$ , zaobserwowano podczas pierwszego wariantu piaskowania, przy czym uzyskano także największy rozrzut uzyskanych wyników. Zauważono, iż wraz z oddalaniem dyszy piaskarki od powierzchni obrabianego elementu zmniejsza się wartość parametru  $R_a$ . Ponadto największa różnica wartości wystąpiła w początkowej fazie oddalania i wynosiła 77,7%, podczas gdy kolejna różniła się już tylko o 11,3%. W przypadku parametru  $R_z$  zaobserwowano podobną zależność jak w przypadku parametru  $R_a$ , zmniejszanie się

wartości parametru wraz ze wzrostem odległości dyszy piaskarki  $H$  od piaskowanej powierzchni. Mimo, iż parametr  $R_z$  dokładnie odzwierciedla badaną chropowatość to jednak dla całościowego przedstawienia chropowatości powierzchni lepszym parametrem jest parametr  $R_a$ , gdyż każde przypadkowe nadmierne wzniesienie lub wgłębienie, wpływa w sposób istotny na wynik pomiaru, fałszując ogólny obraz chropowatości. Parametr  $R_z$  jest właściwszy jedynie do oceny lokalnego pola. Z uwagi na losowy charakter profilu chropowatości parametr  $R_{\text{max}}$  cechuje się dużym rozrzutem oraz największymi wartościami. Porównując chropowatość powierzchni po odtłuszczeniu próbek do pozostałych sposobów przygotowania powierzchni ich różnica procentowa wynosi kolejno dla  $H=200 - 99,64\%$ ,  $H=300 - 99,14\%$ , oraz dla  $H=400 - 99,06\%$ . Świadczy to o dużych ubytkach w materiale, widocznych szczególnie dla piaskowania z pierwszej wysokości.



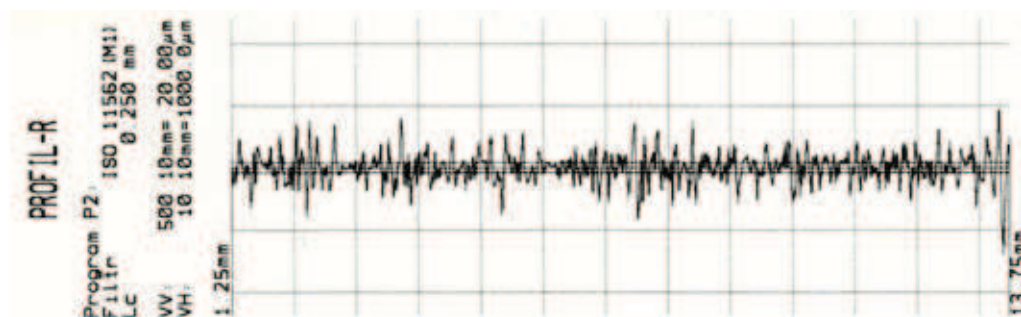
Rys. 7. Przykładowy profilogram powierzchni próbki piaskowanej z wysokości 200 mm

Fig. 7. Example of surface profile of samples sandblasting from a height of 200 mm



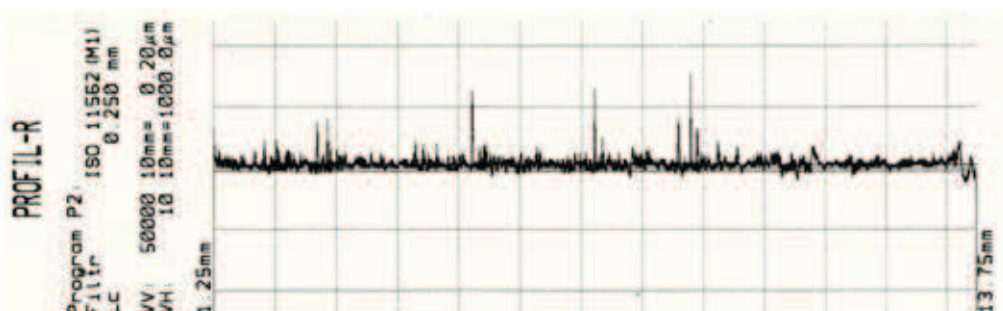
Rys. 8. Przykładowy profilogram powierzchni próbki piaskowanej z wysokości 300 mm

Fig. 8. Example of surface profile of samples sandblasting from a height of 300 mm



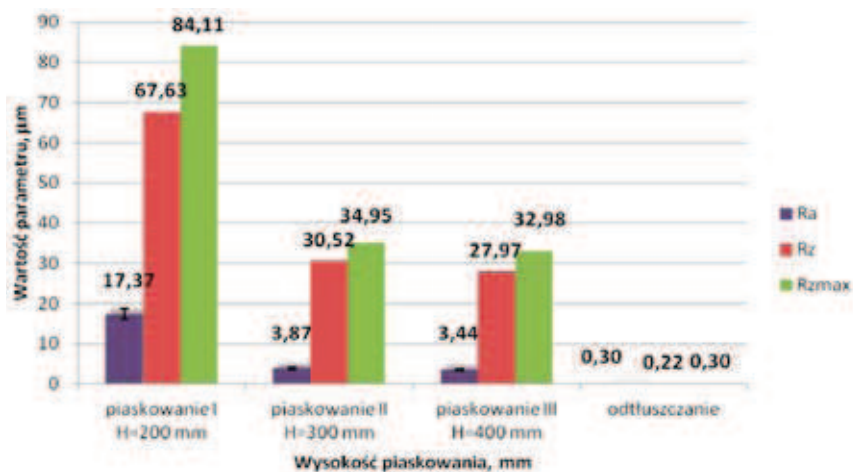
Rys. 9. Przykładowy profilogram powierzchni próbki piaskowanej z wysokości 400 mm

Fig. 9. Example of surface profile of samples sandblasting from a height of 400 mm



Rys. 10. Przykładowy profilogram powierzchni próbki po odtuszczeniu

Fig. 10. Example of surface profile of samples after degreasing



Rys. 11. Wpływ wysokości piaskowania  $H$  na wartość parametrów chropowatości powierzchni amplitudowych

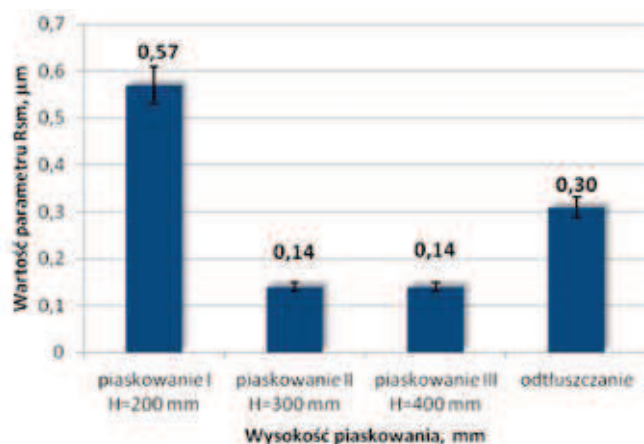
Fig. 11. Effect of the sandblasting height ( $H$ ) on the value of the surface roughness amplitude

Średnią szerokość rowków elementów profilu chropowatości  $R_{sm}$  przedstawiono na rys 12. Największe wgłębienia i rysy powstały przy obróbce piaskowaniem z wysokości 200 mm. Próbkę po odtuszczeniu, mimo iż cechowały się dużą gładkością, to ich średnia wartość szerokości okazała się bardzo duża.

Świadczyć to może o kilku rysach, które mają znaczący wpływ na zawyżenie wartości. Te dwa sposoby przygotowania powierzchni cechuje duża rozbieżność wyników od ich średnich. Bardziej regularne i drobniejsze uszkodzenie materiału uzyskano dzięki piaskowaniu z wysokości 300 i 400 mm.

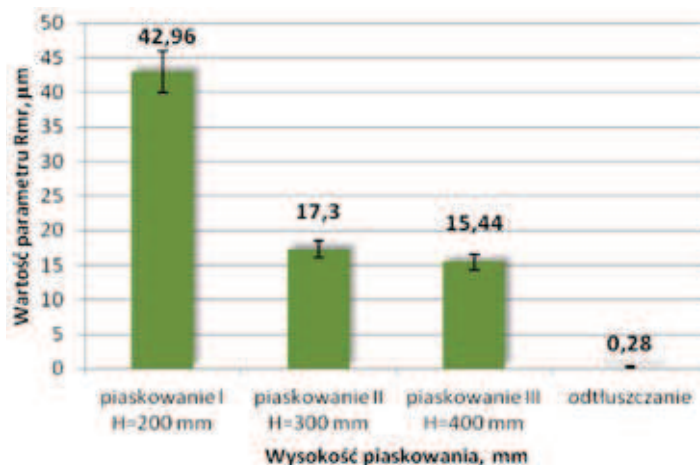
Zauważono, iż udział materiałowy profilu Rmr (rys. 13) zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem się chropowatości powierzchni. Najbardziej narażone na ścieranie są próbki, których

powierzchnie zostały mocno osłabione (piaskowanie I). Próbki, które zostały poddane jedynie odtłuszczeniu cechują się niewielkim udziałem materiałowym.



Rys. 12. Wpływ wysokości piaskowania H na wartość Rsm

Fig. 12. Effect of the sandblasting height (H) on the Rsm value



Rys. 13. Wpływ wysokości piaskowania H na wartość Rmr

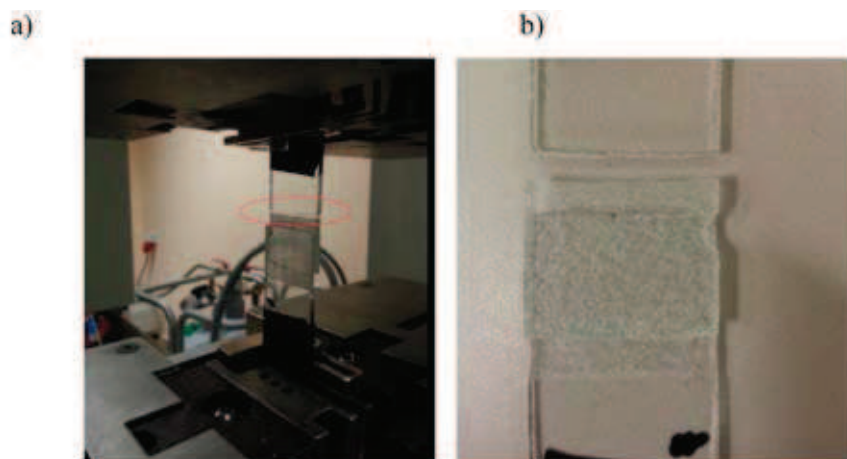
Fig. 13. Effect of the sandblasting height (H) on the Rmr value

### 3.2. WYNIKI WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Podczas wykonywanych badań wytrzymałościowych okazało się, że siły kohezji kleju przewyższyły siły adhezji pomiędzy łączonymi elementami a klejem oraz siły kohezji materiału i zniszczenie wystąpiło w badanym ma-

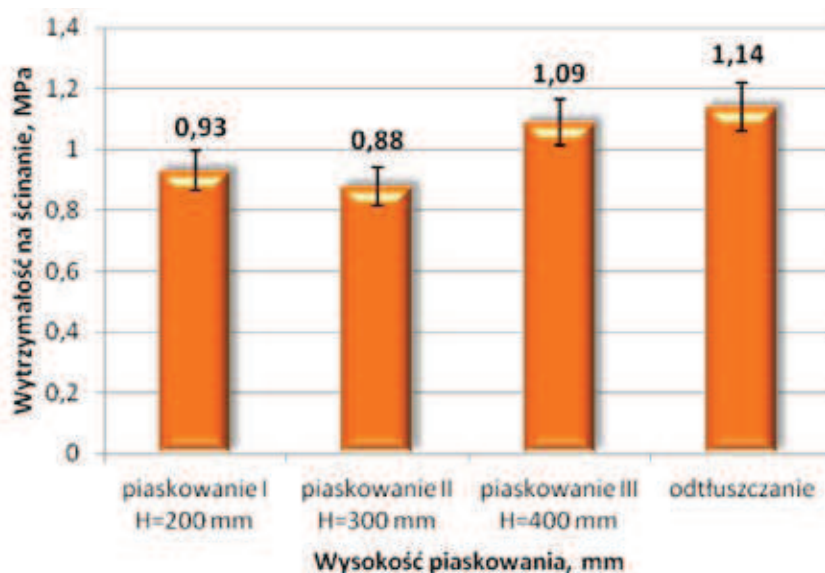
teriale (rys. 14). We wszystkich przypadkach zniszczenie nastąpiło tuż za spoiną klejową. Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych zamieszczono na rys. 15.

Największą wytrzymałość połączeń klejowych próbek ze szkła sodowego otrzymano po odtłuszczeniu (1,14 MPa). Wśród piaskowania, największą wartość wytrzymałości połączeń



Rys. 14. Miejsce zniszczenia próbek: a) próbki w szczękach uchwytu maszyny wytrzymałościowej, b) widok próbki po zniszczeniu

Fig. 14. Place the failure of the samples: a) sample in the jaws of the testing machine grips, b) view of the sample after the failure



Rys. 15. Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych szkła sodowego

Fig. 15. The influence of the surface treatment on the shear adhesive joints strength of soda glass

klejowych uzyskano po piaskowaniu z wysokości 400 mm (1,09 MPa), a najniższą po piaskowaniu z wysokości 300 mm (0,88 MPa). Różnica pomiędzy największą a najmniejszą wartością wytrzymałości wyniosła 23%, z kolei różnica pomiędzy pierwszym (I) a ostatnim piaskowaniem (III) uzyskała wartość 15%. Porównując połączenia klejowe, których powierzchnie próbek szkła sodowego poddano operacji odtłuszczenia

oraz piaskowania zauważono, że wytrzymałość połączeń klejowych po piaskowaniu z najwyższej odległości (400 mm) stanowi 96 % wartości wytrzymałości połączeń, w których próbki były poddane odtłuszczeniu. Natomiast po piaskowaniu z najniższej odległości (200 mm) – 18,5%. Świadczyć to może o mniejszym uszkodzeniu badanych próbek podczas procesu piaskowania z wyższej odległości, co potwierdzono tak-



że poprzez analizę parametrów chropowatości powierzchni oraz profilogramów powierzchni.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono analizę wytrzymałości połączeń klejowych próbek wykonanych ze szkła sodowego. Podczas wykonywania badań czynnikiem zmiennym była odległość dyszy piaskarki H od badanego materiału, która wynosiła kolejno 200, 300, 400 mm. Ponadto w celach porównawczych wykonano połączenia, których powierzchnie zostały poddane wyłącznie operacji odtuszczenia. Podczas dokonywania analizy badań doświadczalnych zauważono duże różnice w chropowatości związane z odległością H dyszy piaskarki od powierzchni badanych próbek. Największe wartości otrzymano podczas piaskowania charakteryzującego się najniższą wysokością pierwszego, a najmniejsze – w przypadku największej zastosowanej odległości, przy czym wraz ze zmniejszaniem się wysokości piaskowania zmniejszenie chropowatości nie było równomierne. Zaobserwowano, iż wraz ze zmniejszaniem się chropowatości powierzchni (na skutek zwiększenia wysokości piaskowania, czyli także zmniejszenia ciśnienia tej obróbki) zmniejsza się uszkodzenie powierzchni badanych próbek. Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono konieczność dalszej analizy w tym zakresie.

Podczas badań wytrzymałościowych wszystkie próbki zostały zniszczone poza spoiną klejową. Świadczy to o poprawnym wykonaniu połączenia klejowego. Ponadto w badanym przypadku wystąpiło zniszczenie kohezyjne łączonych materiałów, czyli siły adhezji występujące pomiędzy powierzchniami łączonych materiałów a klejem, oraz siły kohezyjne utwardzonego kleju były znacznie większe od siły kohezji łączonych materiałów. W związku z tym łączenie badanego materiału jakim było szkło za pomocą klejenia jest bardzo skuteczne i może być rekomendowane podczas projektowania połączeń montażowych tego typu materiałów.

#### LITERATURA

1. Cagle Ch. V.: *Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977, 372–388, 445–449.
2. Brockmann W. i inni: *Adhesive bonding. Materials, Applications and Technology*. Wiley-Vch Press, Weinheim, Niemcy 2009, 108–114.
3. Godzimirski J. i inni: *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997, 21–25, 51–56, 83–88.
4. Rudawska A.: Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych.. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2013, 29–35.
5. Rudawska A., Kowalska B., Kubicki P.: Wytrzymałość połączeń klejowych polimerów, wykonanych za pomocą wybranych klejów sztywnych i elastycznych. *Przetwórstwo Tworzyw 4/2015*, 343–348.
6. Goss B.: *Bonding glass and others substrates with UV curing adhesives*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2002, 22, 405–408.
7. Lowe G.B. i inni: *Water durability of adhesive bonds between glass and polysulfide sealants*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1994, 14, 85–92.
8. Overend M., Jin Q., Watson J.: *The selection and performance of adhesives for a steel-glass connection*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011, 31, 587–597.
9. Bähr C. i inni: *Withstanding frequent steam sterilisation: Innovative technique to bond glass and stainless steel composites in biotechnology and endoscopic medicine*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012, 33, 15–25.
10. Griner S., Nowosielski R.: *Wytrzymałość adhezyjna połączeń szkieł metalicznych z polimerami*. *Inżynieria Materiałowa*, 1996, 4, 106–110.
11. Harris A.F., Beevers A.: *The effect of grit-blasting on the surface properties for adhesion*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999, 19, 445–452.
12. Kumosa L., Armentrout D., Kumosa D.: *The effect of sandblasting on the initiation of stress corrosion cracking in unidirectional E-glass/polymer composites used in high voltage composite (non-ceramic) insulators*. *Composite Science Technology*, 2002, 62, 1999–2015.

Publikację przyjęto do druku: 30.06.16