

# Wpływ odchyłki płaskości powierzchni swobodnej na dopasowanie w procesie montażu

## Influence of flatness distortion of free-form surface in a fitting process

ANNA ZAWADA-TOMKIEWICZ  
DARIUSZ TOMKIEWICZ\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.176>

English version available on: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl)

Głównym celem pracy było przedstawienie badań odchyłek płaskości w kontekście możliwości dopasowania 2 tafli szkła hartowanego w procesie łączenia szkła warstwowego. Omówiono przykład analizy dopasowania zapewniającego zamienność całkowitą i zmienną częściową.

**SŁOWA KLUCZOWE:** hartowane termicznie szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe, wypukłość całkowita, wypukłość lokalna

*The main objective of the study was to present a study of flatness deviation in the context of the possibility of matching 2 tempered glass panes in the lamination process. The paper presents an example of an analysis of the fit that provides total interchangeability and partial interchangeability.*

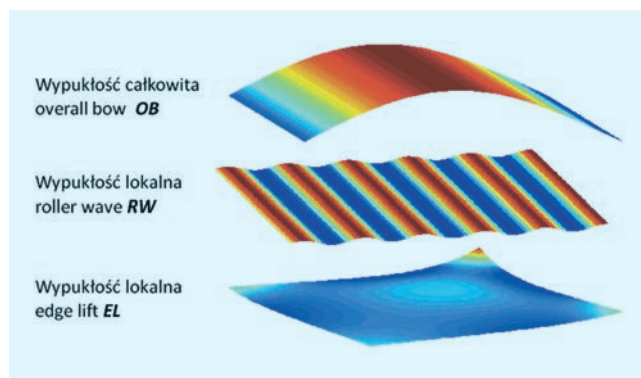
**KEYWORDS:** thermally toughened soda lime silicate safety glass, overall bow, roller wave distortion, edge lift

Bezpieczne szkło warstwowe powstaje w wyniku łączenia szkła hartowanego z warstwą wypełniającą [1, 2]. Wymaganiem wobec szkła hartowanego płaskiego w procesie łączenia jest to, aby odchyłka płaskości mieściła się w zadanej tolerancji. W takim ujęciu można mówić o zamienności całkowitej – tafle szkła, niezależnie od ułożenia, zawsze będą dopasowane, a przestrzeń między nimi zostanie wypełniona warstwą pośrednią. Gdy założona w procesie dopasowania tolerancja będzie zbyt duża, to w łączeniu z inną taflą szkła utworzy się objętość, której warstwa pośrednia nie będzie w stanie wypełnić. W takim ujęciu można mówić o zamienności częściowej – tylko w wybranych ułożeniach wzajemnych tafli szkła przestrzeń między nimi będzie wypełniona przez warstwę pośrednią.

Celem badań była analiza wpływu odchyłek płaskości powierzchni – które powstają w trakcie obróbki cieplnej szkła płaskiego – na wzajemne dopasowanie powierzchni w procesie łączenia bezpiecznego szkła warstwowego (PN ISO 12543-1 i PN ISO 12543-2).

### Zniekształcenia płaskości powierzchni

W trakcie obróbki cieplnej pod wpływem kontrolowanego procesu grzania i chłodzenia następuje zmiana właściwości materiału – zwiększa się jego odporność na obciążenia mechaniczne i termiczne oraz jest mu nadawana określona charakterystyka fragmentaryzacji. Zmiana właściwości materiału powoduje zniekształcenia (rys. 1). W procesie poziomego hartowania szkła istotne stają się zniekształcenia okresowe wynikające z przemieszczania rozgrzanego szkła na rolkach – *roller wave*. Norma PN-EN 12150-1 dzieli formy zniekształceń na 2 grupy: wypukłość całkowitą (*overall bow* – OB) i lokalną (miejscową) szkła (*roller wave* – RW i *edge lift* – EL) [3, 4].



Rys. 1. Rodzaje odchyłek płaskości tafli szkła hartowanego w procesie poziomym

### Dopasowanie z zamiennością całkowitą

W przypadku procesu hartowania poziomego intensywne grzanie i chłodzenie tafli szkła powoduje powstanie trzech głównych rodzajów nakładających się wzajemnie zniekształceń [5]:

- wypukłości całkowitej (odkształcenia całej tafli szkła hartowanego),
- wypukłości lokalnej *roller wave* (zniekształcenia powstałego w wyniku styku tafli szkła z obracającymi się rolkami podczas hartowania),
- wypukłości lokalnej *edge lift* (zniekształcenia frontowej i końcowej krawędzi tafli szkła).

Zalecenia dotyczące pomiaru i wartości dopuszczalnych wypukłości całkowitej zawarto w normie PN-EN 12150-1.

Odchyłka mierzona jest jako maksymalna odległość między płaską powierzchnią odniesienia a wklęsłą powierzchnią tafli szkła. Wartość wypukłości całkowitej wyrażana jest jako wartość odchyłki, w milimetrach, podzielona przez mierzoną długość krawędzi szkła lub przekątną.

Wypukłość całkowita ma największy wpływ na dopasowanie dwóch tafli szkła. Jeśli obie szyby są na tyle płaskie, że nie przekraczają tolerancji, średnia odległość między nimi zmienia się w zakresie od 0 do 4 mm, biorąc pod uwagę kształt pustej objętości. Symulacje minimalnej średniej odległości między dwiema tafłami szkła określono z uwzględnieniem błędu objętościowego i minimalnej grubości warstwy pośredniej, którą należy zastosować do wypełnienia pustej objętości. W najgorszym przypadku, gdy obie powierzchnie tworzą wypukłą przestrzeń, ilość pustej objętości jest maksymalna. Przy najmniej korzystnym dopasowaniu tafli szkła hartowanego wartości dopuszczalnych odchyłek wypukłości całkowitej muszą zostać zredukowane do połowy dopuszczalnej wartości zdefiniowanej w normie [3].

Odchyłka lokalna *roller wave* jest wyznaczana jako różnica między maksymalnym a minimalnym odchyleniem miejscowym tafli szkła na długości 300 mm. Najbardziej

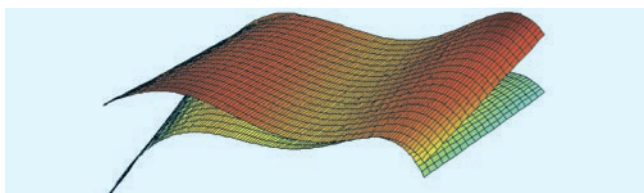
\* Prof. nadzw. dr hab. inż. Anna Zawada-Tomkiewicz ([anna.zawada-tomkiewicz@tu.koszalin.pl](mailto:anna.zawada-tomkiewicz@tu.koszalin.pl)), prof. nadzw. dr hab. inż. Dariusz Tomkiewicz ([dariusz.tomkiewicz@tu.koszalin.pl](mailto:dariusz.tomkiewicz@tu.koszalin.pl)) – Politechnika Koszalińska

korzystna jest sytuacja, gdy odchyłka miejscowa *roller wave* jest spójna (zbliżona amplituda i faza dla danej częstotliwości). Niespójność w jednym z parametrów sprawia, że odchyłki miejscowe się sumują. Symulacje dopasowania dwóch tafli szkła z wypukłością miejscową *roller wave* o dopuszczalnej wartości wskazują, że w najgorszym przypadku średnia wartość odległości pomiędzy taflami szkła nie przekracza 1 mm.

Wypukłość miejscowa *edge lift* mierzona jest jako maksymalna odległość między frontálną lub końcową krawędzią tafli szkła a powierzchnią odniesienia na długości 300 mm. Odchyłka *edge lift* nie ma znaczącego wpływu na całkowitą odchyłkę płaskości w ujęciu objętościowym. Natomiast przy łączeniu tafli szkła mogą wystąpić 2 przypadki. Pierwszy, korzystny przypadek to taki, w którym krawędzie szkła przylegają do siebie i tworzą zamkniętą przestrzeń, bez rozwarstwienia na krawędzi. Dużo mniej korzystna jest sytuacja, gdy krawędzie przy dopasowaniu rozchodzą się. W takim przypadku zachowanie dopuszczalnej wartości odchyłki nie gwarantuje wypełnienia pustej objętości przy krawędziach. Aby na krawędziach nie nastąpiło rozwarstwianie szkła warstwowego, wartość dopuszczalnej odchyłki *edge lift* powinna być ograniczona do grubości warstwy pośredniej.

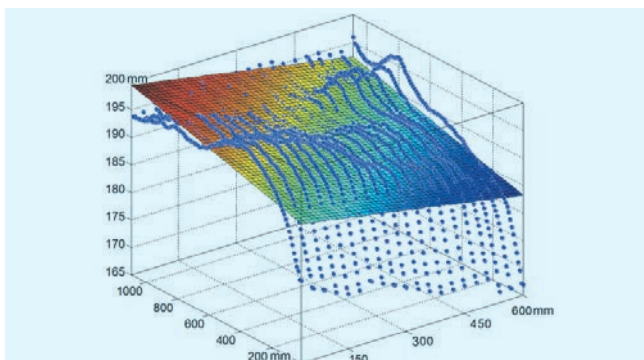
### Dopasowanie z zamiennością częściową – dopasowanie selekcyjne

Dowolne 2 tafle szkła pobranego z produkcji, o wartości odchyłek mieszczącej się w zdefiniowanej tolerancji, mogą być dopasowane niekorzystnie i w procesie łączenia będzie następowało rozwarstwienie lub niewypełnienie objętości warstwą pośrednią. Jeśli nie ma możliwości zawężenia granic tolerancji, jedynym rozwiązaniem jest dopasowanie selekcyjne. Polega ono na tym, że każda tafle szkła może mieć 4 różne orientacje w relacji do drugiej tafli i jest aż 16 różnych możliwości dopasowania 2 konkretnych wyrobów.



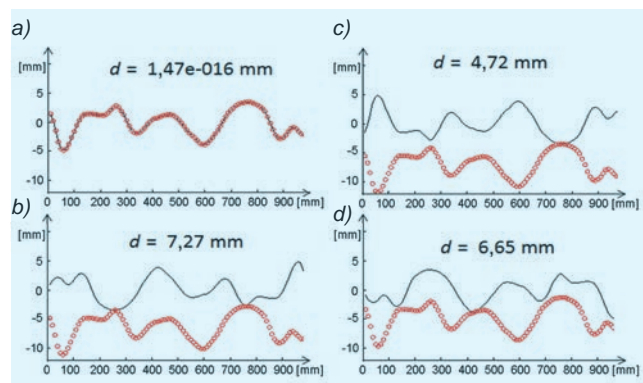
Rys. 2. Dopasowanie 2 powierzchni

Aby efektywnie dopasować 2 powierzchnie charakteryzujące się pewnymi odchyłkami płaskości, w pierwszej kolejności należy poznać rozkład tych odchyłek na całej powierzchni. Opracowano wizyjny system pomiarowy, który bez zakłócania przebiegu procesu technologicznego był w stanie dokonać pomiaru całej tafli szkła, a następnie wyznaczyć rozkład odchyłek w ujęciu 3D.



Rys. 3. Wyznaczanie odchyłek płaskości tafli szkła hartowanego

Pomiary były najpierw wykorzystywane w celu sprawdzenia, czy odchyłki mieszczą się w zadanych tolerancjach. Analizowane parametry uwzględniały wypukłość całkowitą *OB* oraz wypukłość lokalną *RW* i *EL*. Następnie tworzono model powierzchni swobodnej dla każdej z tafli szkła i przeprowadzono dopasowanie powierzchni, tak aby odległość minimalna między nimi wynosiła 0 przy podparciu w 3 punktach (1 operacja translacji i 2 operacje obrotu). Dla tak dopasowanych powierzchni modelowych wyznaczano średnią odległość w milimetrach. Może ona zostać zinterpretowana jako średnia grubość warstwy pośredniej konieczna do wypełnienia objętości między taflami szkła.



Rys. 4. Maksymalne odległości dwóch tafli szkła hartowanego wzdłuż kierunku maksymalnych odchyłek

Jak można zaobserwować na rys.4a, gdy odchyłki dwóch tafli szkła są spójne w przestrzeni 3D, to dopasowanie jest prawie doskonałe. Inne przypadki pokazują sytuacje, w których 2 powierzchnie nie są dobrze dopasowane. Oznacza to, że mimo że 2 tafle szkła są prawie identyczne, to gdy zniekształcenia nie pokrywają się w przestrzeni 3D, tworzą się puste objętości o średniej grubości przekraczającej znacznie grubość warstwy pośredniej (rys. 4b–d). Analiza rozkładu odchyłek w przestrzeni 3D dla każdej tafli szkła hartowanego umożliwia optymalny wybór jednego z 16 wzajemnych ustawień lub stwierdzenie niemożliwości właściwego łączenia szkła warstwowego.

### Podsumowanie

Przeanalizowano wpływ odchyłki płaskości w tafli szkła hartowanego na jakość dopasowania w procesie łączenia szkła warstwowego. Zbadano możliwość dopasowania z zamiennością całkowitą oraz z zamiennością częściową. W przypadku zamienności całkowitej przeanalizowano wpływ rodzaju odchyłki płaskości i jej dopuszczalnej wartości na proces dopasowania. W przypadku zamienności częściowej analiza dopasowania została oparta na opracowanym przez autorów wizyjnym systemie pomiarowym.

### LITERATURA

1. PN ISO 12543-1:2011 Szkło w budownictwie – Szkło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe – Część 1: Definicje i opis części składowych.
2. PN ISO 12543-2:2011 Szkło w budownictwie – Szkło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe – Część 2: Bezpieczne szkło warstwowe.
3. PN-EN 12150-1: 2015 Szkło w budownictwie – Termicznie hartowane bezpieczne szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe – Część 1: Definicja i opis.
4. PN-EN 12150-2: 2004 Szkło w budownictwie – Termicznie hartowane bezpieczne szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe – Część 2: Ocena zgodności wyrobu z normą.
5. GGF Datasheet for the Quality of Thermally Toughened Soda Lime Silicate Safety Glass for Building ([www.ionglass.co.uk](http://www.ionglass.co.uk)).